



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404575

引用格式:严超,张辉,常鑫,等.基于改进淘金优化算法的多层模糊嵌套PID温控技术[J].科学技术与工程,2025,25(15):6397-6409.

Yan Chao, Zhang Hui, Chang Xin, et al. Multilayer fuzzy nested PID temperature control technology based on improved gold rush optimizer [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6397-6409.

自动化技术、计算机技术

## 基于改进淘金优化算法的多层模糊嵌套 PID 温控技术

严超<sup>1</sup>, 张辉<sup>1\*</sup>, 常鑫<sup>2</sup>, 高鹏<sup>2</sup>, 付乐<sup>1</sup>, 唐明章<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学机械工程学院, 镇江 212100; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要** 针对高精高速高效温度控制由于多点测温和非对称加热工况而带来的难题,提出 IGRO-PID(improved gold rush optimizer-proportional integral derivative)和多层模糊嵌套算法串级结合的新型温控算法(IGRO-FuzzyN-PID)。仿真验证 IGRO 算法在 PID 控制系统中优于 CPO (crested porcupine optimizer)、IPSO(improved particle swarm optimization)、COA(crayfish optimization algorithm)、GA(genetic algorithm)算法。仿真和实验验证 IGRO-FuzzyN-PID 算法较单一 IGRO-PID 算法,在输入输出对称和非对称工况下的超调量、稳态误差、平均误差提升 70.91%、70.69%、82.35% 和 86.89%、76.23%、86.56%。结果证明 IGRO-FuzzyN-PID 在输入输出对称和非对称工况下满足高精高速高效的控制需求。

**关键词** 温度控制;改进淘金优化算法;多层模糊嵌套;输入输出非对称

中图分类号 TP181;

文献标志码 A

### Multilayer Fuzzy Nested PID Temperature Control Technology Based on Improved Gold Rush Optimizer

YAN Chao<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1\*</sup>, CHANG Xin<sup>2</sup>, GAO Peng<sup>2</sup>, FU Le<sup>1</sup>, TANG Ming-zhang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;  
2. Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100094, China)

**[Abstract]** Aiming at the problem of high-precision, high-speed and efficient temperature control caused by multi-point measurement and asymmetric heating condition of input and output, a new algorithm (IGRO-FuzzyN-PID) based on IGRO-PID and multi-layer fuzzy nested algorithm was proposed. Simulation results show that IGRO algorithm is superior to CPO (crested porcupine optimizer)、IPSO (improved particle swarm optimization)、COA(crayfish optimization algorithm)、GA(genetic algorithm) in PID control system. Simulation and experimental results show that compared with the IGRO-PID algorithm, the overshoot, steady-state error and average error of the IGRO-FuzzyN-PID algorithm are optimally increased by 70.91%, 70.69%, 82.35% and 86.89%, 76.23%, 86.56% under symmetric and asymmetric input and output conditions. It is proved that the proposed algorithm meets the control requirements of high precision, high speed and high efficiency under symmetric and asymmetric input and output conditions.

**[Keywords]** temperature control; improved gold rush optimizer; multilayer fuzzy nested; asymmetric input-output

温度控制在航天航空、工业生产、医疗器械等领域具有重要研究意义。为了保证设备正常作业、延长其使用寿命,现阶段对温控系统有高精高速高效、智能自动化、精简可靠等性能要求<sup>[1]</sup>。

为了满足温控系统性能要求,多采用多点测温 and 加热方式,导致控制难度和成本随之提高。上述

温控系统从输入输出关系分类主要有输入输出对称和非对称工况两种工况<sup>[2]</sup>,前者以精度为重点,特征为单程控电源功率匹配单热电偶,后者以成本为重点,特征为单程控电源功率匹配多热电偶。

基于现阶段温控系统性能要求以及工况,亟需提出一种新型温控算法来面对这些棘手的难题。

收稿日期:2024-06-19 修订日期:2024-10-29

基金项目:江苏省产学研合作项目(BY20221435)

第一作者:严超(1998—),男,汉族,安徽合肥人,硕士研究生。研究方向:航天器温度控制。E-mail:yanchao08123@163.com。

\*通信作者:张辉(1981—),男,汉族,江苏镇江人,博士,副教授。研究方向:航天器温度控制、智能制造。E-mail:zimmerman@126.com。

PID (proportional integral derivative) 控制在要求控制系统简单而实时性较高的场景中表现良好<sup>[3]</sup>。近些年国内外对 PID 控制器参数整定方法包括: Z-N 法 (Ziegler-Nichols 方法)<sup>[4]</sup>、模糊 PID 控制、群智能优化算法等。赵亮等<sup>[5]</sup>将模糊 PID 控制运用于硬胶囊生产线风干区域, 风干区温度控制可以达到  $(40 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ ; 张玉雪等<sup>[6]</sup>将模糊 PID 控制和中药提取罐温控相结合, 取得可观的控制效果; Chang 等<sup>[7]</sup>将模糊 PID 控制应用于空间锂离子电池组温度控制中, 最优温度范围可达到  $15 \sim 35 ^\circ\text{C}$ , 最大温差  $1.7 ^\circ\text{C}$ ; 李志清等<sup>[8]</sup>采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 来寻优空气悬架系统的 PID 参数, 优化空气悬架性能, 改善车辆的平顺性与舒适性; Kruthika 等<sup>[9]</sup>将粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 应用于动力锅炉的 PID 参数整定, 能够有效优化 PID 控制参数; 卢艳军等<sup>[10]</sup>将改进粒子群算法 (improved particle swarm optimization, IPSO) 与 PID 相结合, 运用于小型旋翼无人机飞控中, 实验证明算法具有良好的动态性能, 减少参数整定的时间; 谈聪等<sup>[11]</sup>针对恒温差热式流量计, 利用人群搜索算法 (seeker optimization algorithm, SOA) 自整定 PID 系统, 控制方法不仅扩展系统的应用范围, 而且提高了系统的稳定性。

针对 PID 温控系统中参数寻优问题, 群智能优化算法展现出其优势。将基于淘金优化算法 (gold rush optimizer, GRO)<sup>[12]</sup> 的改进算法 IGRO (improved GRO), 引入 PID 控制系统中, 相较于其他群智能优化算法, IGRO 算法展现出其卓越的性能。后续针对系统存在干扰信号和适用范围窄等

问题<sup>[13]</sup>, 又以模糊控制理论为核心, 提出基于 IGRO 的多层模糊嵌套 PID 算法 (IGRO-FuzzyN-PID)。

现以高精高速高效温控需求和输入输出对称和非对称工况而带来的难题为研究点和出发点。提出 IGRO-FuzzyN-PID 算法, 在输入输出对称和非对称工况下, 展现出优秀的控制性能, 满足高精高速高效、智能自动化、精简可靠等性能要求。

## 1 温控实验验证平台

### 1.1 平台设备和实验工况

图 1 所示为本文中采用的温控实验验证平台, 主要硬件设备包括: 程控电源 (Aglient N5750A)、万用表 (Keysight 34465A)、数据采集多路复用器 (Keysight I4421A)、数据交换机 (TL-SG1024T)、温控处理中心 (Windows 7)、加热器 (PI 电加热片)、测温器 (K 型热电偶)。

图 2 所示为温控验证实验的流程图, 实验主要有两种工况: ①输入输出对称工况, 即单程控电源匹配单测温点, 例如在 T1 ~ T4 点处, 各自匹配一个加热片、热电偶和程控电源, 可以理解为各点拥有各自的程控电源和热电偶。该工况以温控精度为出发点, 控制结构单一, 控制难度较低; ②输入输出非对称工况, 即单程控电源匹配多测温点, 例如在 T1 和 T2 点处, 各自匹配一个加热片和热电偶, 但由一台程控电源控制该两点对应的两个加热片功率, 且两加热片功率相同。该工况以温控成本为出发点, 控制结构复杂, 涉及多点融合的控制指标, 控制难度较大。

