

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.018

改进白鲸算法的注塑机料筒温度模糊PID控制

王力, 刘大鹏, 张磊

(沈阳化工大学机械与动力工程学院, 沈阳 110142)

摘要:针对注塑机料筒温度控制系统存在大滞后、非线性及参数时变性,导致模糊PID控制器难以满足高精度要求的问题,提出一种改进白鲸优化(IBWO)算法对模糊PID控制器量化因子和比例因子进行寻优。首先,针对标准白鲸优化(BWO)算法存在的早熟收敛及种群多样性丧失的问题,引入Tent混沌映射初始化种群,增强初始解的遍历性和均匀性。其次,采用非线性余弦自适应权重因子动态调节位置更新步长,有效平衡算法的全局探索与局部开发能力。最后,在迭代后期引入柯西变异算子对最优个体进行扰动,并结合贪婪选择策略加快收敛速度。研究表明,IBWO算法收敛精度优于标准BWO和粒子群优化(PSO)算法。在控制性能上,经过IBWO算法优化的模糊控制系统相比于BWO算法优化的模糊控制系统超调量降低3.78%,调节时间缩短93.3 s,同时该系统能以最快速度抑制波动并恢复稳态。该控制策略有效解决了算法早熟收敛问题,并在动态响应、控制精度及鲁棒性方面均优于传统方法,为注塑成型工艺中的精密温度控制需求提供了可靠的解决方案。

关键词: 注塑机;料筒温度控制;模糊PID;白鲸优化算法;参数优化

中图分类号: TQ320.66, TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0159-08

Fuzzy PID control of injection moulding machine barrel temperature based on an improved beluga algorithm

WANG Li, LIU Dapeng, ZHANG Lei

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: To address the issues of large time-delay, nonlinearity, and parameter time-variance in the barrel temperature control system of injection molding machines, which make it difficult for conventional fuzzy PID controllers to meet high-precision requirements, an Improved Beluga Whale Optimization (IBWO) algorithm was proposed to optimize the quantization and scaling factors of a fuzzy PID controller. Firstly, to overcome the issues of premature convergence and loss of population diversity in the standard Beluga Whale Optimization (BWO) algorithm, a Tent chaotic map was introduced to initialize the population, thereby enhancing the ergodicity and uniformity of the initial solutions. Secondly, a nonlinear cosine adaptive weight factor was employed to dynamically adjust the position update step size, effectively balancing the algorithm's global exploration and local exploitation capabilities. Finally, a Cauchy mutation operator was integrated in the late iterations to perturb the optimal individual, combined with a greedy selection strategy to accelerate convergence. Research results indicate that the convergence accuracy of IBWO algorithm outperforms both the standard BWO and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms. In terms of control performance, the fuzzy control system optimized by IBWO algorithm achieves a 3.78% of reduction in overshoot and a 93.3 s of decrease in settling time compared to the system optimized by BWO algorithm. Furthermore, the proposed system can suppress fluctuations and restore steady-state conditions at the fastest speed. This control strategy effectively resolves the issue of premature convergence in algorithm and demonstrates superior performance in dynamic response, control precision, and robustness compared to traditional methods, providing a reliable solution for the precision temperature control requirements in injection molding processes.

Keywords: injection molding machine ; barrel temperature control ; fuzzy PID ; beluga whale optimization algorithm ; parameters optimization

基金项目: 辽宁省人工智能领域科技计划重大科技专项(2023JH26-10100002), 沈阳化工大学达标立项项目(2023DB008)

通信作者: 王力, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要研究方向为机电设备控制系统开发及仿真

收稿日期: 2026-01-22

引用格式: 王力, 刘大鹏, 张磊. 改进白鲸算法的注塑机料筒温度模糊PID控制[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(4): 159–166.

WANG Li, LIU Dapeng, ZHANG Lei. Fuzzy PID control of injection moulding machine barrel temperature based on an improved beluga algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 159–166.

