

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407536

基于 DBO 优化模糊 PID 的高低温试验箱 温度控制方法*

杨洪涛^{1,2} 金磊¹ 姜西祥^{1,2} 秦鹏飞^{1,2} 田杭州¹

(1. 安徽理工大学机电工程学院 淮南 232001; 2. 安徽理工大学安徽省矿山智能装备与技术重点实验室 淮南 232001)

摘要: 高低温试验箱温控系统具有非线性、时滞性。传统采用的 PID 控制超调量高、调节时间长,而模糊 PID 控制效果受量化因子与比例因子拟定的影响。为了提高试验箱温控系统响应速度与稳定性,提出了一种基于 DBO 算法优化模糊 PID 量化因子与比例因子的高低温试验箱温控方法。首先建立了高低温试验箱加热模型传递函数,在 MATLAB/Simulink 中搭建传统 PID、模糊 PID、PSO 优化的模糊 PID 以及 DBO 优化的模糊 PID 模型进行仿真,并利用 PLC、触摸屏和温控箱搭建实验装置开展实际温控实验。仿真结果表明,DBO 优化的模糊 PID 相较于 PSO 优化的模糊 PID 的超调量降低了 1.02%,调节时间降低了 106 s。实验结果表明,DBO 优化的模糊 PID 相较于 PSO 优化的模糊 PID 超调量降低了 1.1%,调节时间减少了 120 s,验证了 DBO 算法优化模糊 PID 量化因子与比例因子相较于 PSO 效果更佳。补充测试 DBO 优化出的最佳量化因子与比例因子在不同温度下的温控效果,表明了 DBO 算法优化模糊 PID 控制方案的可行性。

关键词: 高低温试验箱; DBO 算法; 模糊 PID; 温度控制

中图分类号: TN06; TP273

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.8010

Temperature control method of high and low temperature test chamber based on DBO optimization fuzzy PID

Yang Hongtao^{1,2} Jin Lei¹ Jiang Xixiang^{1,2} Qin Pengfei^{1,2} Tian Hangzhou¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The temperature control system of high and low temperature test chamber has nonlinear and time-delay. The traditional PID control has high overshoot and long adjustment time, but the effect of fuzzy PID control is affected by the formulation of quantization factor and scale factor. In order to improve the response speed and stability of the temperature control system of the test chamber, a method of temperature control of the high and low temperature test chamber based on DBO algorithm was proposed to optimize the fuzzy PID quantization factor and scale factor. Firstly, the transfer function of the heating model of the high and low temperature test chamber was established, and the traditional PID, fuzzy PID, PSO optimized fuzzy PID and DBO optimized fuzzy PID models were built in MATLAB/Simulink for simulation. In addition, the PLC, touch screen and temperature control box were used to build experimental devices to carry out actual temperature control experiments. The simulation results show that the overshoot of DBO optimized fuzzy PID is reduced by 1.02% and the adjustment time is reduced by 106 s compared with that of PSO optimized fuzzy PID. The experimental results show that the overshoot of the fuzzy PID optimized by DBO is reduced by 1.1% and the adjustment time is reduced by 120 s compared with that of the fuzzy PID optimized by PSO, which verifies that the DBO algorithm has a better effect than PSO in optimizing the quantization factor and scale factor of fuzzy PID. The temperature control effect of the optimal quantization factor and scale factor optimized by DBO at different temperatures is tested, which indicates the feasibility of optimizing the fuzzy PID control scheme by DBO algorithm.

收稿日期: 2024-05-20 Received Date: 2024-05-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675004)、安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类)(2022AH050805)、2022 年安徽省智能矿山技术与装备工程研究中心开放基金项目(AIMTEEL202206)资助

Keywords: high and low temperature test chamber; DBO algorithm; fuzzy PID; temperature control

0 引言

高低温试验箱用来检测产品在某一温度条件下的性能指标,需保障试验箱温控系统快速响应与稳定。但试验箱温控系统的工作条件随时间变化,且传感器与执行器作用于控制系统时需要一定的延迟时间,导致试验箱温控系统具有非线性、时滞性,使得响应速度与稳定下降^[1]。高低温试验箱温控系统主要使用 PID 控制,但传统 PID 控制存在超调量大、调节时间长、控制精度低等诸多问题,且不能根据外界变化自适应调整 PID 参数。在此基础上,专家提出模糊 PID 控制,将模糊控制策略与 PID 控制结合,弥补了传统 PID 控制的不足,但模糊 PID 控制的量化因子与比例因子往往依赖人工经验拟定,在一定程度上限制了模糊 PID 控制的优化效果^[2]。

因此,专家将智能优化算法引入模糊 PID 中,利用算法整定出更加精确的模糊 PID 控制参数,以提高模糊 PID 控制的优化效果。文献[3]提出粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)优化模糊 PID 比例因子的恒力控制方法,有效地抑制了接触压力波动。文献[4]提出 PSO 算法优化模糊 PID 量化因子与比例因子的车载平衡方法,解决了平衡控制系统响应速度慢,稳定性差的问题。文献[5]提出灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)优化模糊 PID 初始化参数的发酵仓解耦控制方法,有效实现了降解环境的精确控制。文献[6]提出遗传算法(genetic algorithm, GA)优化模糊 PID 隶属函数的温控方法,提高了塑料挤出机的响应速度与温度控制精度。文献[7]提出 GA 算法优化模糊 PID 控制规则表的环境实验舱温控方法,解决了环境实验舱温度数据波动大,控制精度难的问题。但无论是 PSO 算法、GWO 算法以及 GA 算法,这些算法的局部搜索能力差,收敛精度不高,迭代后期易陷入局部最优。