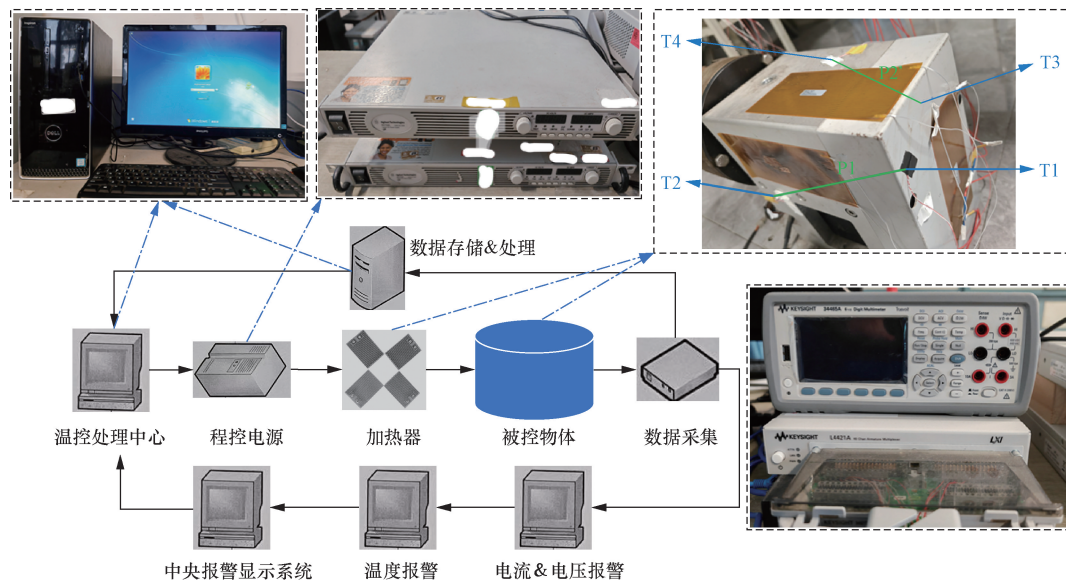


图 1 温控实验验证平台

Fig. 1 Temperature control experiment verification platform

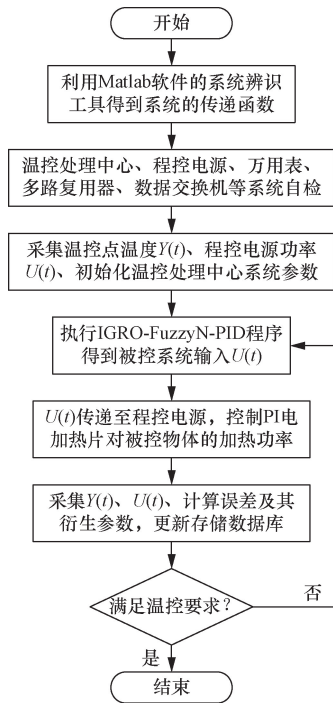


图2 温控实验流程图

Fig. 2 Temperature control experiment flow chart

1.2 数学模型构建

温控对象通常是动态且非线性的,这使得系统建模和控制变得更加复杂,因为温度的变化可能受到多个影响因素的影响,环境条件、外部扰动和系统参数的变化都可能引入不确定性<sup>[14]</sup>。

预设温控系统位于地面常温环境,被控对象为非相变材料。在升温和恒温过程中该系统的总热力学能增量等于其吸收和释放的热量之和。表达式为

$$Q = MC \frac{d(T - T_0)}{dt} + AH(T - T_0) \quad (1)$$

式(1)中:  $Q$  为系统总热能, J;  $M$  为温控对象总质量, kg;  $C$  为温控对象平均比热容, J/(kg·K);  $T$  为温控设备的当前温度, K;  $T_0$  为温控对象的初始温度, K;  $A$  为温控对象和环境之间接触的传热面积, m<sup>2</sup>;  $H$  为被控设备和环境之间的传热系数, J/(m<sup>2</sup>·K)。

在系统稳态下,加热功率和电压的关系为

$$Q = \frac{U^2}{R} = L(U - U_0) \quad (2)$$

式(2)中:  $L$  为线性系数<sup>[15]</sup>;  $U$  为当前电压;  $R$  为电阻;  $U_0$  为初始电压。联立式(1)、式(2),并进行拉氏变换后得到

$$\lambda sT(s) + T(s) = KU(s) \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{U(s)} = \frac{K}{\lambda s + 1} \quad (4)$$

式中:  $K$  为系统的增益系数;  $\lambda$  为系统的时间常数;  $s$  为复变量;  $G(s)$  为传递函数。对于图 1 所示被控

对象中的 4 个温控点满足式(4)所示的一阶传递函数模型。

1.3 基于 MATLAB 软件的系统辨识

通过 MATLAB 软件的系统辨识工具,将实验采集到的数据代入训练可以得到 T1 ~ T4 温控点所对应的传递函数为

$$Tf_1 = \frac{0.000\ 678\ 6}{s + 0.001\ 524} \quad (5)$$

$$Tf_2 = \frac{0.000\ 164\ 4}{s + 0.000\ 399\ 4} \quad (6)$$

$$Tf_3 = \frac{0.000\ 129\ 5}{s + 0.000\ 267\ 5} \quad (7)$$

$$Tf_4 = \frac{0.000\ 143\ 6}{s + 0.000\ 285} \quad (8)$$

得到被控系统的传递函数,可以由 IGRO 算法进行寻优,找出温控系统的最优 PID 初值,供后续仿真和实验参考。

2 IGRO-PID 融合算法

2.1 PID 控制

$$U = K_p e + K_i \sum e + K_d \left(\frac{de}{dt}\right) \quad (9)$$

式(9)中:  $U$  为控制器的输出;  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为比例、积分、微分系数;  $e$  为误差,  $\sum e$  为误差的积累;  $de/dt$  为误差的变化率<sup>[16]</sup>。

2.2 改进淘金优化算法(IGRO)

这一算法的提出受到淘金者在黄金挖掘中的行为习惯启发。淘金者的位置信息存储在位置矩阵中,位置对应的适应度值存储在适应度矩阵中,分别对应 PID3 个参数及其相对应的适应度值。设  $f$  为评估函数,评判标准不仅要考虑到系统输出的高精高速高效,也要考虑到输入的平稳,综合考虑控制要求和系统稳定<sup>[17]</sup>,制定适应度值评判标准,表达式为

$$\begin{cases} f_1 = 200B + \int_0^T [0.999e(t) + 0.001U^2(t)] dt, & e(t) \geq 0 \\ f_2 = 200B + \int_0^T [2.999|e(t)| + 0.001U^2(t)] dt, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中:  $B$  为输出第一次达到(1,95,2.05)的时间,其对应控制算法的高速标准;  $U(t)$  为系统的输入;  $e(t)$  为系统与期望信号之间的误差,其对应算法的高精高效标准。

淘金者位置在初始化时,本文中随机数初始方式改进为 Sine 混沌映射方式<sup>[18]</sup>,可以提升初始种群的随机性和多样性,从而提升算法性能。表达式为

$$X_{n+1} = a \sin(\pi X_n), \quad 0 < a \leq 1 \quad (11)$$

式(11)中:  $a = 0.99$ 。

淘金者会通过迁移、挖掘、协作3种方式进行淘金位置的迭代寻优更新,本文中主要对挖掘过程中进行改进,其他部分见参考文献[12]。淘金者的挖掘过程,如图3所示,数学表达式为

$$D_2 = P_n(t) - P_r(t) \quad (12)$$

$$P_{new,n}(t+1) = P_r(t) + A_2 D_2 \quad (13)$$

$$f[P_r(t)] > Kf[P_{new,n}(t+1)] \quad (14)$$

$$A_2 = 2L_2 r_1 + L_2 E \quad (15)$$

式中:  $K$  为参考系数,初始值为1;  $P_r(t)$ 、 $P_n(t)$ 、 $P_{new,n}(t+1)$  分别表示随机选择的参考淘金者  $r$  的位置、淘金者  $n$  的位置、当前迭代次数和淘金者  $n$  的新位置;  $t$  为当前迭代次数;  $f(\cdot)$  为当前粒子的适应度值;  $A_2$  为矢量系数;  $L_2$  为收敛分量;  $r_1$  为  $[0,1]$  范围内的随机向量;  $E$  为单位向量。

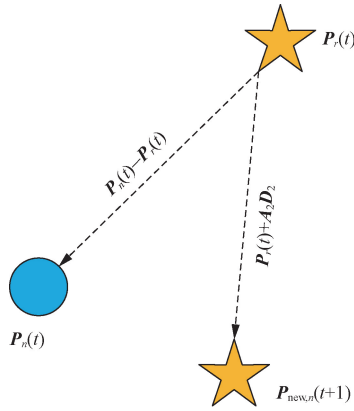


图3 挖掘过程示意图

Fig. 3 Mining process diagram

以下是 IGRO 主要改进点:①适应度值评价函数评价标准优化式 10,从实际工程背景出发,满足现阶段温度控制需求;②新增挖掘过程中  $P_r(t)$  的选定规则式(14),根据  $K$  选定拥有不同程度适应度值的参考淘金者,提升算法的寻优能力。

### 2.3 IGRO-PID 算法原理和流程

将 IGRO 算法引入传统 PID 控制系统,对 PID 的 3 个参数进行迭代寻优,最后得到最优解,基于 IGRO 的 PID 控制算法的原理如图 4 所示。IGRO-PID 融合算法的流程如图 5 所示。

