

本文引用格式: 胡智勇,龙祖强,古嘉盈,等.基于灰狼优化算法的模糊 PID 控制器参数优化[J].自动化与信息工程,2025,46(1):52-58.
HU Zhiyong, LONG Zuqiang, GU Jiaying, et al. Parameter optimization of fuzzy PID controller based on gray wolf optimization algorithm[J]. Automation & Information Engineering, 2025,46(1):52-58.

基于灰狼优化算法的模糊 PID 控制器参数优化*

胡智勇 龙祖强 古嘉盈 孙柯

(衡阳师范学院物理与电子工程学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 模糊 PID 控制器的参数优化至今仍是一个未得到完美解决的问题。利用灰狼优化算法优化模糊 PID 控制器的量化因子和比例因子, 可以改善给定条件下系统的控制性能。通过球杆系统的阶跃响应实验, 验证了基于灰狼优化算法的模糊 PID 控制器相对于传统模糊 PID 控制器、粒子群优化算法和遗传算法优化的模糊 PID 控制器在系统响应时间、超调量和调节时间等方面具有明显优势, 有效提高了系统的控制性能。

关键词: 灰狼优化算法; 模糊 PID 控制器; 参数优化; 量化因子; 比例因子

中图分类号: TP273.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2025)01-0008-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2025.01.008

开放获取

Parameter Optimization of Fuzzy PID Controller Based on Gray Wolf Optimization Algorithm

HU Zhiyong LONG Zuqiang GU Jiaying SUN Ke

(College of Physics and Electronic Engineering, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China)

Abstract: The parameter optimization of fuzzy PID controller is still an unsolved problem. The use of grey wolf optimization algorithm to optimize the quantitative factor and scaling factor of fuzzy PID controller can improve the control performance of the system under given conditions. Through the step response experiment of the golf club system, it was verified that the fuzzy PID controller based on the grey wolf optimization algorithm has significant advantages over traditional fuzzy PID controllers, particle swarm optimization algorithms, and genetic algorithm optimized fuzzy PID controllers in terms of system response time, overshoot, and adjustment time, effectively improving the control performance of the system.

Keywords: grey wolf optimization algorithm; fuzzy PID controller; parameter optimization; quantitative factor; scaling factor

0 引言

模糊 PID 控制器是一种利用模糊逻辑在线调整控制参数的 PID 控制器。其根据系统误差和误差变化率, 通过模糊推理自动调整 PID 控制器的参数, 从而提高系统的控制性能。模糊逻辑是一种基于模糊集合和模糊规则的推理方法, 可以处理不确定性或非精确性的信息, 适用于复杂的非线性系统。然而, 模糊 PID 控制器的量化因子、比例因子、模糊规则库和隶属度函数等参数的选取依赖专家经验或试验数据, 缺乏普适性。因此, 开展模糊 PID 控制器的参数优化研究具有重要意义。

目前, 模糊 PID 控制器参数优化的相关研究已取得一定进展。文献[1]采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 优化模糊 PID 控制器的量化因子和比例因子, 有效提升了系统的控制性能。文献[2]提出基于 GA 的模糊控制规则表优化方法, 为模糊 PID 控制提供了一种更方便、有效的查表法。文献[3]通过粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法寻优模糊 PID 控制器的 3 个尺度系数 (K_e 、 K_{ec} 、 K_u), 改变不同阶段系统误差和误差变化率的权重, 从而提高了系统的控制性能。文献[4]提出一种改进的自适应 PSO 算法, 通过引入自适应惯性权重、学习因子, 以及动态调整

种群规模，提高 PSO 算法的收敛速度和寻优能力，从而优化模糊 PID 控制器参数。虽然 GA 和 PSO 算法已成功应用于模糊 PID 控制器，但 GA 的收敛速度较慢，PSO 算法易陷入局部最优，导致模糊 PID 控制器参数的优化效果欠佳。而灰狼优化 (grey wolf optimization, GWO) 算法具有全局搜索能力强和收敛速度快等特点，适用于求解模糊 PID 控制器参数。