而优化量化因子与比例因子要求算法具有较高的搜索精度与搜索范围,蜣螂算法(dung beetle optimizer, DBO)凭借独特的搜索机制与能力,寻优能力强,搜索范围大,不易陷入局部最优^[8]。为了提高试验箱温控系统的响应速度与稳定性,提出一种基于 DBO 算法优化模糊 PID 量化因子与比例因子的温度控制方法,建立高低温试验箱加热模型传递函数,在 Simulink 中搭建 DBO 优化模糊 PID 控制的温控系统模型,并与传统 PID、模糊 PID、以及 PSO 优化模糊 PID 控制的温控系统模型进行仿真对比,开展温控算法对比实验进行效果验证,补充检测 DBO 优化出的最佳量化因子与比例因子在不同温度下的温控效果,结果表明 DBO 算法优化模糊 PID 量化因子

与比例因子进一步提高试验箱温控系统的响应速率与稳定性。

1 试验箱整体结构与工作原理

高低温试验箱主要由送风机、蒸发器、压缩机、冷凝器和加热丝等组成。加热系统依靠加热丝产生热量,制冷系统采用压缩式制冷,依靠冷凝器、压缩机、蒸发器三者协同运作^[9],试验箱整体结构如图 1 所示。

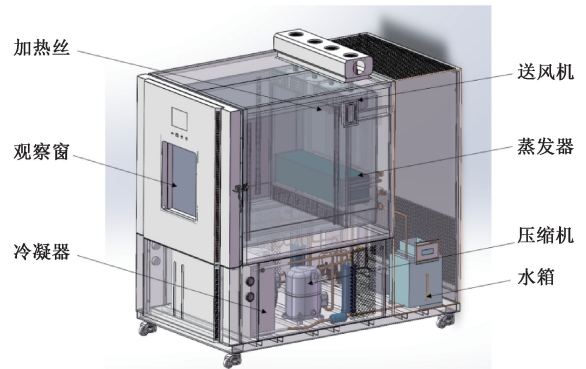


图 1 试验箱整体结构

Fig. 1 The overall structure of the test chamber

试验箱温度控制系统以设定温度与反馈温度的差值作为输入量,经过 PID 运算得到控制量,并将其转变为 PWM 控制信号,实现温度精确控制^[10]。试验箱通过送风机循环空气,当温度在 47 °C 以下时,加热和制冷系统协同运行,使箱内温度快速稳定;当温度在 47 °C 以上时,仅加热系统运行,响应速度慢,调节时间长,增大了精确控制温度的难度^[11]。而模糊 PID 控制虽能弥补上述不足,但受量化因子和比例因子人工拟定的限制,无法获得较好的控制参数。因此,需要智能算法优化模糊 PID 来提高系统响应速度与稳定性。

2 DBO 优化的模糊 PID 模型设计

2.1 试验箱加热模型

高低温试验箱内部采用电加热方式,设加热丝的两端电压为 U ,电阻为 r ,质量为 m ,比热容为 c ,产生热量为 $Q(t)$,试验箱初始温度为 T_0 ,加热稳定后的温度为 T_1 ,根据热力学原理可得:

$$Q(t) = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0) \quad (1)$$

则在单位时间内加热丝产生的热量 P 为:

$$P = c \cdot m \cdot \frac{d(T_1 - T_0)}{dt} \quad (2)$$

当加热稳定后的温度 T_1 远大于箱内初始温度 T_0 时,加热丝则会向外传热,设加热丝的传热系数为 H ,传热面积为 A ,则传热热阻 $R = HA$ 。

加热丝传热功率 P_i 为:

$$P_i = R \cdot (T_1 - T_0) \quad (3)$$

加热丝的变化功率 ΔP 用于自身升温及向外传热,根据能量守恒定律可知:

$$\Delta P = c \cdot m \cdot \frac{d(T_1 - T_0)}{dt} + R \cdot (T_1 - T_0) \quad (4)$$

加热丝功率又可表示为:

$$P = \frac{U^2}{r} \quad (5)$$

将式(5)两边取微分代入到式(4)中得:

$$\frac{2U}{HA r} \cdot \Delta U = \frac{mc}{HA} \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T \quad (6)$$

令 $K = \frac{2U}{HA r}$, $T = \frac{mc}{HA}$,化简得:

$$K \cdot \Delta U = T \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T \quad (7)$$

将式(7)进行拉普拉斯变化:

$$K \cdot \Delta U(s) = T \cdot s \cdot \Delta T(s) + \Delta T(s) \quad (8)$$

化简式(8)可得:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (9)$$

考虑到高低温试验箱的加热过程呈非线性关系,温度控制系统中的物理特性随着时间的改变而变化,且传感器与执行器等作用于控制系统有延迟时间^[12],故在设计试验箱温控系统加热模型的传递函数后面引入滞后环节^[13],所以高低温试验箱温度控制系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} e^{-\tau s} \quad (10)$$

式中: K 为增益, T 为时间常数, τ 为滞后时间常数。根据测得的实验数据,采用最小二乘法确定上述参数,得到 $K=1, T=174, \tau=30$ 。

2.2 模糊 PID 控制

模糊 PID 控制是在传统 PID 控制的基础上加入模糊控制策略^[14]。模糊控制器以误差值 E 及误差变化率 dE/dt 作为输入,依次经过输入信号模糊化,模糊规则推理及解模糊的过程,输出 3 个 PID 参数修正量,即 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,实现实时修正 PID 参数。