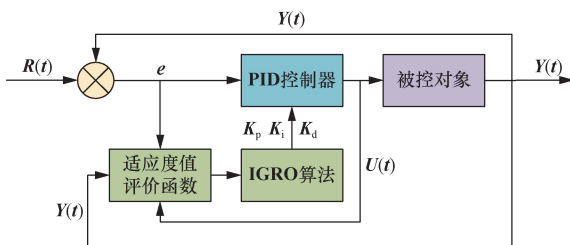


图4 IGRO-PID 原理图

Fig. 4 IGRO-PID schematic diagram

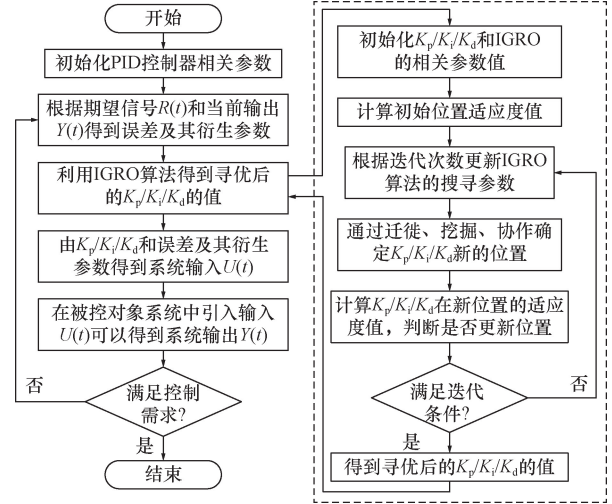


图5 IGRO-PID 流程图

Fig. 5 Flowchart of IGRO-PID

(1) 初始化 PID 控制器中的参数。

(2) 根据期望信号  $R(t)$  和输出信号  $Y(t)$  来计算误差  $e$  及其衍生参数。

(3) 进入 IGRO 算法,初始化  $K_p/K_i/K_d$  所在的位置和范围以及算法相关参数。

(4) 计算初始位置的适应度值,每次迭代中根据迭代次数等参数更新算法搜寻半径参数。

(5)  $K_p/K_i/K_d$  3 个参数在每次迭代中使用迁徙、挖掘和协作方法中的一种来获取新值。

(6) 根据新值计算其所对应的适应度值,并进行判断,如果新值的适应度值优于旧值,则更新,否则保持。

(7) 该过程继续进行直到迭代循环结束或满足最优解判定要求输出,循环以上步骤直到控制结束,得到最优的  $K_p/K_i/K_d$  值。

(8) 由步骤(7)计算的最优值、误差  $e$  及其衍生参数利用式(9)得到系统输入  $U(t)$ 。

(9) 将输入  $U(t)$  引入被控系统中,得到输出  $Y(t)$ ,最后将  $Y(t)$  反馈至步骤(2),形成控制闭环。

(10) 重复以上步骤直到满足控制要求,控制结束。

### 2.4 IGRO-PID 算法仿真分析

#### 2.4.1 IGRO 性能分析

以 CEC2022 测试集<sup>[12]</sup>为标准,将 IGRO 算法与淘金优化算法 GRO<sup>[12]</sup>、冠豪猪优化算法(crested porcupine optimizer, CPO)<sup>[19]</sup>、黑翅鸢优化算法(black-winged kite algorithm, BKA)<sup>[20]</sup>、鹅优化算法(goose algorithm, GOOSE)<sup>[21]</sup>、吸引排斥优化算法(attraction-repulsion optimization algorithm, AROA)<sup>[22]</sup>、小龙虾优化算法(crayfish optimization algorithm, COA)<sup>[23]</sup>和经典优化算法 SOA<sup>[11]</sup>、IPSO<sup>[10]</sup>、GA<sup>[8]</sup>进行对比。

相关算法的主要参数如表 1 所示。

表 1 相关算法主要参数详情

**Table 1 Details of key parameters of related algorithms**

算法	参数		
IGRO	$\sigma = 2$		
GRO	(探矿半径)		
CPO	$T = 2$	$\alpha = 0.2$	$T_f = 0.8$
	(循环数)	(收敛因子)	(防御权重)
BKA	$p = 0.9$		
	(攻击权重)		
GOOSE	$md = 0.5$	$pro = 0.2$	$S_w = 12$
	(切换权重)	(选择因子)	(重量因子)
	$c = 0.95$	$fr_1 = 0.15$	$fr_2 = 0.6$
AROA	(步长)	(布朗因子)	(增益因子)
	$p_1 = 0.2$	$p_2 = 0.8$	$Ef = 0.4$
	(概率值 1)	(开关因子)	(概率值 2)
	$tr_1 = 0.9$	$tr_2 = 0.85$	$tr_3 = 0.9$
COA	(阈值 1)	(阈值 2)	(阈值 3)
	$temp = 30$	$C_3 = 2$	$rand = 0.5$
	(环境温度)	(食物因子)	(切换权重)
SOA	$U_{max} = 0.95$	$U_{min} = 0.011$	$W_{max} = 0.9$
	(隶属上限)	(隶属下限)	(惯性上限)
	$V_{max} = 6$	$c_1 = 1$	$c_2 = 2$
IPSO	(速度因子)	(学习值 1)	(学习值 2)
	$w_{max} = 0.9$	$w_{min} = 0.6$	
	(惯性上限)	(惯性下限)	
GA	$p_c = 0.8$	$p_m = 0.05$	
	(交叉概率)	(遗传概率)	

在对比实验中测试函数维度为 10;种群规模为 30;最大迭代次数为 100;每个算法独立运行 10 次。实验环境如表 2 所示,实验结果如表 3 所示。

表 2 实验所用软硬件信息

**Table 2 Software and hardware information in experiment**

结构	Hardware	software
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU	OS-Windows10
RAM	16 GB	Matlab 2020a

如表 3 所示,IGRO 算法在  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_{12}$  函数下的平均值最优;在  $F_1, F_2, F_6, F_8, F_{11}, F_{12}$  函数下的标准差最优。结果表明 IGRO 算法较其他算法具有更好的稳定性和寻优能力。

2.4.2 IGRO-PID 性能分析

为了验证 IGRO 算法在 PID 控制系统中的可行性,本文中选取二阶时滞系统作为仿真对象,分别用 CPO<sup>[19]</sup>、COA<sup>[23]</sup>、IPSO<sup>[10]</sup>、GA<sup>[8]</sup>、IGRO 对该系统 PID 控制器参数进行整定。系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.9}{0.0057s^2 + 0.12s + 1} e^{-0.06s} \quad (16)$$

对于以上传递函数,优化算法都满足以下初始化设置:种群规模为 50,最大迭代次数为 50,3 个参

表 3 CEC2022 测试集中 IGRO 算法与同类优化算法的实验结果

Table 3 Experimental results of IGRO algorithm and similar optimization algorithms in CEC2022 test set