在塑料加工领域,注塑制品质量与生产效率直接受制于注塑机料筒温度的控制精度^[1]。由于注塑过程具有大惯性、大滞后、非线性和时变特性^[2],传统PID控制在工况波动时难以兼顾响应速度与超调量,难以满足精密注塑需求^[3-4]。为解决上述问题,李珊珊等^[5]和曹华等^[6]采用模糊PID控制在线调整PID参数,在一定程度上提高了系统的自适应能力和温度控制精度。但模糊规则及隶属度参数通常依赖专家经验或试凑法,难以达到全局最优,限制了控制性能的进一步提升^[7]。近年来,已有研究将差分进化^[8]、遗传算法^[9]及粒子群算法(PSO)引入控制系统,以提升系统鲁棒性与响应速度。但上述算法在处理复杂非线性问题时,仍存在易陷入局部最优、收敛精度有限等不足。白鲸优化(BWO)算法凭借独特的捕食与鲸落机制,在平衡探索与开发能力方面表现优异^[10]。孙潇等^[11]采用改进的白鲸优化算法优化PID参数,能够实现更优的控制性能和更精确的系统响应。

综上所述,一方面,模糊控制器的关键参数往往依赖经验选取或简单寻优,难以获取全局最优解;另一方面,传统群智能算法在复杂空间中易受“局部极值”与“种群多样性丧失”限制,导致系统在抗干扰能力与动态响应指标上难以达成最优平衡。因此,本文提出一种改进白鲸优化(IBWO)算法用于优化注塑机料筒温度的模糊PID控制系统参数。通过引入Tent混沌映射、非线性余弦自适应权重因子和柯西变异及贪婪选择策略,帮助算法跳出局部极值并提升收敛精度。本文通过仿真验证了该控制策略在动态响应速度、抗干扰能力及鲁棒性方面的优势。

1 料筒温度模型建立

注射成型是将一种将热塑性或热固性塑料材料转化为所需形状零件的周期性制造过程^[12]。注塑机料筒的结构图如图1所示,料筒沿轴向在功能上被划分为进料区(I段)、压缩区(II段)和计量区(III段)。实际注塑过程中,由于进料区、压缩区和计量区设定的塑化温度不同,且塑料熔体停留的塑化时间存在差异,各温区的传递函数参数会有所不同。针对这一结构,系统硬件采用了多区独立控制架构:各温控区均配备电阻式加热带作为热源输入,并采用高精度热电偶作为反馈元件。在控制过程

中,控制器通过采集实时温度信号,利用脉宽调制(PWM)技术驱动固态继电器(SSR),从而输出控制指令动态调整施加在加热丝上的功率,以此达成对注塑机料筒温度的精准调控。

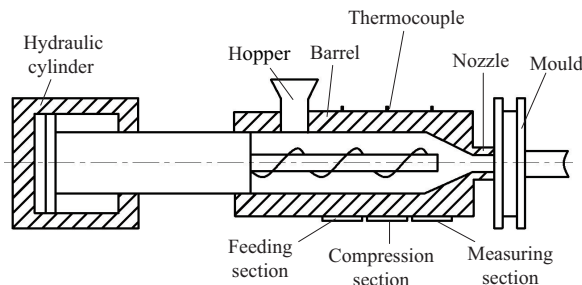


图1 注塑机料筒结构图

Fig. 1 Injection molding machine barrel structural diagram

以注塑机料筒计量区(III段)为控制对象,设定温度为控制目标,根据能量守恒定律,该加热区的动态热力学方程见式(1)。

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P_{in}(t) - \frac{T(t) - T_0}{R} \quad (1)$$

式中: C 为料筒热容; $T(t)$ 为料筒该段的实时温度; $P_{in}(t)$ 为电加热器的输入功率; T_0 为环境温度; R 为热阻; t 为加热时间。

令 $\Delta T(t)$ 为温度相对于平衡点的变化量, $\Delta P(t)$ 为功率变化量。由于环境温度 T_0 为常数,其导数为零,将上述方程线性化并整理,可得式(2)。

$$T_p \frac{d\Delta T(t)}{dt} + \Delta T(t) = K \cdot \Delta P(t) \quad (2)$$

式中: $T_p = RC$,为系统的时间常数; K 为系统的静态增益。

鉴于料筒温度控制存在滞后特性,需要加入滞后时间 τ ,由拉普拉斯变换,可以得到式(3)。

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta P(s)} = \frac{K}{T_p s + 1} e^{-\tau s} \quad (3)$$