PID 参数调整公式为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (11)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为修正后的比例、积分、微分系数, K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为 PID 控制参数的初值。

将误差 E 和误差变化率 dE/dt 的模糊集论域拟定为 $[-25, 25]$, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊论域拟定为 $[-3, 3]$,定义 7 个模糊子集 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。为了便于计算,模糊子集均使用三角形隶属度函数。模糊规则制定要求如下:误差较大时, K_p 取较大, K_i 和 K_d 取较小;误差和误差变化率处在中间大小时, K_p 取较小, K_i 和 K_d 取中间;误差较小时, K_p 取较小, K_i 和 K_d 取较大。模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB ZO PS	PB ZO NS	PM NB NB	PM NM NB	PS NS NB	ZO ZO NM	ZO ZO PS
NM	NB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PS NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS ZO ZO
NS	NM NB ZO	PM NM NS	PM NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS PS NS	NS PS ZO
e	ZO PM NS ZO	PM NM NS	PS NS NS	ZO ZO NS	NS PS NS	NM PM NS	NM PM ZO
PS	PS NS ZO	PS NS ZO	ZO ZO ZO	NS PS ZO	NS PS ZO	NM PM ZO	NM PB ZO
PM	PS ZO PB	ZO ZO NS	NS PS PS	NM PS PS	NM PM PS	NM PB PS	NB PB PB
PB	ZO ZO PB	ZO ZO PM	NM PS PM	NM PM PM	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB

量化因子与比例因子的选取与其各个变量的实际论域和模糊论域有关,设量化因子的实际论域为 $[C_{\min}, C_{\max}]$,模糊论域为 $[-m, m]$,比例因子的实际论域为 $[U_{\min}, U_{\max}]$,模糊论域范围为 $[-n, n]$,则量化因子 K_c 和比例因子 K_p 的传统经验公式为:

$$K_c = \frac{2m}{(C_{\max} - C_{\min})} \quad (12)$$

$$K_p = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{2n} \quad (13)$$

根据上式,未用算法优化前的模糊 PID 量化因子为 $K_e=0.131, K_{ec}=0.01$,比例因子为 K_p, K_i, K_d 均为 10。

2.3 DBO 优化模糊 PID 控制

DBO 算法灵感来源于蜣螂种群滚球、跳舞、繁殖、觅食、偷窃的社会行为^[15]。因此,将种群分为滚球蜣螂、繁

殖蜚螂、觅食蜚螂、偷窃蜚螂,进行局部搜索和全局搜索^[16]。在无障碍物时,滚球蜚螂依靠天体线索保持粪球直线滚动;遇到障碍物时,依靠跳舞调整方向。当粪球滚到安全的地方时,繁殖蜚螂就会在粪球里产卵,孕育觅食蜚螂^[17]。觅食蜚螂幼年依靠粪球里的营养,成年就会前往觅食区觅食。在觅食的过程中,一些被称为小偷的蜚螂会在觅食区偷取其他蜚螂的粪球^[18]。

无障碍时,滚球蜚螂的位置更新如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \times k \times x_i(t-1) + b \times |x_i(t) - X^w| \quad (14)$$

其中, t 表示当前迭代次数, $x_i(t)$ 表示第 i 只滚球蜚螂在第 t 次迭代时的位置, α 取 1 或 -1, $k \in (0, 0.2]$, b 表示 $(0, 1)$ 的常量, X^w 表示全局最差位置;

有障碍时,使用切线函数模拟蜚螂舞蹈行为,滚球蜚螂位置更新如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan(\theta) |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (15)$$

其中, θ 表示偏转角, $\theta \in [0, \pi]$ 。如果 θ 等于 $0, \pi/2$ 或 π 时,将不会更新蜚螂的位置;

繁殖蜚螂的产卵区采用边界选择策略,公式如下:

$$\begin{aligned} Lb^* &= \max(x^* \times (1 - R), Lb), \\ Ub^* &= \min(x^* \times (1 - R), Ub) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, x^* 表示当前局部最佳位置, Lb^* 表示产卵区下界, Ub^* 表示产卵区上界, $R = 1 - t/T_{\max}$, T_{\max} 表示最大迭代次数, Lb 表示优化问题下界, Ub 表示优化问题上界;

繁殖蜚螂位置更新如下:

$$x_i(t+1) = x^* + b_1 \times (x_i(t) - Lb^*) + b_2 \times (x_i(t) - Ub^*) \quad (17)$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 只繁殖蜚螂第 t 次迭代时的位置, b_1 和 b_2 表示大小为 $1 \times D$ 的独立向量;

觅食蜚螂要前往最佳觅食区觅食,最佳觅食区边界公式如下:

$$\begin{aligned} Lb^b &= \max(x^b \times (1 - R), Lb), \\ Ub^b &= \min(x^b \times (1 - R), Ub) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, x^b 表示全局最佳位置, Lb^b 表示最佳觅食区下界, Ub^b 表示最佳觅食区上界;

觅食蜚螂位置更新如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - Lb^b) + C_2 \times (x_i(t) - Ub^b) \quad (19)$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 只觅食蜚螂在第 t 次迭代时的位置, C_1 表示服从正态分布的随机数, C_2 表示 $(0, 1)$ 的随机向量;