算法	$F_1$		$F_2$		$F_3$		$F_4$		$F_5$		$F_6$	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
IGRO	$9.76 \times 10^2$	$4.73 \times 10^2$	$4.26 \times 10^2$	$1.98 \times 10^1$	$6.06 \times 10^2$	2.77	$8.18 \times 10^2$	4.33	$9.294 \times 10^2$	$1.81 \times 10^1$	$2.77 \times 10^3$	$8.66 \times 10^2$
GRO	$2.38 \times 10^3$	$8.12 \times 10^2$	$4.44 \times 10^2$	$2.70 \times 10^1$	$6.08 \times 10^2$	2.95	$8.23 \times 10^2$	5.75	$9.496 \times 10^2$	$5.59 \times 10^1$	$6.44 \times 10^3$	$9.52 \times 10^3$
CPO	$5.40 \times 10^3$	$2.11 \times 10^3$	$4.30 \times 10^2$	$2.05 \times 10^1$	$6.08 \times 10^2$	2.70	$8.43 \times 10^2$	5.87	$9.296 \times 10^2$	$1.39 \times 10^1$	$6.26 \times 10^4$	$5.29 \times 10^4$
BKA	$2.53 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$4.69 \times 10^2$	$9.34 \times 10^1$	$6.36 \times 10^2$	$1.03 \times 10^1$	$8.21 \times 10^2$	9.90	$1.125 \times 10^3$	$8.23 \times 10^1$	$3.59 \times 10^3$	$1.96 \times 10^3$
GOOSE	$3.07 \times 10^4$	$1.43 \times 10^4$	$1.47 \times 10^3$	$6.36 \times 10^2$	$6.63 \times 10^2$	$1.27 \times 10^1$	$8.47 \times 10^2$	$1.58 \times 10^1$	$2.416 \times 10^3$	$7.04 \times 10^2$	$1.39 \times 10^8$	$1.90 \times 10^8$
AROA	$2.25 \times 10^4$	$9.14 \times 10^3$	$1.61 \times 10^3$	$4.92 \times 10^2$	$6.69 \times 10^2$	$1.14 \times 10^1$	$8.77 \times 10^2$	$1.69 \times 10^1$	$2.160 \times 10^3$	$6.40 \times 10^2$	$6.38 \times 10^8$	$6.53 \times 10^8$
COA	$1.94 \times 10^4$	$1.32 \times 10^4$	$4.35 \times 10^2$	$3.25 \times 10^1$	$6.30 \times 10^2$	$2.36 \times 10^1$	$8.32 \times 10^2$	2.31	$1.445 \times 10^3$	$3.44 \times 10^2$	$5.58 \times 10^3$	$1.69 \times 10^3$
SOA	$5.18 \times 10^3$	$1.94 \times 10^3$	$4.77 \times 10^2$	$6.74 \times 10^1$	$6.27 \times 10^2$	8.09	$8.29 \times 10^2$	8.06	$1.150 \times 10^3$	$1.68 \times 10^2$	$5.24 \times 10^4$	$9.08 \times 10^4$
IPSO	$3.00 \times 10^3$	$8.81 \times 10^2$	$4.42 \times 10^2$	$2.55 \times 10^1$	$6.29 \times 10^2$	$1.03 \times 10^1$	$8.24 \times 10^2$	9.99	$1.074 \times 10^3$	$1.26 \times 10^2$	$3.52 \times 10^3$	$2.49 \times 10^3$
GA	$2.90 \times 10^4$	$1.30 \times 10^4$	$6.73 \times 10^2$	$1.16 \times 10^2$	$6.70 \times 10^2$	9.84	$8.72 \times 10^2$	$1.79 \times 10^1$	$1.228 \times 10^3$	$2.04 \times 10^2$	$3.29 \times 10^6$	$7.63 \times 10^6$
算法	$F_7$		$F_8$		$F_9$		$F_{10}$		$F_{11}$		$F_{12}$	
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
IGRO	$2.030 \times 10^3$	7.98	$2.227 \times 10^3$	1.71	$2.56 \times 10^3$	$1.44 \times 10^1$	$2.54 \times 10^3$	$5.20 \times 10^1$	$2.83 \times 10^3$	$9.10 \times 10^1$	$2.869 \times 10^3$	1.49
GRO	$2.032 \times 10^3$	9.90	$2.227 \times 10^3$	2.28	$2.57 \times 10^3$	$2.04 \times 10^1$	$2.54 \times 10^3$	$5.82 \times 10^1$	$2.93 \times 10^3$	$1.58 \times 10^2$	$2.875 \times 10^3$	7.95
CPO	$2.042 \times 10^3$	5.68	$2.230 \times 10^3$	2.47	$2.56 \times 10^3$	$1.13 \times 10^1$	$2.51 \times 10^3$	$4.12 \times 10^1$	$2.81 \times 10^3$	$1.02 \times 10^2$	$2.879 \times 10^3$	3.70
BKA	$2.058 \times 10^3$	$1.62 \times 10^1$	$2.230 \times 10^3$	7.00	$2.62 \times 10^3$	$5.51 \times 10^1$	$2.71 \times 10^3$	$2.94 \times 10^2$	$2.96 \times 10^3$	$2.52 \times 10^2$	$2.870 \times 10^3$	9.19
GOOSE	$2.145 \times 10^3$	$3.46 \times 10^1$	$2.402 \times 10^3$	$1.60 \times 10^2$	$2.78 \times 10^3$	$1.05 \times 10^2$	$3.08 \times 10^3$	$5.68 \times 10^2$	$4.28 \times 10^4$	$4.11 \times 10^4$	$3.032 \times 10^3$	$7.79 \times 10^1$
AROA	$2.210 \times 10^3$	$6.78 \times 10^1$	$2.383 \times 10^3$	$8.93 \times 10^1$	$2.85 \times 10^3$	$1.04 \times 10^2$	$3.49 \times 10^3$	$8.38 \times 10^2$	$9.42 \times 10^3$	$2.97 \times 10^3$	$3.084 \times 10^3$	$8.26 \times 10^1$
COA	$2.051 \times 10^3$	8.93	$2.267 \times 10^3$	$5.52 \times 10^1$	$2.57 \times 10^3$	$4.62 \times 10^1$	$2.67 \times 10^3$	$2.55 \times 10^2$	$3.13 \times 10^3$	$2.91 \times 10^2$	$2.873 \times 10^3$	$1.30 \times 10^1$
SOA	$2.061 \times 10^3$	$2.24 \times 10^1$	$2.230 \times 10^3$	2.66	$2.63 \times 10^3$	$3.56 \times 10^1$	$2.55 \times 10^3$	$6.29 \times 10^1$	$3.24 \times 10^3$	$2.72 \times 10^2$	$2.914 \times 10^3$	$2.81 \times 10^1$
IPSO	$2.070 \times 10^3$	$3.13 \times 10^1$	$2.226 \times 10^3$	2.27	$2.52 \times 10^3$	$2.79 \times 10^1$	$2.74 \times 10^3$	$3.79 \times 10^2$	$6.12 \times 10^3$	$2.32 \times 10^3$	$2.914 \times 10^3$	$6.18 \times 10^1$
GA	$2.159 \times 10^3$	$5.74 \times 10^1$	$2.295 \times 10^3$	$8.01 \times 10^1$	$2.75 \times 10^3$	$9.49 \times 10^1$	$2.88 \times 10^3$	$3.93 \times 10^2$	$1.59 \times 10^4$	$6.18 \times 10^3$	$3.033 \times 10^3$	$5.36 \times 10^1$

数搜索范围为[0,100];期望输出信号为单位阶跃信号  $Y_d=2$ , 采样时间间隔为 0.001 s, 仿真时间为 1 s。以式(16)所示的二阶系统、式(10)为适应度值评价函数, 各算法的仿真结果如图6、图7所示。每个算法进行5次仿真, 选取效果居中的结果进行展示。

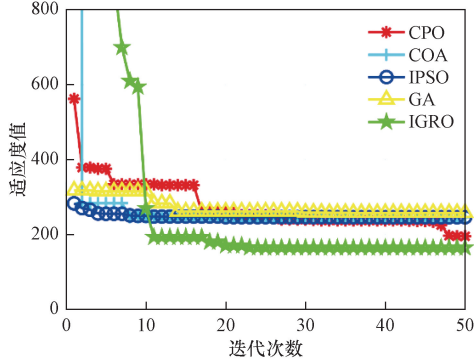


图6 各算法适应度值对比

Fig. 6 Comparison of fitness values of each algorithm

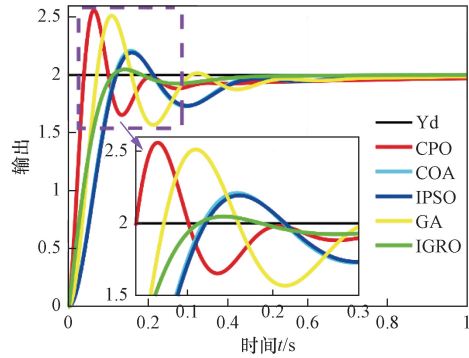


图7 各算法输出对比

Fig. 7 Comparison of the output of each algorithm

由表4可知, 对于以上的五种算法, IGRO 算法拥有最佳适应度值为 165.24; 最少迭代次数为 11; 最小超调量 2.35%。IGRO 算法寻优能力最强, 寻优速度最快, 能有效避免系统陷入局部最优解。总体性能排序: IGRO > CPO > IPSO > COA > GA。

实际温度控制过程中, 可变参数多, 电压波动, 传感器误差等, 很难对温度进行精准且高效的控制效果, 故下一步再将多层模糊嵌套控制应用于 PID 控制。

表5  $K_p/K_i/K_d$  隶属度规则表

Table 5 Table of  $K_p/K_i/K_d$  membership rules

$K_p$	$ec$							$K_i$	$ec$							$K_d$	$ec$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
$er$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表4 各算法性能指标

Table 4 Performance index of each algorithm

评价指标	CPO	COA	IPSO	GA	IGRO
$K_p$	12.951	2.552	2.475	5.187	3.404
$K_i$	21.384	13.178	12.858	17.744	0.023
$K_d$	0.083	0	0	0	0.088
最佳适应度	195.61	246.47	246.43	257.99	165.24
迭代次数 ( $F=200$ )	49	—	—	—	11
超调量/%	27.91	10.49	9.65	25.55	2.35

### 3 基于 IGRO 的多层模糊嵌套 PID 算法

#### 3.1 模糊 PID 控制及其相关参数

在模糊 PID 控制中, 核心是使用模糊控制器, 这是一个基于规则的系统, 包括四个部分: 模糊化, 规则库、模糊推理和解模糊化。首先, 模糊化将输入参数转换为模糊集合; 接着, 根据专家经验和知识搭建相对应的模糊控制规则库; 然后, 模糊推理使用规则库进行推导, 生成模糊输出。最后进行解模糊化步骤, 将模糊输出映射为控制量<sup>[24]</sup>。如图8所示为模糊 PID 控制原理流程图。