本文设计一个基于 GWO 算法的模糊 PID 控制器。首先，根据系统误差及误差变化率构建模糊规则和隶属函数；然后，利用 GWO 算法不断优化模糊 PID 控制器的量化因子和比例因子，得到优化后的模糊 PID 控制器；最后，将 GWO 算法优化后的模糊 PID 控制器应用于球杆系统，有效提升了系统的动态响应速度与稳态性能。

1 模糊 PID 控制器的设计

经典的模糊 PID 控制器由 PID 控制器、模糊控制器 2 部分组成，其组成框图如图 1 所示。其中， $e(t)$ 表示系统误差； $u(t)$ 表示 PID 控制器的输出； e 、 ec 为模糊控制器的两个基本输入量，分别表示系统输出与输入的差值 (误差 e) 和对误差 e 进行时间微分的误差变化率 (ec)。

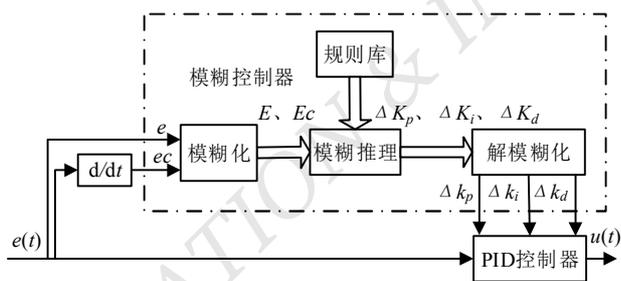


图 1 模糊 PID 控制器组成框图

首先，对 e 、 ec 进行模糊化处理，得到输入模糊变量 E 和 Ec ；将输入模糊变量 E 和 Ec 分别划分为 7 个模糊集合，即 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}，分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。这些模糊集合的隶属度函数均采用三角函数。

然后，根据球杆系统的数学模型并结合专家经验，采用 49 条模糊规则描述输入模糊变量 E 、 Ec 与输出

模糊变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 之间的关系^[6]。输出模糊变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 也分别被划分为 7 个模糊集合，即 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}。

最后，采用重心法对模糊输出进行解模糊化，得到比例 P 、积分 I 、微分 D 的修正值 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ，从而进行 PID 控制器参数的调整^[5]。

模糊集合的隶属度表如表 1 所示， ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则表分别如表 2、3、4 所示。

表 1 E 、 Ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度表

模糊集合	-3	-2	-1	0	1	2	3
NB	1	0	0	0	0	0	0
NM	0	1	0	0	0	0	0
NS	0	0	1	0	0	0	0
ZO	0	0	0	1	0	0	0
PS	0	0	0	0	1	0	0
PM	0	0	0	0	0	1	0
PB	0	0	0	0	0	0	1

表 2 ΔK_p 的模糊规则表

E	Ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NM	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NS	PM	PS	PS	ZO	PS	PM	PM
ZO	PM	PS	PS	ZO	PS	PM	PM
PS	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
PM	PB	PB	PM	PM	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_i 的模糊规则表

E	Ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS	NS	NM	NM	NM	NS	NS
NM	NS	NS	NM	NM	NM	NS	NS
NS	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
ZO	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
PS	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
PM	NS	NS	NM	NM	NM	NS	NS
PB	NS	NS	NM	NM	NM	NS	NS

表 4 ΔK_d 的模糊规则表

E	E_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NM	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
NS	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
ZO	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PM	PB	PM	PS	PS	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB

2 GWO 算法优化模糊 PID 控制器

2.1 GWO 算法

GWO 算法模拟了自然界中狼群的领导阶层和狩猎机制，是一种基于群体的元启发式算法^[7-10]。GWO 算法的流程图如图 2 所示。

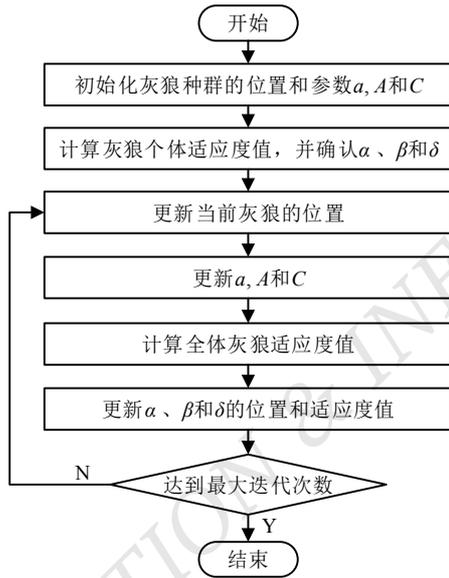


图 2 GWO 算法的流程图

GWO 算法的主要流程如下:

- 1) 在搜索空间随机生成一定数量的灰狼个体;
- 2) 依据模糊 PID 控制器中量化因子和比例因子的适应度值, 将解分为 α 、 β 、 δ 和 ω 四种等级, 分别代表最优、次优、第三优及其他潜在解;

- 3) 利用 α 、 β 和 δ 灰狼的位置指导其他灰狼的位置更新, 以模拟狼群跟踪、包围和攻击猎物的过程。 α 、 β 和 δ 灰狼对猎物的包围由公式(1)模拟:

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (1)$$

式中: \bar{D} 为其他灰狼到领导灰狼的距离, \bar{C} 为位置权重, $\bar{X}_p(t)$ 为猎物位置, $\bar{X}(t)$ 为当前狼群中 ω 灰狼的位置。

在每次迭代过程中, ω 灰狼的位置根据公式(2)进行更新:

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (2)$$

式中: $\bar{X}(t+1)$ 为 ω 灰狼更新后的位置, t 为当前的迭代次数, \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 、 \bar{X}_3 分别为 α 、 β 和 δ 灰狼前进的步长和方向, 计算公式为

$$\begin{cases} \bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\alpha \\ \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta \\ \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: \bar{X}_α 、 \bar{X}_β 、 \bar{X}_δ 分别为 α 、 β 和 δ 灰狼的位置, \bar{A}_1 、 \bar{A}_2 、 \bar{A}_3 为系数向量, \bar{D}_α 、 \bar{D}_β 、 \bar{D}_δ 分别为 α 、 β 和 δ 灰狼与 ω 灰狼之间的距离, 计算公式为

$$\begin{cases} \bar{D}_\alpha = \left| \bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}(t) \right| \\ \bar{D}_\beta = \left| \bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}(t) \right| \\ \bar{D}_\delta = \left| \bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}(t) \right| \end{cases} \quad (4)$$

式中: \bar{C}_1 、 \bar{C}_2 、 \bar{C}_3 为随机向量。

\bar{A} 、 \bar{C} 决定了灰狼的搜索行为。当 $|A| < 1$ 时, 灰狼向猎物逼近; 当 $|A| > 1$ 时, 灰狼远离猎物, 寻找更好的猎物。 \bar{C} 表示灰狼所在位置对猎物影响的随机权重, 有助于增强算法的全局搜索能力。 \bar{A} 、 \bar{C} 的计算公式分别为

$$\bar{A}(t) = 2\bar{a}(t) \cdot \bar{r}_1 - \bar{a}(t) \quad (5)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r}_2 \quad (6)$$

式中: \bar{a} 为收敛因子, 随着迭代次数从 2 线性减小到 0; \bar{r}_1 和 \bar{r}_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

2.2 量化因子和比例因子的优化

量化因子和比例因子是模糊 PID 控制器的重要参数, 不仅决定了模糊 PID 控制器的输入输出关系,

还影响系统的稳定性和响应速度。其中，量化因子将模糊 PID 控制器的模糊输入变量转换成模糊集中的语言值；比例因子调整模糊 PID 控制器的输出，使其适应被控对象的控制量范围。