偷窃蜚螂位置更新如下:

$$x_i(t+1) = x^b + S \times g \times (|x_i(t) - x^*| + |x_i(t) - x^b|) \quad (20)$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 只偷窃蜚螂在第 t 次迭代时的位置, S 表示常量, g 表示服从正态分布的大小为 $1 \times D$ 的随机向量;

优化模糊 PID 的量化因子和比例因子,要求较高的搜索精度和较大的搜索范围^[19]。由于滚球蜚螂有两种不同的搜索模式,能在空间进行更彻底的搜索,以避免陷入局部最优^[20];每个蜚螂个体能独立的搜索在空间中的解,能提高算法的搜索效率^[21];蜚螂不同的更新规则可以平衡局部和全局搜索能力,故采用 DBO 算法优化模糊 PID。

利用 DBO 算法分别优化模糊 PID 的量化因子 Ke 、 Ke_c 以及比例因子 K_1 、 K_2 、 K_3 ,经过算法不断迭代,利用适应度函数寻找最佳量化因子和比例因子,从而克服靠人工调节的弊端^[22], DBO 优化模糊 PID 控制结构如图 2 所示。

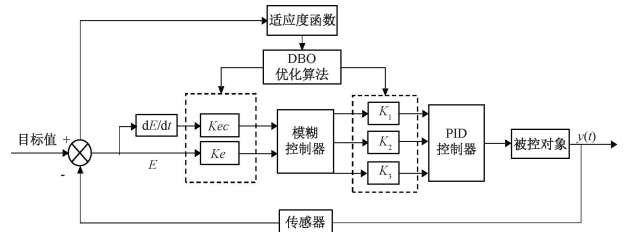


图 2 基于 DBO 优化模糊 PID 控制框图

Fig. 2 Optimized fuzzy PID control block diagram based on DBO

DBO 算法优化模糊 PID 参数流程如图 3 所示,步骤如下:

1) 初始化蜚螂种群。设置蜚螂种群个数分别为 40, 60 和 80,滚球蜚螂占比对应为 0.25, 0.2 和 0.15,最大迭代次数为 50,蜚螂最优适应度值对比如图 4 所示,最终采用蜚螂种群个数为 60,滚球蜚螂占比 0.2,最大迭代次数为 50。

2) 设置最小适应度值并计算个体的适应度,选取误差绝对值对时间的积分作为性能指标,适应度函数设置如下:

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (21)$$

式中: $e(t)$ 为试验箱设定温度值与反馈值之差, t 为时间。

3) 将滚球蜚螂、繁殖蜚螂、觅食蜚螂、偷窃蜚螂位置分别赋值给比例因子和量化因子,依次更新迭代,并在计算适应度值后与最小适应度值进行对比。

4) 若满足最小适应度值或达到最大迭代次数,则输出最佳蜚螂位置参数(最佳量化因子与比例因子);否则进入步骤 3)继续更新蜚螂位置。

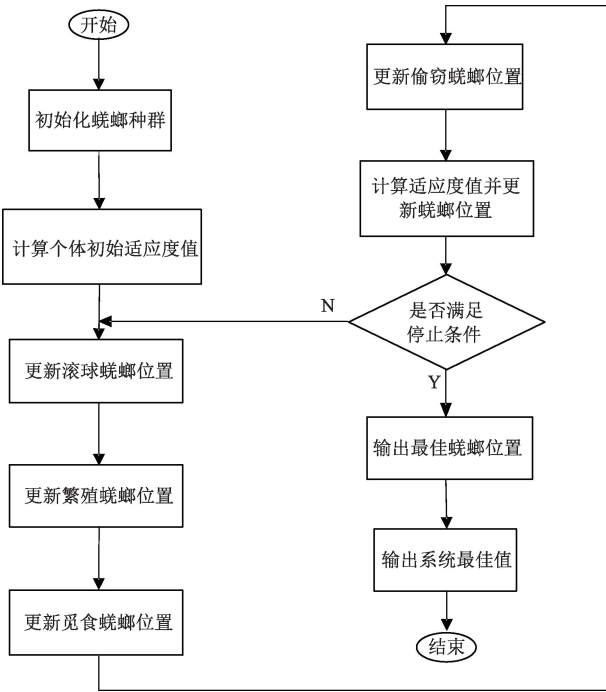


图 3 DBO 优化模糊 PID 参数流程图

Fig. 3 DBO optimization fuzzy PID parameter flow chart

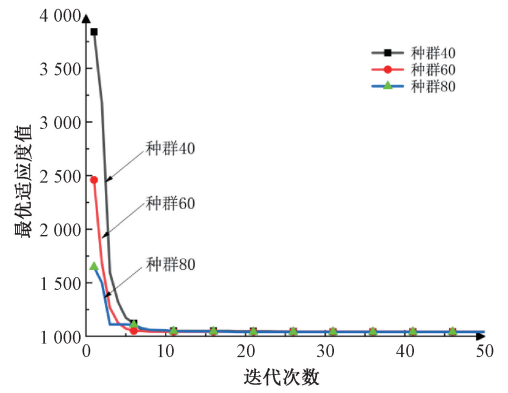


图 4 蜣螂最优适应度值对比图

Fig. 4 Comparison of optimal fitness values of dung beetles

3 仿真对比分析

为了对比 DBO 优化模糊 PID 的效果,本文搭建了传统 PID 控制模型、模糊 PID 控制模型、PSO 优化的模糊 PID 以及 DBO 优化的模糊 PID 控制模型,算法对比仿真模型如图 5 所示。传统 PID 通过 Z-N 法及实际调试效