设  $er$  表示误差,  $ec$  表示误差的变化率, 根据经验和专家系统建立以下模糊集合  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 其中 NB 表示负大、NM 表示负中、NS 表示负小、ZO 表示零、PS 表示正小、PM 表示正中、PB 表示正大<sup>[25]</sup>。模糊 PID 控制器选用三角形隶属函数, 以  $K_p/K_i/K_d$  为输出。 $K_p/K_i/K_d$  的模糊规则表如表5所示。

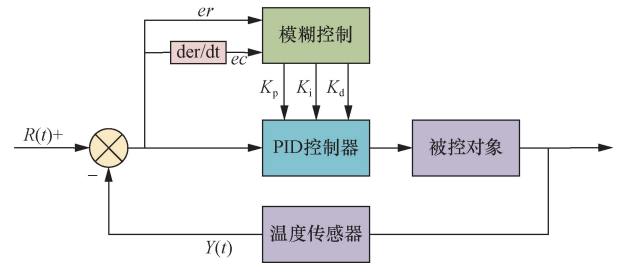


图8 模糊 PID 控制原理图

Fig. 8 Fuzzy PID control schematic diagram

### 3.2 IGRO-FuzzyN-PID 算法

对于输入输出对称工况,单个程控电源匹配单个加热片和热电偶。一组  $er/ec$  数据对应单个电源功率,该工况下的多层模糊嵌套算法 (FuzzyN) 核心是根据当前的  $er$  大小,自适应切换不同的模糊控制系统,目的是当  $er$  较小时,切换到小论域模糊控制系统,以此来提升逼近期望信号阶段时的控制效果。下文称上述算法结构为层模糊控制。

该工况下 IGRO-FuzzyN-PID 算法首先采用通过系统辨识得到温控点对应的传递函数,如式(5)~式(8)所示。后采用 IGRO 算法对于上述传递函数进行参数寻优,得到 PID 控制的最优参数。最后将最优参数作为初始值代入层模糊控制算法中进行温控。图 9 所示为原理图。

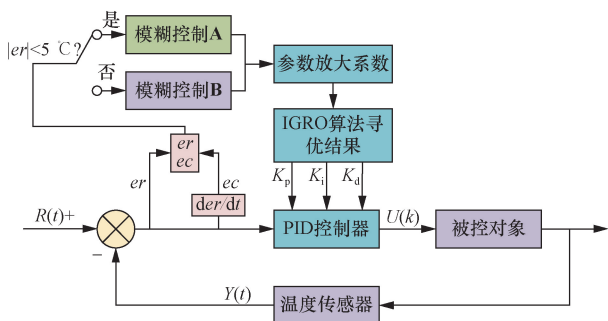


图 9 输入输出对称工况的原理图

Fig. 9 Schematic of the input and output symmetric conditions

对于输入输出非对称工况,单个程控电源匹配两个加热片和热电偶。两组  $er/ec$  数据对应单个电源功率,该工况下的 FuzzyN 相较于对称工况,新增根据两组  $er$  数据情况进入不同处理算法,最后从两组  $er/ec$  数据得到处理后的总  $er/ec$  数据。后续流程同对称工况。

该工况下 IGRO-FuzzyN-PID 算法首先采用通过系统辨识得到 T1 ~ T4 点的传递函数  $Tf_1 \sim Tf_4$ ,如式(5)~式(8)所示,同输入输出对称工况得到 PID 控制的最优参数,最后将最优参数作为初始值代入层模糊控制算法中进行温控。图 10 所示为原理图。

根据温控系统输入的  $er/ec$  数据情况,算法自适应切换到不同的作业工况,执行相对应的温控程序。从而构建本文所提基于 IGRO 的多层模糊嵌套 PID 算法。

## 4 仿真与实验验证

### 4.1 仿真结果对比分析

对温控点进行仿真对比实验。期望温度为 70 °C,最大加热功率为 200 W。并引入随机误差来模拟实际环境中存在的干扰因素,随机误差表达式为

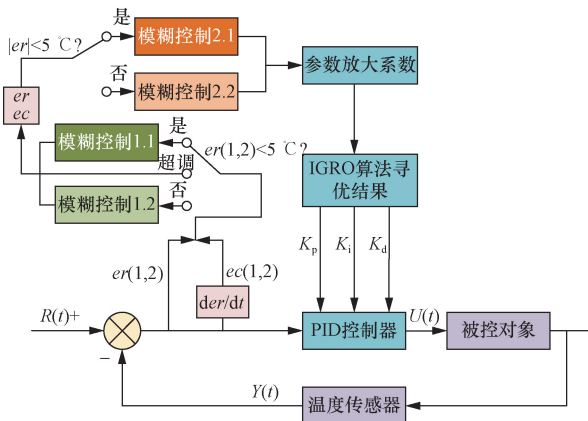


图 10 输入输出非对称工况的原理图

Fig. 10 Schematic of asymmetric input and output conditions

$$N(k) = 0.5 \text{rand}(-1, 1) \tag{17}$$

进行了三部分的对比仿真实验。第一部分为输入输出对称工况无干扰信号下的 IGRO-PID 算法和有干扰信号下的 IGRO-PID 算法以及有干扰信号的所提算法。第二部分为输入输出非对称工况有干扰信号下的 IGRO-PID 算法和有干扰信号的所提算法。第三部分为输入输出对称情况下所提算法在切换条件 (switching condition, SC) 为 1 °C 和 10 °C 时的参数敏感性和复杂性分析。

#### 4.1.1 输入输出对称工况

仿真结果如图 11 所示,性能指标如表 6 所示。在存在干扰的输入输出对称工况下, T3 点处超调量、稳态误差、平均误差和上升时间指标,仿真最优结果依次为 1.60%、1.12 °C、0.42 °C、3 645 s。仿真结果表明所提控制算法远优于 IGRO-PID 控制算法。

#### 4.1.2 输入输出非对称工况

仿真结果如图 12、图 13 所示,性能指标如表 7 所示。在存在干扰的输入输出非对称工况下, T1 ~ T4 点处超调量、稳态误差、平均误差和上升时间指标,仿真最优结果依次为 T1: 1.49%、1.01 °C、0.34 °C、750 s, T2: -5.05 °C、3.94 °C、-, T3: -4.02 °C、2.96 °C、4 425 s, T4: 2.62%、1.83 °C、0.54 °C、3 525 s。IGRO-PID 只有 T3 点处的上升时间占优,为 4 425 s。仿真结果表明所提算法总体优于 IGRO-PID 算法。

#### 4.1.3 所提算法复杂度和参数敏感度仿真分析

所提算法主要参数为图 9、图 10 所示模糊控制切换的条件。在输入输出对称工况下额外进行 2 次仿真实验,切换条件 SC 分别为 1、10 °C。软硬件信息如表 1 所示。相关实验数据结果如表 8 所示。

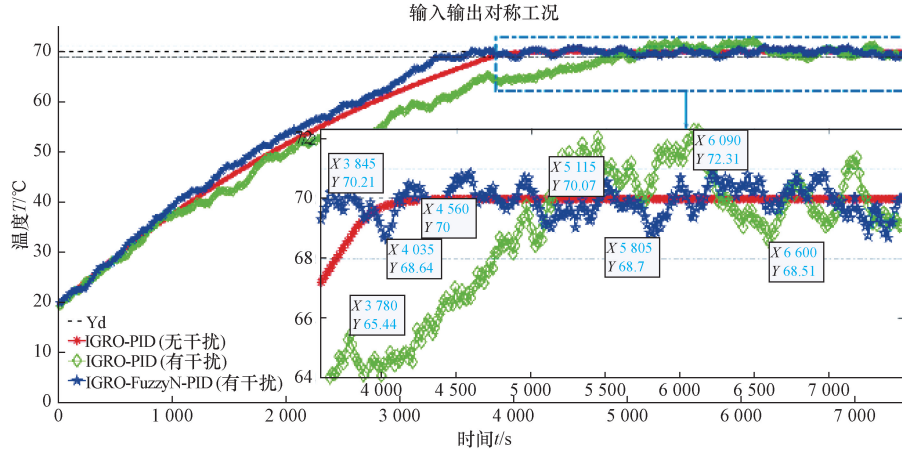


图 11 T3 点仿真结果

Fig. 11 Simulation results at T3 point

表 6 性能指标对比表

Table 6 Comparison table of performance indicators

性能指标	超调量/%	稳态误差/°C	平均误差/°C	上升时间/s
IGRO-PID (T3, 无干扰)	—	0	0	4 560
IGRO-PID (T3, 有干扰)	2.94	2.06	0.84	5 115
IGRO-FuzzyN-PID (T3, 有干扰)	1.60	1.12	0.42	3 645