本文通过 GWO 算法寻找模糊 PID 控制器的最优量化因子 (k_e 、 k_{ec}) 和比例因子 (k_{kp} 、 k_{ki} 、 k_{kd})。

首先，生成 5 维向量的 10 组种群个体，并设定最大迭代次数为 50 次。

然后，将时间乘以误差绝对值积分 (integrated time and absolute error, ITAE) 作为 GWO 算法的适应度函数。ITAE 值越小，表明系统控制性能越好。通过计算每个种群个体的 ITAE 并按从小到大排序，确定最优解、次优解、第三优解、其他潜在解。ITAE 计算公式为

$$E_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (7)$$

接着，GWO 算法生成新一代的种群个体，重复

此过程直至达到设定的最大迭代次数。

最后，通过 GWO 算法迭代选出最优的 α 个体，其中包含的量化因子和比例因子即为模糊 PID 控制器的最优参数。

3 仿真实验与结果分析

3.1 系统模型的建立

利用球杆系统验证模糊 PID 控制器的控制性能。球杆系统是一个非线性不稳定的物理装置，可模拟大部分非线性不稳定的系统^[11-12]，其传递函数为

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{\theta(s)} = \frac{55}{70s^2} \quad (8)$$

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建模糊 PID 控制系统模型并进行仿真实验。模糊 PID 控制系统模型由性能评估、算法优化、模糊推理、PID 控制器、球杆模型 5 种模块组成，如图 3 所示。

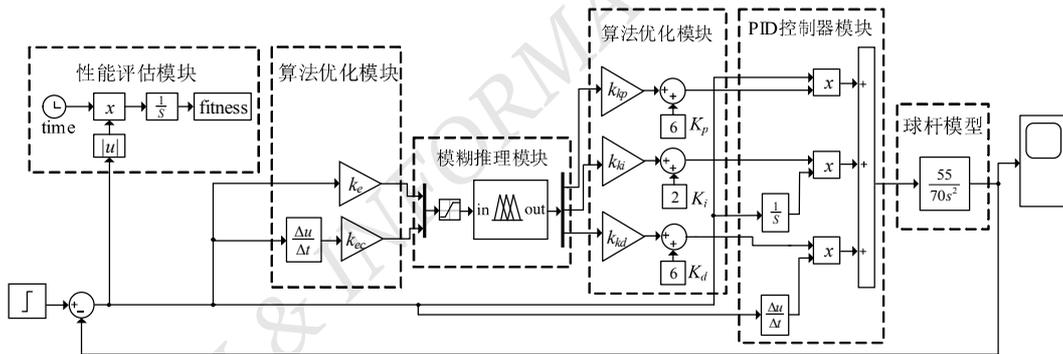


图 3 模糊 PID 控制系统模型

通过球杆系统的阶跃响应评估模糊 PID 控制器的控制性能。实验中，系统的响应时间为 100 s，小球稳定的期望位置为 0.1 m，初始 PID 控制参数分别为 $k_p = 6$ 、 $k_i = 2$ 、 $k_d = 6$ 。

3.2 模糊 PID 控制器优化前、后控制性能对比

将 GWO 算法优化的模糊 PID 控制器 (GWO_FuzzyPID 控制器) 与传统 FuzzyPID 控制器进行对比实验。优化前后的模糊 PID 控制器阶跃响应如图 4、5 所示。