式中: $G(s)$ 为传递函数; $\Delta T(s)$ 为输出变量的拉普拉斯变换; $\Delta P(s)$ 为输入变量的拉普拉斯变换; s 为拉普拉斯算子。因此,注塑机料筒所对应的数学模型呈现为一阶惯性环节与滞后环节相结合的传递函数形式。

2 模糊控制系统设计

此设计采用Mamdani模糊控制器,选取实际温度与系统设定温度之间的误差 e 以及误差变化率 ec 作为输入变量,同时设定 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 为输出变量,由此构建二输入三输出的系统结构。控制系统中

模糊PID的控制流程为:先归纳专家经验与知识以制定规则,进而将这些规则整合为模糊规则库;接着,反馈装置把传感器采集到的物理信号转化为电信号并传输给温度控制器,通过将设定值与温度作比较得出差值,以此获取偏差 e 和偏差变化率 ec 。通过量化因子 K_e 和 K_{ec} 调整控制信号,与模糊规则匹配以获得模糊量,并且通过比例因子 K_{up} 、 K_{in} 和 K_{out} 调整模糊量以获得 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d ,然后传递给PID控制器完成 k_p 、 k_i 和 k_d 的调整,最后将输出信号施加到执行器完成整个控制过程^[13]。模糊PID控制器原理如图2所示。

e 和 ec 的模糊论域为 $[-3, 3]$, Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的模糊论域为 $[-3, 3]$,模糊子集定义为NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB,分别代表负大、负中、负小、零、正小、正

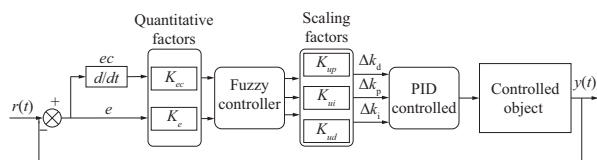


图2 模糊PID控制器原理图

Fig. 2 Fuzzy PID controller schematic diagram

表1 $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$ 模糊规则表Tab. 1 $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$ fuzzy rule table

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PB	PB/NB/PB	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PB/NB/PB	PB/NB/PB
NM	PB/NB/PB	PB/NB/PM	PM/NM/PS	PM/NM/PS	PM/NM/PS	PB/NB/PM	PB/NB/PB
NS	PM/NM/PM	PS/NM/PS	PS/NS/Z	Z/NS/Z	PS/NS/Z	PM/NM/PS	PM/NM/PM
Z	PM/NM/PM	PS/NM/PS	PS/NS/Z	Z/NS/Z	PS/NS/Z	PM/NM/PS	PM/NM/PM
PS	PM/NM/PM	PM/NM/PS	PS/NS/Z	PS/NS/Z	PS/NS/Z	PM/NM/PS	PM/NM/PM
PM	PB/NB/PB	PB/NB/PM	PM/NM/PS	PM/NM/PS	PM/NM/PM	PM/NB/PM	PB/NB/PB
PB	PB/NB/PB	PB/NB/PB	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PM/NM/PM	PB/NB/PB	PB/NB/PB

3 改进策略

3.1 标准BWO算法

BWO算法的寻优过程包含初始化、探索阶段、开发阶段以及鲸落阶段。算法的各个阶段实现过程如下。

3.1.1 种群初始化

假设白鲸种群规模为 N ,搜索空间维度为 D 。将每只白鲸视为一个搜索代理,其位置矩阵 X 表示见式(4)。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,D} \end{bmatrix} \quad (4)$$

相应的白鲸种群适应度函数值存储于列向量

中以及正大。在隶属度函数的选取上,采用三角函数形式,去模糊化方法运用面积重心法。 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 参数的整定原则如下:

(1)在加热阶段,若实际温度与预设目标温度存在较大差异,为使温度快速响应,需取较大的 Δk_p 值;而为了防止积分饱和引发超调,则应取较小的 Δk_i 值。

(2)在过渡阶段,当偏差处于中等水平时,为降低超调量,应取较小的 Δk_p 值;为确保响应速度,应取中等的 Δk_i 和 Δk_d 值。

(3)在正常恒温工作阶段,当偏差较小时,应取较大 Δk_p 和 Δk_i 值以提升系统的稳态性能;为避免振荡,无论偏差变化率大小,通常应取较小或零的 Δk_d 值,以避免放大传感器的高频噪声,确保控制过程的平稳性。