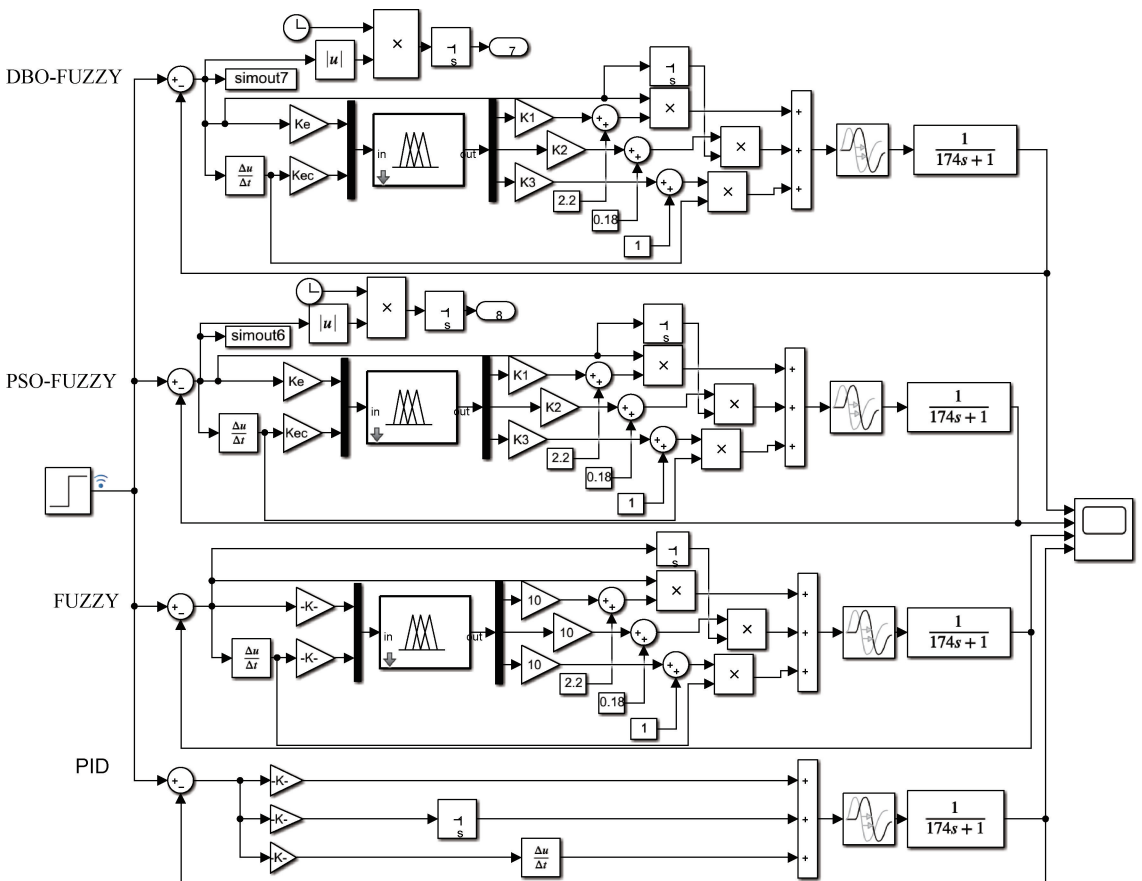


图 5 算法对比仿真模型

Fig. 5 The algorithm compares the simulation model

果,选择 $K_p=2.2$ 、 $K_i=0.18$ 、 $K_d=1$ 。将传统 PID 三个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 作为模糊 PID 的 3 个初始参数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 。未优化前的量化因子为 $Ke=0.131$ 、 $Kec=0.01$,比例因子为 K_1 、 K_2 、 K_3 均为 10。据图 4 所示,DBO 优化模糊 PID 迭代 8 次左右收敛,此时 DBO 优化模糊 PID 的量化因子为 $Ke=0.912$ 、 $Kec=0.149$,比例因子为 $K_1=2.641$ 、 $K_2=1.194$ 、 $K_3=0.031$ 。PSO 优化模糊 PID 的适应度值函数如图 6 所示,迭代 15 次左右收敛,此时 PSO 优化模糊 PID 的量化因子为 $Ke=0.571$ 、 $Kec=0.341$,比例因子为 $K_1=3.165$ 、 $K_2=1.463$ 、 $K_3=0.052$ 。

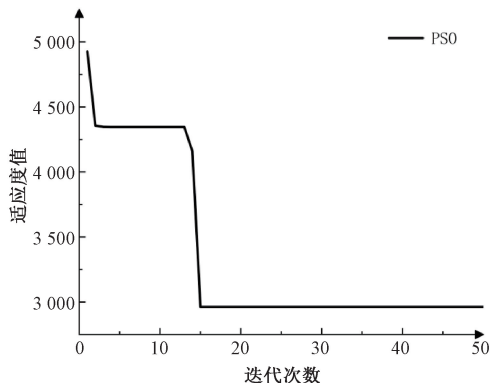


图 6 PSO 适应度值结果图

Fig. 6 PSO fitness value result graph

根据高低温试验箱国家标准,试验箱的温升速率 ≥ 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,试验箱的温降速率 ≥ 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 温度波动度为 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$,温度均匀度 ≤ 2 $^{\circ}\text{C}$,将起始温度设置为 30 $^{\circ}\text{C}$,目标温度设置为 60 $^{\circ}\text{C}$,仿真时间设置为 1 600 s。在示波器中观察不同算法下的曲线,算法对比仿真曲线如图 7 所示。