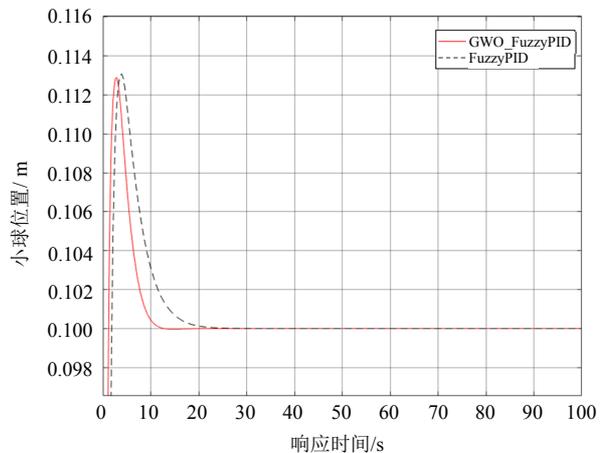


图 4 GWO 算法优化前后的模糊 PID 控制器阶跃响应

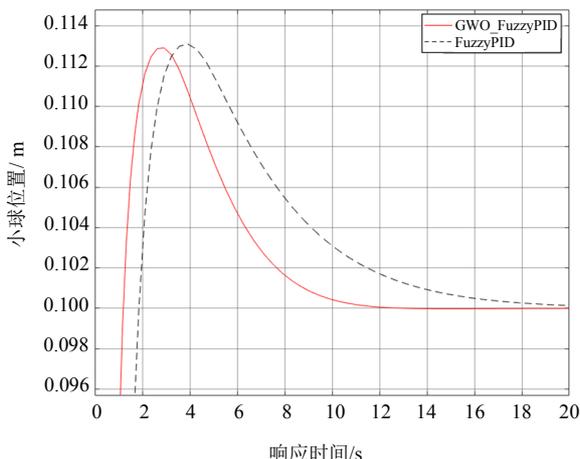


图5 GWO算法优化前后的模糊PID控制器阶跃响应细节

本文选取响应时间 (t_r)、超调量 ($\delta\%$)、调节时间 (t_s) 3 个性能指标, 评估模糊 PID 控制器优化前后的性能。模糊 PID 控制器优化前后性能指标如表 5 所示。

表 5 模糊 PID 控制器优化前后性能指标

模糊 PID 控制器	t_r/s	$\delta/\%$	t_s/s
GWO_FuzzyPID	1.244	12.9	7.775
FuzzyPID	1.886	13.1	11.564

由表 5 可知: 经 GWO 算法优化后, 响应时间减少了 0.642 s, 表明优化后的模糊 PID 控制器能更快地响应系统变化; 超调量减少了 0.2%, 表明优化后的模糊 PID 控制器提升了系统的稳定性; 调节时间减少了 3.789 s, 表明优化后的模糊 PID 控制器能更快地达到稳定状态。

3.3 不同优化算法的模糊 PID 控制器控制性能对比

本文将 GWO_FuzzyPID 控制器与分别采用 PSO 算法、GA 优化的模糊 PID 控制器 (PSO_FuzzyPID 控制器、GA_FuzzyPID 控制器) 进行对比实验。GWO、PSO 和 GA 3 优化种算法的适应度值随迭代次数的变化曲线图如图 6 所示^[13-14]。

由图 6 可知: 在优化算法迭代前期, PSO 算法的收敛速度虽然比 GWO 算法快, 但存在过早陷入局部

最优解的问题, 且最优解弱于 GA 和 GWO 算法, 全局最优解的搜索能力有限; GA 的收敛速度和搜索全局最优解的能力略逊于 GWO 算法; GWO 算法的收敛速度与搜索最优解的能力相比 GA 和 PSO 算法均更具优势。

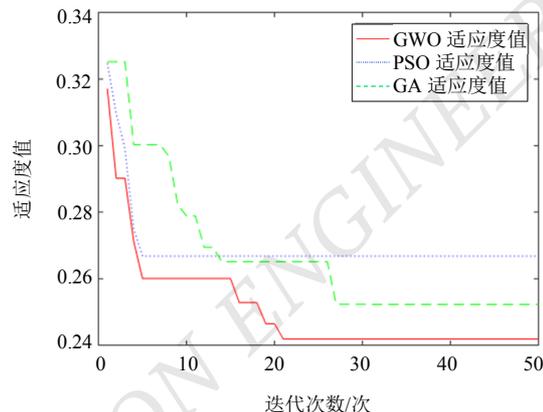


图 6 GWO、PSO 和 GA 3 种优化算法的适应度值变化

3.4 控制性能对比

本文分别采用 GWO、PSO、GA 3 种优化算法对模糊 PID 控制器的参数进行优化。种群数量设定为 10, 最大迭代次数设定为 50 次, 分别进行 30 次实验, 取中位值, 得到 GWO_FuzzyPID、PSO_FuzzyPID 和 GA_FuzzyPID 3 种模糊 PID 控制器。对这 3 种模糊 PID 控制器分别进行仿真实验, 结果及其细节如图 7、8 所示。