本研究归纳出49条模糊条件语句,针对注塑机料筒在不同 e 值和 ec 值下的输出变量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d ,定义了适用模糊规则表并写入模糊规则库,具体见表1。

E_x 中,其列向量 E_x 表达式见式(5)。

$$E_x = \begin{bmatrix} f(x_{1,1}, x_{1,2}, \cdots, x_{1,D}) \\ f(x_{2,1}, x_{2,2}, \cdots, x_{2,D}) \\ \vdots \\ f(x_{N,1}, x_{N,2}, \cdots, x_{N,D}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

BWO算法可以从探索阶段平滑过渡到开发阶段,平衡因子 B_f 在每次迭代中的计算公式见式(6)。

$$B_f = B_0 \left(1 - \frac{t}{2T_{\max}} \right) \quad (6)$$

式中: t 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数; B_0 的取值范围为 $(0, 1)$,且随机变化。当 B_f 大于0.5时,种群将进入探索阶段;否则,进入开发阶段。

3.1.2 探索阶段

在探索阶段成对白鲸不断游动进行位置更新,白鲸的位置更新表达式见式(7)。

$$\begin{cases} X_{i,j}^{t+1} = X_{i,p_j}^t + (X_{r,p_1}^t - X_{i,p_j}^t)(1 + r_1)\sin(2\pi r_2), \\ j = \text{even} \\ X_{i,j}^{t+1} = X_{i,p_j}^t + (X_{r,p_1}^t - X_{i,p_j}^t)(1 + r_1)\cos(2\pi r_2), \\ j = \text{odd} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $X_{i,j}^{t+1}$ 为第*i*条白鲸在第*j*维更新后的位置; X_{i,p_j}^t 为第*i*条白鲸的当前位置; P_j 为*D*维上选择的随机数, $j = 1, 2, \dots, D$; r_1 和 r_2 为(0,1)之间的任意数。

3.1.3 开发阶段

在开发阶段,白鲸通过共享位置信息协同捕食。为了增强局部收敛精度,在位置更新中结合了Levy飞行,其位置更新公式见式(8)。

$$X_i^{t+1} = r_3 X_{\text{best}}^t - r_4 X_i^t + C_1 \cdot L_F(X_r^t - X_i^t) \quad (8)$$

式中: X_{best}^t 为当前迭代时白鲸的最佳位置; r_3 和 r_4 为(0,1)之间的任意数; X_i^t 和 X_i^{t+1} 为当前迭代和下一次迭代时白鲸的位置; X_r^t 为随机白鲸的目前位置; C_1 为Levy飞行的随机跳跃强度,其公式见式(9); L_F 是Levy飞行函数,其数学表达式见式(10)。

$$C_1 = 2r_4 \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right) \quad (9)$$

$$L_F = 0.05 \frac{\mu\sigma}{|\nu|^{1/\beta}} \quad (10)$$

式中: σ 的表达式见式(11)。

$$\sigma = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right] \quad (11)$$

式中: Γ 代表Gamma函数; μ 和 ν 是正态分布的随机值; β 为默认常数1.5。

3.1.4 鲸落阶段

当迭代过程满足鲸落概率 W_f 时,算法模拟白鲸死亡下沉的过程,以微小步长重新生成位置,从而改变种群分布,帮助算法跳出局部极值。此时白鲸位置的更新公式见式(12)。

$$X_i^{t+1} = r_5 X_i^t - r_6 X_r^t + r_7 X_{\text{step}} \quad (12)$$

式中: r_5 、 r_6 和 r_7 为(0,1)范围内的随机数。 X_{step} 为白鲸坠落的步长,其计算公式见式(13)。

$$X_{\text{step}} = \left[(u_b - l_b) \exp\left(-\frac{C_2 t}{T_{\max}}\right) \right] \quad (13)$$