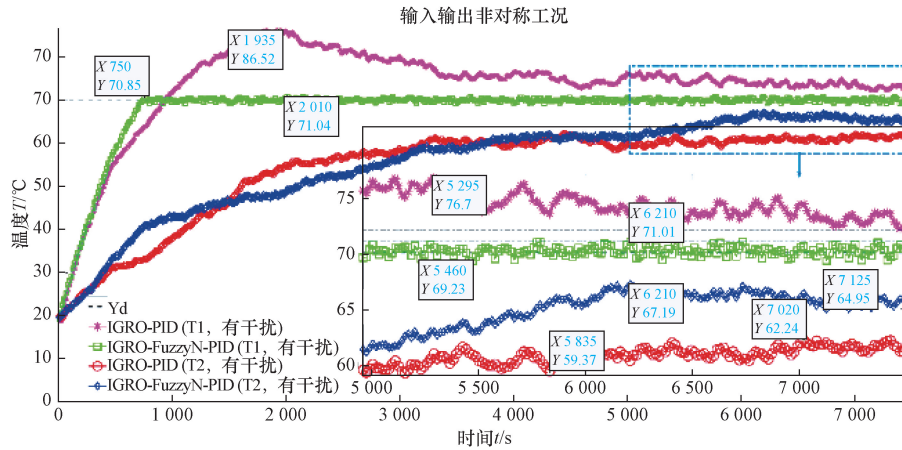


图 12 T1、T2 点仿真结果

Fig. 12 Simulation results at T1、T2 point

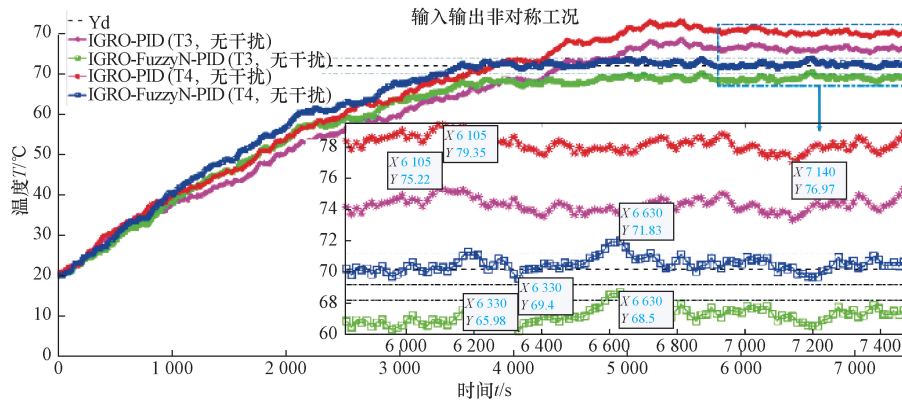


图 13 T3、T4 点仿真结果

Fig. 13 Simulation results at T3、T4 point

表 7 性能指标对比表  
Table 7 Comparison table of performance indicators

性能指标	超调量/%	稳态误差/℃	平均误差/℃	上升时间/s
IGRO-PID(T1,有干扰)	23.60	6.70	6.90	930
IGRO-FuzzyN-PID(T1,有干扰)	1.49	1.01	0.34	750
IGRO-PID(T2,有干扰)	—	10.63	9.19	—
IGRO-FuzzyN-PID(T2,有干扰)	—	5.05	3.94	—
IGRO-PID(T3,有干扰)	9.18	5.57	3.88	4 425
IGRO-FuzzyN-PID(T3,有干扰)	—	4.02	2.96	—
IGRO-PID(T4,有干扰)	15.57	9.35	7.07	3 825
IGRO-FuzzyN-PID(T4,有干扰)	2.62	1.83	0.54	3 525

由表 8 可知,SC 在 5 ℃时性能最佳,过大或过小都会影响温控性能,所提算法温控中心 500 次计算总耗时平均 69 s,较 IGRO-PID 算法复杂,但单次温控计算耗时 0.14 s 左右,满足温控系统耗时要求。

表 8 T3 点输入输出对称工况

性能指标	超调量/%	稳态误差/℃	上升时间/s	温控耗时/s
IGRO-PID(T3,有干扰)	2.94	2.06	5 115	0.31
IGRO-FuzzyN-PID(T3/SC=1)	4.93	3.45	4 650	69.83
IGRO-FuzzyN-PID(T3/SC=5)	1.60	1.12	3 645	68.95
IGRO-FuzzyN-PID(T3/SC=10)	6.72	4.62	3 750	68.48

4.2 实验结果对比分析

期望温度为 70 ℃,加热功率限额 200 W。实验分为两个部分:①输入输出对称工况的 IGRO-PID 的常温(秋季、20 ℃左右)实验以及所提算法的常温(秋季、20 ℃左右)实验。②输入输出非对称工况的 IGRO-PID 的常温(秋季、20 ℃左右)实验以及所提算法的高温(秋季、28 ℃左右)实验、中温(秋季、20 ℃左右)实验和低温(冬季、10 ℃左右)实验,以及稳定性验证实验高温(秋季、24 ℃左右、5 次风扇强制

降温干扰)。

4.2.1 输入输出对称工况实验

实验结果如图 14 所示,性能指标如表 9 所示。在输入输出对称工况下,T3 点处超调量、稳态误差、平均误差和上升时间指标,仿真最优结果依次为 0.48%、0.34 ℃、0.12 ℃、2 760 s,只有 T3 点上升时间指标 IGRO-PID 算法占优。其他指标所提算法占优。

所提算法在初期误差较大和超调严重时可自适应调节输入功率,有效提升温控系统的性能指标。但是 T3 点 IGRO-PID 算法的上升时间占优,因为在 T3 处初始参数偏差,温控系统整体超调,因此上升时间缩短。仿真数据及其分析表明在输入输出对称工况下,所提算法优于 IGRO-PID 算法。

4.2.2 输入输出非对称工况实验

实验结果如图 15 所示,性能指标如表 10 所示。在输入输出非对称工况下,T1 ~ T4 点处超调量、稳态

表 9 性能指标对比表

性能指标	超调量/%	稳态误差/℃	平均误差/℃	上升时间/s
IGRO-PID(T3,20 ℃)	1.65	1.16	0.68	2 760
IGRO-FuzzyN-PID(T3,20 ℃)	0.48	0.34	0.12	3 975

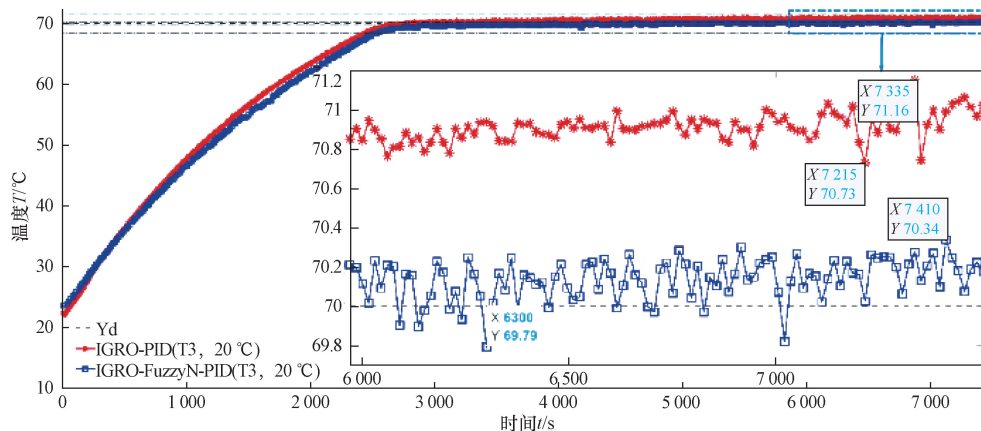


图 14 T3 点实验结果(20 ℃)

Fig. 14 Experimental results at points T3(20 ℃)