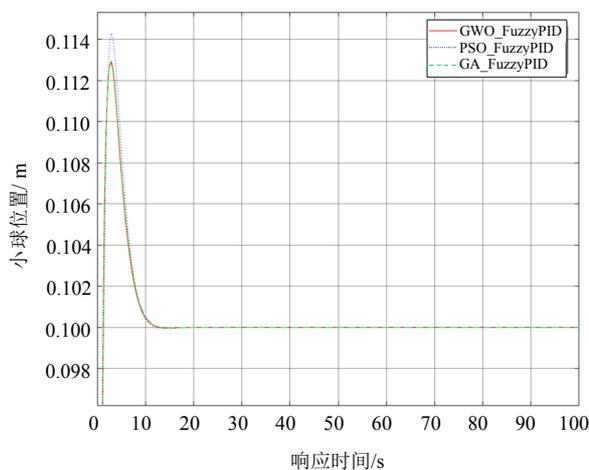


图 7 3 种模糊 PID 控制器的阶跃响应

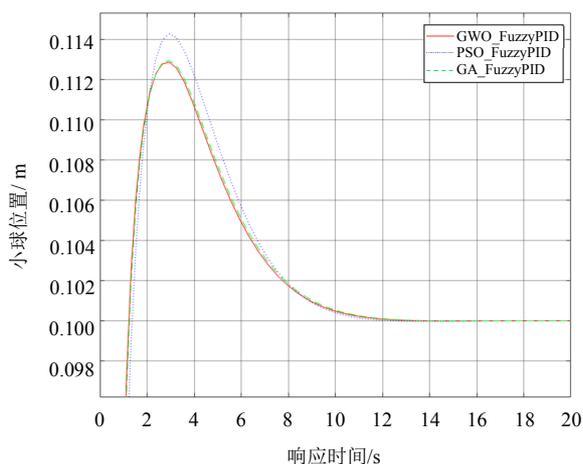


图 8 3 种模糊 PID 控制器的阶跃响应细节对比

本文选取响应时间 (t_r)、超调量 ($\delta\%$)、调节时间 (t_s) 和时间乘以误差绝对值积分 (ITAE) 4 个性能指标, 评估 3 种模糊 PID 控制器控制非线性对象的性能, 实验结果如表 6 所示。

表 6 3 种模糊 PID 控制器的性能指标

模糊 PID 控制器	t_r/s	$\delta/\%$	t_s/s	ITAE
GWO_FuzzyPID	1.244	12.9	7.775	0.241
PSO_FuzzyPID	1.382	14.3	7.964	0.266
GA_FuzzyPID	1.300	13.5	7.944	0.252

由表 6 可以看出: GWO_FuzzyPID 控制器的响应时间比其他控制器快, 说明系统能够更快地达到期望状态; 超调量比其他控制器低, 说明系统在达到期望状态后的波动更小; 调节时间比其他控制器短, 说明系统能够更快地达到稳定状态; 其 ITAE 值比其他控制器低, 说明系统的稳定性和精确性较高。

4 结论

针对模糊 PID 控制器的参数设计依赖专家经验或试验数据的问题, 本文利用 GWO 算法进行模糊 PID 控制器的参数优化, 并通过球杆系统进行实验验证。实验结果表明, GWO_FuzzyPID 控制器相较于 FuzzyPID 控制器、PSO_FuzzyPID 控制器、GA_FuzzyPID 控制器, 具有更快的响应时间、更低的超调量、更短的调节时间, 表明系统的动态响应、稳定性及控制精度均较高。为了进一步提升模糊 PID 控制器