式中: u_b 和 l_b 为变量的范围约束。 C_2 为步长因子,与白鲸坠落概率和种群大小有关,其计算公式见式(14)。

$$C_2 = 2W_f n \quad (14)$$

式中: n 为[0,1]的随机数; W_f 为白鲸坠落的概率,其计算公式见式(15)。

$$W_f = 0.1 - 0.05 \frac{t}{T_{\max}} \quad (15)$$

随着迭代进行, W_f 逐渐减小,表明在优化后期白鲸更接近食物源,死亡风险降低,算法趋于稳定。

3.2 IBWO算法

尽管BWO算法具备结构简单、参数少且在处理一般优化问题时表现出较好的可扩展性,但在面对高维复杂多峰函数时,该算法仍存在种群多样性下降快、容易早熟收敛等缺陷。为了克服上述局限,本文在标准BWO的基础上引入帐篷(Tent)混沌映射、非线性自适应权重和柯西变异扰动三种策略。这些改进显著增强了算法摆脱局部极值束缚的能力,协调了全局探索与局部开发的平衡,从而显著提升了算法的求解精确度和收敛速率。IBWO的算法流程如图3所示。

3.2.1 Tent混沌映射策略

混沌系统具有遍历性、随机性以及初始条件的高度敏感性,这些特性使其在优化算法中具有加速收敛的巨大潜力^[14]。初始种群的分布质量直接影响白鲸优化算法的寻优效率。虽然Logistic映射在优化领域应用广泛,但其概率密度函数呈现“两端高、中间低”的特点,导致产生的混沌序列在解空间内的分布不均。相比之下,Tent映射具有更优越的均匀遍历性。

采用Tent映射生成的混沌序列,能够使白鲸个体在初始化阶段更均匀地散布在整个搜索空间中,从而有效减少搜索盲区,增强种群的多样性。这不仅有助于算法在早期产生丰富的混沌行为以探索全局最优,还能利用Tent映射较快的迭代速度加速最优解的识别。广义Tent混沌映射的数学表达式见式(16)。

$$Z_{i+1} = \begin{cases} \frac{Z_i}{u}, & 0 \leq Z_i \leq u \\ \frac{1 - Z_i}{1 - u}, & u \leq Z_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: Z_i 为当前迭代的混沌序列; Z_{i+1} 为下一次迭代的混沌序列; u 为(0,1)范围内的随机数。引入