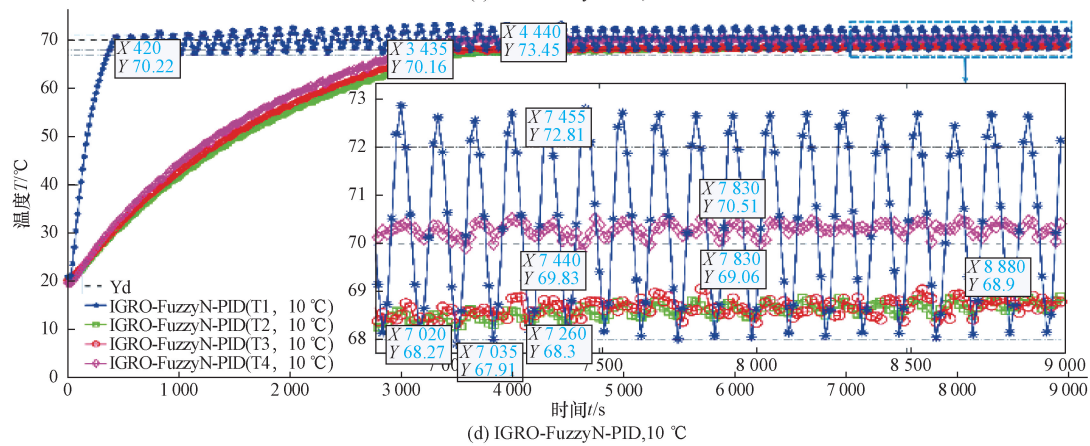
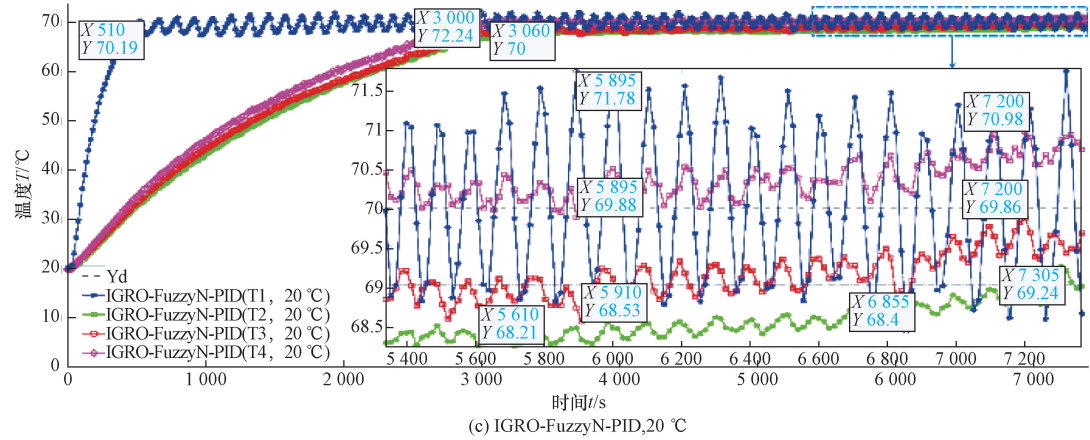
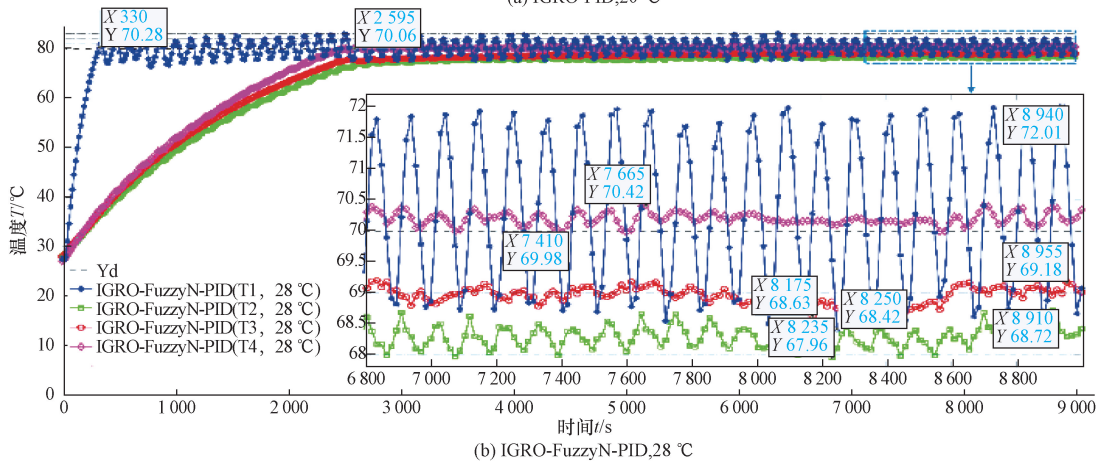
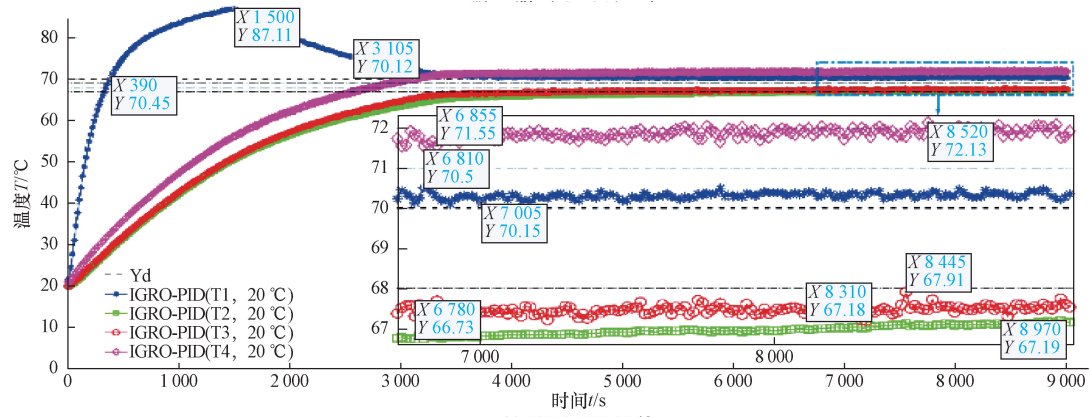


图 15 T1 ~ T4 实验结果

Fig. 15 Experimental results at points T1 ~ T4

表 10 性能指标对比表

**Table 10 Comparison table of performance indicators**

性能指标	超调量/%	稳态误差/℃	平均误差/℃	上升时间/s
IGRO-PID (T1, 20 ℃)	24.44	0.50	3.34	390
IGRO-FuzzyN-PID (T1, 28 ℃)	4.40	2.01	1.18	330
IGRO-FuzzyN-PID (T1, 20 ℃)	3.21	1.76	0.95	510
IGRO-FuzzyN-PID (T1, 10 ℃)	4.94	2.09	1.49	420
IGRO-PID (T2, 20℃)	—	3.27	3.25	—
IGRO-FuzzyN-PID (T2, 28 ℃)	—	2.04	1.89	—
IGRO-FuzzyN-PID (T2, 20 ℃)	—	1.79	1.51	—
IGRO-FuzzyN-PID (T2, 10 ℃)	—	2.33	1.59	—
IGRO-PID (T3, 20 ℃)	—	2.82	2.66	—
IGRO-FuzzyN-PID (T3, 28 ℃)	—	1.58	1.21	—
IGRO-FuzzyN-PID (T3, 20 ℃)	—	1.47	0.88	—
IGRO-FuzzyN-PID (T3, 10 ℃)	—	1.73	1.49	—
IGRO-PID (T4, 20 ℃)	3.04	2.13	1.83	3 105
IGRO-FuzzyN-PID (T4, 28 ℃)	0.65	0.42	0.16	2 595
IGRO-FuzzyN-PID (T4, 20 ℃)	1.40	0.98	0.30	3 060
IGRO-FuzzyN-PID (T4, 10 ℃)	1.06	0.51	0.25	3 435

误差、平均误差和上升时间指标,实验最优结果依次为 T1: 3.21%、1.76 ℃、0.95 ℃、330s。T2:—、1.79 ℃、1.51 ℃、—。T3:—、1.47 ℃、0.88℃、—。T4:0.65%、0.42 ℃、0.16℃、2 595 s。在室温 20 ℃左右时,只有 T1 点上升时间指标 IGRO-PID 算法占优。其他指标所提算法占优。

由图 1 所示的温控实验验证系统,以 T1 和 T2 温控为例,所提算法可自适应调节两点间权重,得到总评价输入功率,兼顾 T1 和 T2 的温控性能。但在室温 20 ℃左右时 T1 点 IGRO-PID 算法的上升时间占优,为 390 s。是因为该算法未从总性能出发,无法解决 T1 和 T2 比热容不对称问题,导致 T1 严重超调,上升时间因此占优。

所提算法在 10、20、28 ℃的 3 次实验可以初步证明所提算法具有稳定性,为了进一步证明所提算法的稳定性,引入 5 次风扇强制降温干扰来构建额外的干扰验证实验。实验结果如图 16 所示。

可以发现所提算法在 5 次风扇强制降温干扰下,总体温控性能依旧保持在理想范围内,干扰验证实验证明了所提算法的稳定性和可靠性。

以 IGRO-PID 的秋季实验,室温 20 ℃时为空白样本,实验结果证明所提算法在室温 20 ℃左右时性能占优。增加难度到室温 10 ℃左右和室温 28 ℃左右,所提算法性能依旧占优。实验数据分析表明在输入输出对称和非对称工况下,所提算法优于 IGRO-PID 算法。