的性能, 未来可进一步搜索在线自适应调节策略和混合优化算法, 旨在降低对先验信息的依赖, 并提升参数优化的自动化和全局搜索能力。同时, 通过在更复杂和多变的系统中进行实验验证, 检验控制器在不同应用场景下的鲁棒性和适用性, 从而推动其在实际工程中更广泛的应用。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 佟威,李学,李勤宇.一种遗传算法优化模糊 PID 控制器的设计与仿真[J].无线互联科技,2015(6):137-138.
- [2] 杨玺.基于遗传算法的模糊控制器规则优化[J].电气传动自动化,2010,32(5):41-44.
- [3] 杨洋,张秋菊.粒子群算法自寻优模糊 PID 控制器设计[J].机械制造与自动化,2018,47(3):201-204.
- [4] 孙超,郭乃宇,严明蝶,等.改进自适应粒子群算法的 PID 参数优化[J].中国工程机械学报,2023,21(5):377-382.
- [5] TANG K S, MAN K F, CHEN G, et al. An optimal fuzzy PID controller[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2001, 48(4):757-765.
- [6] 左婷.模糊 PID 控制中模糊控制规则的获取方法[D].长春:东北师范大学,2010.
- [7] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in engineering software, 2014,69:46-61.
- [8] 张晓凤,王秀英.灰狼优化算法研究综述[J].计算机科学,2019, 46(3):30-38.
- [9] 邓飞,魏伟璇,刘奕巧,等.灰狼优化算法的改进及其应用[J].统计与决策,2023,39(11):18-24.
- [10] Negi G, Kumar A, Pant S, et al. GWO: A review and applications[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2021,12:1-8.
- [11] 张佳,辛斌,郑荣钦.球杆系统动态仿真实验平台的构建与实现[J].实验技术与管理,2019,36(7):120-123;128.
- [12] 姜海燕.球杆系统的 PID 控制方法研究[J].河南科学,2019, 37(3):343-348.
- [13] 殷齐森,于源华,宫平.基于粒子群模糊 PID 的 PCR 温度控制系统[J].长春理工大学学报(自然科学版),2023,46(6):89-96.
- [14] 陈月婷,马晓,王飞,等.基于遗传算法优化的模糊 PID 恒温水浴控制系统[J].上海计量测试,2023,50(5):5-7;10.

作者简介:

胡智勇, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 模糊控制。E-mail: hzy0203@hynu.edu.cn

龙祖强, 男, 1974 年生, 博士研究生, 教授, 主要研究方向: 模糊系统与模糊控制。

古嘉盈, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 模糊控制。

孙柯, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 模糊控制。

《自动化与信息工程》征稿启事

《自动化与信息工程》(原《广东自动化与信息工程》) 期刊由广东省科学院智能制造研究所、广州市自动化学会联合主办。国内统一连续出版物号 CN 44-1632/TP; 国际标准连续出版物号 ISSN 1674-2605。国内外公开发行人, 面向各行业及广大自动化与信息用户, 欢迎踊跃来稿。

一、稿件要求:

1. 投稿论文未公开发表过。

2. 投稿论文论点明确, 论述充分, 语言通顺, 文字简练, 图表清晰。

3. 投稿论文格式与要求: 文章题目、作者姓名、作者单位、摘要(不超过 200 字)、关键词(3~8 个)、正文、参考文献; 英文的题目、单位、摘要、关键词; 作者简介。

1). 文中图和表格: 须标有图号、图题和表序、表题, 所用字符为六号或小五号宋体, 图的宽度限制在 8 cm 或 16 cm 以内, 随文排入。

2). 参考文献(公开出版物)按文中出现的先后次序排列, 书写格式参考 GB7714-2015《信息与文献 参考文献著录规则》。

3). 稿中非标准缩写词(中文或英文)须在首次出现时定义清楚。外文字母必须分清大小写, 正、斜体, 上、下角; 容易混淆的外字母及符号, 要特别注意标清。

4). 计量单位一律采用法定计量单位, 名词术语必须规范化、标准化, 且前后一致。

5). 文末附作者简介, 内容包括: 姓名、性别、出生年月、学位、职称。主要研究领域及 E-mail 地址。

6). 投稿论文一般不少于 5000 字(包括图表), 综述一般不少于 8000 字(包括图表)。要求: Word 格式的电子文档。

7). 来稿请注明: 邮编、详细通信地址及联系电话。

4. 投稿方式: 请发电子邮件到邮箱: aie@giim.ac.cn。

二、说明:

1. 本刊原则上只收原始性稿件。已在国内外学术会议上发表或准备发表的文章必须如实说明, 酌情刊登。

2. 作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责。

3. 编辑部收到投稿后及时通知作者。来稿若不符合本刊稿约, 先退给作者修改后再审稿。

4. 编辑部有权对来稿进行修改或删节。稿件一经采用, 赠送当期期刊 3 本。

5. 本刊通信地址: 广州市越秀区先烈中路 100 号大院 13 号楼 716 室, 邮编: 510070。

《自动化与信息工程》编辑部