据仿真结果可知,传统 PID 控制超调 9.08%,响应时间为 1 280 s;模糊 PID 控制超调 4.3%,响应时间减小为 750 s;PSO 优化的模糊 PID 超调 1.6%,响应时间 610 s;而 DBO 优化的模糊 PID 相比前 3 种对参数优化的效果最好,超调仅 0.58%,系统响应时间为 504 s。调节时间对误差保持在终值的 2%,经仿真数据计算出温度波动度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$,符合国家标准。算法仿真性能指标如表 2 所示。

表 2 算法仿真性能指标

Table 2 Algorithm simulation performance index

	PID	FUZZY	PSO-FUZZY	DBO-FUZZY
超调量	9.08%	4.3%	1.6%	0.58%
调节时间	1 280 s	750 s	610 s	504 s

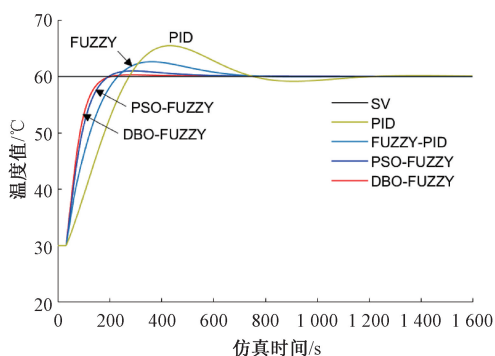


图 7 算法对比仿真曲线

Fig. 7 Algorithms compare simulation curves

4 实验对比验证

4.1 实验平台搭建

利用 PLC、PC 及触摸屏搭建高低温试验箱温控系统,PLC 负责编译控制程序,PC 负责算法运行及数据交换,触摸屏负责设定目标温度及历史数据导出,实验装置如图 8(a)所示。为了保证测温数据准确,由 4 路 PT100 铂电阻温度传感器采集实验箱温度,将其温度的平均值作为反馈值传入 PLC 主机^[23]。为了保证试验箱温度均匀,测温点布置如图 8(b)所示。经过 RS485 模块将温度数据从 PLC 主机上传至 PC 的 Simulink 模块进行运算,得到实时更新后的 PID 参数值,将其返回至 PLC 主机中编译,最终转化为 PWM 信号控制继电器通断,从而控制试验箱温度,实验流程原理如图 8(c)所示。用触摸屏设定目标温度为 60 $^{\circ}\text{C}$,每秒采集一次温度数据。

4.2 实验结果分析

由实验结果可知,DBO 优化的模糊 PID 超调量仅为 1%,系统响应时间为 580 s。DBO 优化的模糊 PID 超调量相较于 PSO 优化的模糊 PID 和模糊 PID,分别降低了 1.1%和 3.8%,调节时间分别减少了 120 s 和 330 s,实验温度对比曲线如图 9 所示。由于箱体不可避免存在热交换,周围环境温度变化也对实验产生影响,所以实验结果与仿真结果有所差异,实际实验性能指标如表 3 所示。

表 3 实际实验性能指标

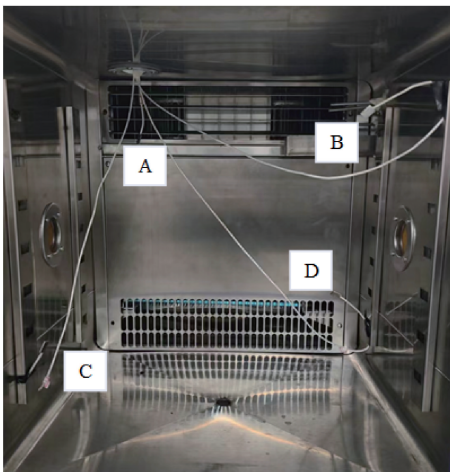
Table 3 Actual experimental performance index

	PID	FUZZY	PSO-FUZZY	DBO-FUZZY
超调量	12.5%	4.8%	2.1%	1%
调节时间	1 410 s	910 s	700 s	580 s

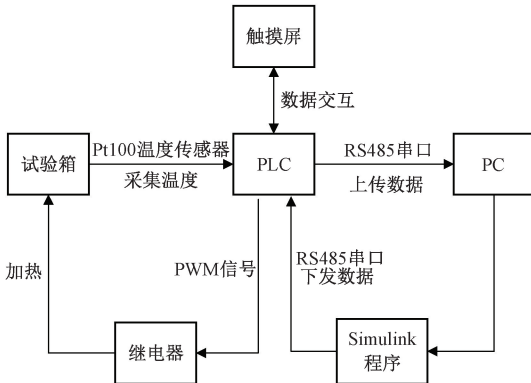
用 DBO 优化出的最佳量化因子与比例因子测试在不同温度下的温控效果,分别设定目标温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,



(a) 实验装置
(a) Experimental facility



(b) 测温点布置
(b) Temperature measuring point layout



(c) 实验流程原理
(c) Principle of experimental flow

图 8 实验测试

Fig. 8 Experimental test

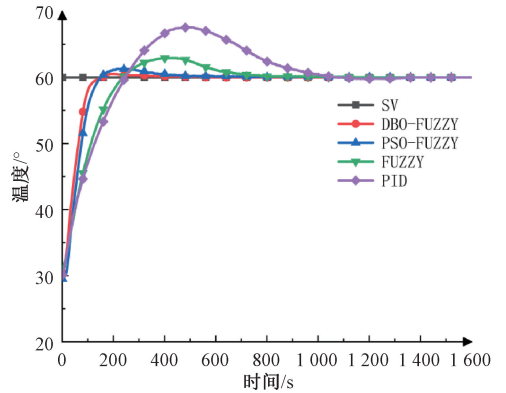


图 9 实验温度对比曲线

Fig. 9 Experimental temperature contrast curve

1.3 °C; 目标温度为 60 °C 时, 经计算温升速率为 15 °C/min, 温度波动度为 ± 0.25 °C, 温度均匀度为 1.2 °C, 符合国家标准。当进行 47 °C 以下温度实验时, 加热和制冷系统协同运行, 所以低温实验的温度控制效果较好, 不同温度性能指标对比如表 4 所示。