### 5 结论

针对输入输出对称和非对称工况,提出 IGRO-FuzzyN-PID 算法。

(1) 首先证明 IGRO 算法相较 GRO、CPO、BKA、GOOSE、AROA、COA、SOA、IPSO、GA 算法具有优秀的收敛性、有效性和稳健性。

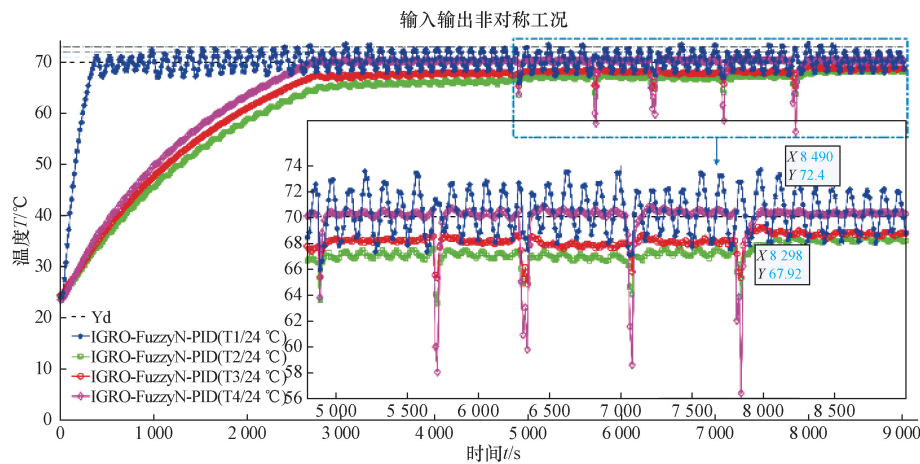


图 16 T1 ~ T4 点抗干扰实验结果(IGRO-FuzzyN-PID, 24 ℃)

Fig. 16 Anti-interference experiment results at points T1 ~ T4 (IGRO-FuzzyN-PID, 24 ℃)

(2)接着证明 IGRO 算法相较 CPO、COA、IPSO、GA 算法在 PID 控制策略中具有卓越的寻优能力。

(3)然后将所提算法与 IGRO-PID 算法进行仿真对比,验证所提算法的可行性和显著性。

(4)后进行实验验证,证明所提算法在输入输出对称和非对称工况下,温控系统的超调量、稳态误差、平均误差和上升时间较 IGRO-PID 算法都得到了提升。

(5)最后,通过 3 次不同温度的实验和抗干扰实验,证明所提算法的稳定性。

通过上述仿真和实验证明,所提算法满足高精高速高效、精简可靠、智能自动化的控制需求。

然而,所提算法还存在一些不足:复杂问题寻优能力较弱;复杂度偏高;应用范围较窄。后续研究将从以下方面来解决上述不足:结合新兴优化算法来提高寻优能力;轻量化代码结构;增加温控通道应对大型 MIMO 系统。

#### 参 考 文 献

- [1] 韩潇, 周盈, 黄海, 等. 高精度动态温度控制系统设计与验证 [J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-13 [2024-06-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0297>.  
Han Xiao, Zhou Ying, Huang Hai, et al. Design and verification of high precision dynamic temperature control system [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-13[2024-06-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0297>.
- [2] 易灵芝, 王斌, 刘江水, 等. 基于非对称多变量 PID 神经网络的三相 Z 源光伏并网逆变器解耦控制研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1612-1618.  
Yi Lingzhi, Wang Bin, Liu Jiangyong, et al. Research on decoupling control of three-phase Z-source photovoltaic grid-connected inverter based on asymmetric multivariable PID neural network [J]. Journal of Solar Energy, 2013, 34(9): 1612-1618.
- [3] 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 Ning, Chai Tianyou. Optimal tuning method of PID controller parameters [J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2272-2285.
- [4] Mints A H, Eny E G, Senouveau N, et al. Optimal tuning PID controller gains from Ziegler-Nichols approach for an electro-hydraulic servo system[J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2023, 25(11): 158-166.
- [5] 赵亮, 陈惠贤, 姚运萍. 基于 Smith-模糊 PID 的风干区温度控制系统设计[J/OL]. 控制工程: 1-8 [2024-06-07]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20221108>.  
Zhao Liang, Chen Huixian, Yao Yunping. Design of air-drying zone temperature control system based on smith-fuzzy PID [J/OL]. Control Engineering: 1-8 [2024-06-07]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20221108>.
- [6] 张玉雪, 周军, 皇攀凌, 等. 改进粒子群优化的中药提取参数模糊 PID 解耦控制研究[J]. 控制工程, 2023, 30(6): 1121-1128.  
Zhang Yuxue, Zhou Jun, Huang Panling, et al. Research on fuzzy PID decoupling control of traditional Chinese medicine extraction parameters based on improved particle swarm optimization [J]. Control Engineering, 2023, 30(6): 1121-1128.
- [7] Chang K, Li Y Z, Hou X, et al. Numerical study of fuzzy-PID dual-layer coordinated control strategy for high temperature uniformity of space lithium-ion battery pack based on thermoelectric coolers [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 105952.
- [8] 李志清, 李美, 付丽荣, 等. 遗传算法优化的空气悬架模糊 PID 控制[J]. 机械设计与制造, 2023(4): 22-25, 33.  
Li Zhiqing, Li Mei, Fu Lirong, et al. Fuzzy PID control of air suspension optimized by genetic algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(4): 22-25, 33.
- [9] Kruthika U, Paneerselvam S. Improved adaptive pso-based gain tuning for pid controllers in utility boilers[J]. Procedia Computer Science, 2023, 230: 183-192.
- [10] 卢艳军, 郭竟翔, 李忠海. 基于改进粒子群优化的旋翼无人机 PID 参数整定算法[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(5): 116-124.  
Lu Yanjun, Guo Jingxiang, Li Zhonghai, PID parameter tuning algorithm of rotor-craft UAV based on improved particle swarm optimization [J]. Journal of Detection and Control, 2022, 44(5): 116-124.
- [11] 谈聪, 杨旭辉, 刘平, 等. 基于 SOA 与模糊 PID 的恒温差热式流量计[J]. 石油机械, 2023, 51(7): 113-120.  
Tan Cong, Yang Xuhui, Liu Ping, et al. Thermostatic differential thermal flowmeter based on SOA and fuzzy PID [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(7): 113-120.
- [12] Zolf K. Gold rush optimizer: a new population-based metaheuristic algorithm[J]. Operations Research and Decisions, 2023, 33(1): 113-150.
- [13] 李光保, 高栋, 路勇, 等. 基于卡尔曼滤波的模糊 PID 热处理温度控制系统的设计[J]. 金属热处理, 2023, 48(8): 235-241.  
Li Guangbao, Gao Dong, Lu Yong, et al. Design of fuzzy-PID temperature control system for Heat treatment based on Kalman filter [J]. Metal Heat Treatment, 2023, 48(8): 235-241.
- [14] 胡涛, 蒋全. 基于改进蜜獾优化算法的 PID 参数整定[J]. 电子科技, 2023, 36(12): 46-54.  
Hu Tao, Jiang Quan. PID parameter tuning based on improved honey badger optimization algorithm [J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(12): 46-54.
- [15] 魏良亭. 高质量多晶硅铸锭炉及其控制系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.  
Wei Liangting. Research on high quality polysilicon ingot furnace and its control system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [16] 詹长书, 苏立庆. 基于粒子群优化的主动悬架 PID 控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4180-4186.  
Zhan Changshu, Su Liqing. PID control strategy of active suspension based on particle swarm optimization [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4180-4186.
- [17] 章盼梅. 模糊 PID 算法的水下机器人控制系统优化[J]. 机床与液压, 2024, 52(3): 72-77.  
Zhang Panmei. Control system optimization of underwater vehicle based on fuzzy pid algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(3): 72-77.

- [18] Khokhar B, Dahiya S, Parmar K P S. Load frequency control of a microgrid employing a 2D sine Logistic map based chaotic sine cosine algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2021, 109: 107564.
- [19] Abdel-Basset M, Mohamed R, Abouhawwash M. Crested porcupine optimizer: a new nature-inspired metaheuristic [J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 284: 111257.
- [20] Wang J, Wang W, Hu X, et al. Black-winged kite algorithm: a nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems[J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(4): 98.
- [21] Hamad R K, Rashid T A. GOOSE algorithm: a powerful optimization tool for real-world engineering challenges and beyond[J]. Evolving Systems, 2024(15): 1249-1274.
- [22] Cymerys K, Oszust M. Attraction-repulsion optimization algorithm for global optimization problems [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 84: 101459.
- [23] Jia H, Rao H, Wen C, et al. Crayfish optimization algorithm[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(S2): 1919-1979.
- [24] 严睿, 周惠兴, 张玉品, 等. 基于模糊 PID 控制的空间吊装物姿态控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4702-4708.  
Yan Rui, Zhou Huixing, Zhang Yupin, et al. Attitude control of space hoisting object based on fuzzy PID control [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4702-4708.
- [25] 刘睿, 李明, 达俊宇, 等. 基于自适应模糊控制的空气源热泵温度控制系统[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 16-20.  
Liu Rui, Li Ming, Da Junyu, et al. Temperature control system of air source heat pump based on adaptive fuzzy control [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition), 2023, 43(1): 16-20.