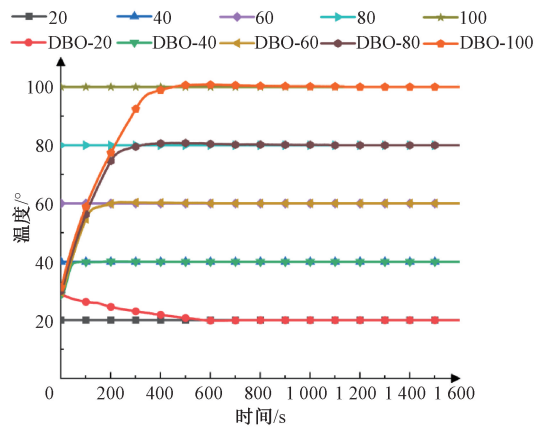


图 10 不同温度对比曲线

Fig. 10 Different temperature contrast curves

表 4 不同温度性能指标

Table 4 Different temperature performance indicators

	DBO-20	DBO-40	DBO-60	DBO-80	DBO-100
超调量	0.9%	0.25%	1%	0.87%	0.8%
调节时间	680 s	202 s	580 s	640 s	720 s

5 结论

模糊 PID 量化因子与比例因子的选取依赖人工经验, 限制了模糊 PID 的优化效果, 从而影响试验箱温控系统响应速度与稳定性。为了提高量化因子与比例因子的优化效果, 针对现有算法存在的局部搜索能力差, 收敛精度不高, 迭代后期易陷入局部最优等问题, 本文提出了一

40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C 进行试验, 不同温度对比曲线如图 10 所示。目标温度为 20 °C 时, 经计算温降速率为 1.15 °C/min, 温度波动度为 ± 0.2 °C, 温度均匀度为

种基于 DBO 算法优化模糊 PID 的高低温试验箱温控方法。首先建立了高低温试验箱加热模型的传递函数,将 DBO 算法引入到模糊 PID 中,即利用适应度函数寻找最佳量化因子和比例因子,搭建了传统 PID,模糊 PID 温度控制模型,增加了 PSO 优化模糊 PID 作为对比实验,补充了 DBO 优化出的最佳量化因子与比例因子在不同温度下的温控效果,最终搭建实验装置进行不同算法对比实验验证。实验表明了 DBO 算法优化模糊 PID,使试验箱温控系统的调节时间减少为 580 s,将温度超调减少为 1%,为高低温试验箱的温度控制提供了一种可行的策略。但由于蛭螂算法的迭代过程较为复杂,相较于 PSO 等算法仿真更加耗时,未来将致力于研究蛭螂算法的改进,进一步提升算法的运行效率。

参考文献

- [1] 孙琦,于兰英,吴文海. 电子产品高温试验箱的温度场分析及优化[J]. 中国测试, 2019, 45(12): 159-164.
SUN Q, YU L Y, WU W H. Analysis and optimization of temperature field in high temperature test chamber for electronic products [J]. China Test & Measurement, 2019, 45(12): 59-164.
- [2] LIU W J, ZHOU ZH Y, CAO Y H. Research on motor speed control based on the improved genetic algorithm to optimize fuzzy PID [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2704(1).
- [3] 刘运忠,姜宏,章翔峰. 基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 16-22.
LIU Y ZH, JIANG H, ZHANG X F. Research on fuzzy PID constant force control based on PSO optimization [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 46(9): 16-22.
- [4] 李翔宇,肖峻,潘运平. 基于 PSO 的模糊 PID 车载平台调平控制系统研究[J]. 现代制造工程, 2021, (2): 58-65.
LI X Y, XIAO J, PAN Y P. Research on fuzzy PID leveling control system for vehicle platform based on PSO [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021, (2): 58-65.
- [5] 张坤鳌,常云磊. 基于模糊灰狼 PID 的发酵仓解耦控制系统研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7): 19-23.
ZHANG K N, CH Y L. Research on fermentation warehouse decoupling control system based on fuzzy gray wolf PID [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 46(7): 19-23.
- [6] 孟锦涛,国海,王磊,等. 基于 GA 优化的模糊 PID 塑料挤出机温度控制系统设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 84-90.
MENG J T, GUO H, WANG L, et al. Temperature control system design of fuzzy PID plastic extruder based on GA optimization [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 84-90.
- [7] 王建刚,杨洪涛,于晓周,等. 大型气候环境试验舱冷热端温度动态模糊 PID 协调控制 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(24): 3159-3167.
WANG J G, YANG H T, YU X ZH, et al. Dynamic fuzzy PID coordinated control of temperature at hot and cold end of large climatic environment test chamber [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(24): 3159-3167.
- [8] LING ZH Y, WEN B J, YU Y, et al. Freight train speed active disturbance rejection tracking and wheel anti-slip based on fuzzy neural network with DBO optimization [J]. Electrical Engineering, 2023, 106(1): 631-644.
- [9] 李毅华,邓家一,季家东,等. 高低温试验箱内温度场实验及数值研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2293-2299.
LI Y H, DENG J Y, JI J D, et al. Experimental and numerical study of temperature field in high and low temperature test chamber [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2293-2299.
- [10] 郑晓腾,刘金平. 动力电池测试用高低温试验箱温度场分析与流场模拟优化 [J]. 制冷学报, 2024, 45(2): 119-126.
ZHENG X T, LIU J P. Temperature field analysis and flow field simulation optimization of high and low temperature test chamber for power battery testing [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(2): 119-126.
- [11] 周颖,王子龙,张华,等. 不同热端温度对低温热电制冷试验箱制冷性能的影响 [J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(1): 44-51.
ZHOU Y, WANG Z L, ZHANG H, et al. Effect of different hot end temperatures on refrigeration performance of Low temperature thermoelectric refrigeration test chamber [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2019, 46(1): 44-51.
- [12] 凌菁,滕召胜,张凯旋. 基于 Pt100 的红外干燥箱动态温度补偿方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 542-549.
LIING J, TENG ZH SH, ZHANG K X. Research on dynamic temperature compensation method of infrared drying oven based on Pt100 [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 542-549.
- [13] 冯旭刚,黄鹏辉,张泽辰,等. 基于 GA-模糊 RBF 的发电机组滑模自抗扰控制 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 319-328.

- FENG X G, HUANG P H, ZHANG Z CH, et al. GA-fuzzy RBF-based sliding mode self-immunity control for generator sets [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44 (8): 319-328.
- [14] 马相鹏,高海波,李程,等. 基于鲸鱼算法的养殖工船水泵模糊控制优化研究[J]. 渔业现代化, 2023, 50(3):48-55.
MA X P, GAO H B, LI CH, et al. Research on fuzzy control optimization of aquaculture boat pump based on whale algorithm [J]. Fishery Modernization, 2023, 50(3):48-55.
- [15] 孔令哲,林孟涵,卫永琴,等. 基于改进蜣螂算法的光伏 MPPT 控制[J/OL]. 电源学报, 1-12[2024-03-22].
KONG L ZH, LIN M H, WEI Y Q, et al. Photovoltaic MPPT control based on improved Dung Beetle algorithm [J/OL]. Journal of Power Sources, 1-12[2024-03-22].
- [16] 付雷,王骥. 改进蜣螂优化算法的海洋牧场三维 UWSN 覆盖方法[J/OL]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 1-8[2024-03-22].
FU L, WANG J. Three-dimensional UWSN coverage method for marine pasture with improved dung beetle optimization algorithm [J/OL]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 1-8[2024-03-22].
- [17] 董志民,乔栋,朱守健,等. 蜣螂算法优化 k-means 在煤矸石图像分割的应用[J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(12):23-26.
DONG ZH M, QIAO D, ZHU SH J, et al. Application of dung beetle algorithm optimization k-means in coal gangue image segmentation [J]. Shanxi Coking Coal Technology, 2023, 47(12):23-26.
- [18] 郑修斌,陈珺. 基于蜣螂优化算法的光伏电池参数辨识[J/OL]. 广西师范大学学报(自然科学版), 1-14[2024-03-22].
ZHENG X B, CHEN J. Parameter identification of photovoltaic cells based on dung beetle optimization algorithm [J/OL]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 1-14[2024-03-22].
- [19] 甄然,袁明明,武晓晶,等. 基于改进蜣螂算法的无人机航迹规划[J/OL]. 无线电工程, 1-13[2024-03-22].
ZHEN R, YUAN M M, WU X J, et al. UAV flight path planning based on improved Dung Beetle algorithm [J/OL]. Radio Engineering, 1-13[2024-03-22].
- [20] 远翔宇,杨风暴,杨童瑶. 基于自适应蜣螂算法的无人机三维路径规划方法[J/OL]. 无线电工程, 1-8[2024-03-22].
YUAN X Y, YANG F B, YANG T Y. UAV 3D path planning method based on adaptive Dung Beetle algorithm [J/OL]. Radio Engineering, 1-8[2024-03-22].
- [21] 潘志远,卜凡亮. 基于蜣螂算法优化的 DV-Hop 定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7):33-41.
PAN ZH Y, BU F L. DV-Hop localization algorithm based on dung beetle algorithm optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7):33-41.
- [22] 周亚中,何怡刚,邢致恺,等. 基于 IDBO-ARIMA 的电力变压器振动信号预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8):11-20.
ZHOU Y ZH, HE Y G, XING ZH K, et al. Prediction of power transformer vibration signal based on IDBO-ARIMA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8):11-20.
- [23] 乔诗翔,李豪杰,于航,等. 高低温环境对三轴高 g 值加速度传感器灵敏度变化影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5):240-248.
QIAO SH X, LI H J, YU H, et al. Study on the effect of high and low temperature on the sensitivity change of three-axis high g-value acceleration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5):240-248.

作者简介



杨洪涛, 2007 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为安徽理工大学教授, 主要研究方向为现代精度理论、自动化测控系统。
E-mail: lloid@163.com

Yang Hongtao received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2007. Now he is a professor in Anhui University of Science and Technology. His main research interests include modern precision theory and automatic measurement and control system.



金磊(通信作者), 2022 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为安徽理工大学硕士研究生, 主要研究方向为高低温试验箱温度控制系统性能提升。
E-mail: 778435787@qq.com

Jin Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include high and low temperature test chamber temperature control system performance improved.