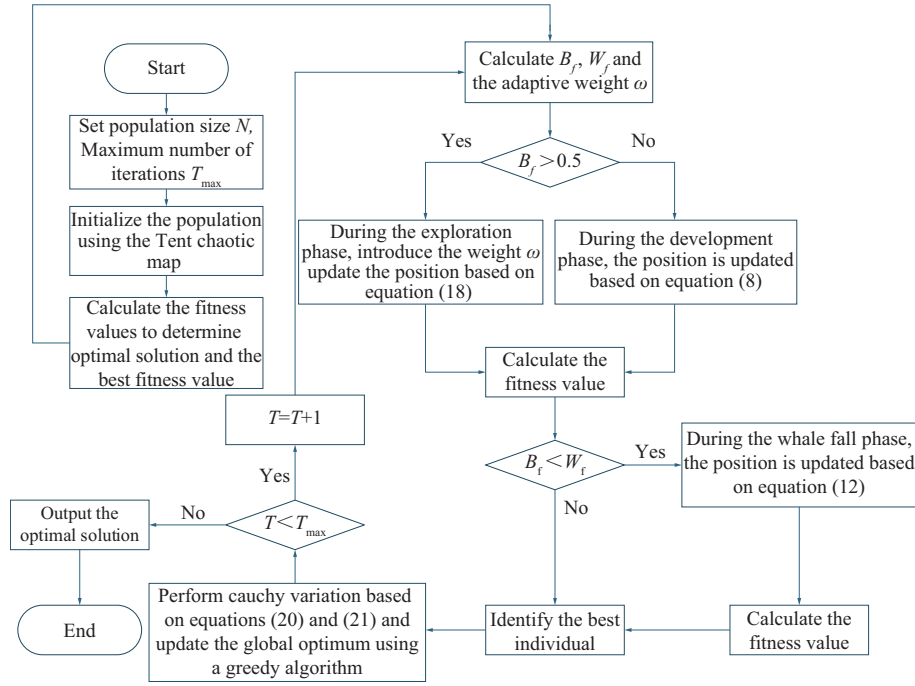


图3 IBWO的算法流程图

Fig. 3 IBWO algorithmic process diagram

Tent混沌策略后的IBWO算法拥有分布更广阔且均匀的初始种群。这一改进使白鲸在捕食行为的初期能够覆盖更大的搜索范围,大幅提升了算法在全局范围内的搜索效能,并为后续的快速收敛奠定了基础。

3.2.2 非线性自适应权重策略

在标准BWO的探索阶段,白鲸个体的位置更新主要依赖于当前位置与随机选取个体之间的差分向量,且该更新过程缺乏动态调节机制。这种固定的搜索模式使得算法难以在复杂的搜索过程中灵活调整步长,容易导致迭代初期全局勘探能力不足或迭代后期陷入局部震荡。针对注塑机料筒温度控制系统所表现出的大滞后、强非线性特征,优化算法需具备良好的平衡能力:在搜索初期,应能快速遍历解空间以精准锁定最优参数区域;在搜索后期,则需切换至精细化局部搜索模式,通过微调参数来有效消除系统稳态误差。为此,本文引入一种随迭代次数呈非线性递减的余弦自适应权重因子 $\omega(t)$ 。相较于线性权重,余弦权重具有更平滑的变化曲线,能够使算法在迭代初期保持较大的权重值,从而有效增强全局搜索的步长范围,使搜索过程更具广泛性,进而避免算法过早收敛而陷入局部最优解的困境;而在迭代后期,权重值迅速衰减,从而限制搜索步长,增强局部收敛精度^[15]。权重 $\omega(t)$

的计算公式见式(17)。

$$\omega(t) = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T_{\max}}\right) \quad (17)$$

式中: t 为当前迭代次数; $\omega_{\max}$ 为权重的最大值; $\omega_{\min}$ 为权重的最小值; $T_{\max}$ 为最大迭代次数。根据经验,通常取 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$ 以保证权重在 $[0.4, 0.9]$ 区间内变化,符合惯性权重的经典设定。

将该自适应权重引入标准BWO的探索阶段(成对游泳阶段),改进后的位置更新公式见式(18)。

$$\begin{cases} X_{i,j}^{t+1} = \omega(t) \cdot X_{i,p_j}^t + (X_{r,p_1}^t - X_{i,p_j}^t)(1 + r_1)\sin(2\pi r_2), \\ j = \text{even} \\ X_{i,j}^{t+1} = \omega(t) \cdot X_{i,p_j}^t + (X_{r,p_1}^t - X_{i,p_j}^t)(1 + r_1)\cos(2\pi r_2), \\ j = \text{odd} \end{cases} \quad (18)$$

通过 $\omega(t)$ 的调节,IBWO能够更平滑地平衡全局探索与局部开发,有效避免了因搜索步长控制不当导致的收敛震荡现象。

3.2.3 柯西变异扰动策略

在BWO算法的迭代后期,随着白鲸个体向最优解聚集,种群多样性迅速下降。如果此时全局最优解 X_{best} 位于局部极值点而非全局最优点,整个种群将陷入停滞状态,难以跳出局部陷阱。为了解决这一“早熟收敛”问题,本文引入柯西变异算子对算

法迭代过程中确定的全局最优个体实施动态扰动操作。

柯西分布是一种具有无限二阶矩的连续概率分布。与高斯分布相比,柯西分布具有显著的“长尾”特征,即在远离零点的区域仍具有较高的概率密度。这意味着利用柯西变异既能产生较小的扰动以进行局部微调,也有较大概率产生较大的突变步长,从而帮助个体瞬间跳出当前的局部停滞区域^[16]。柯西分布的概率密度函数公式见式(19)。

$$f(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}, x \in (-\infty, +\infty) \quad (19)$$

在本文提出的IBWO算法中,在每次迭代结束时,利用柯西算子对当前的全局最优个体 X_{best} 进行变异操作。基于柯西变异的新位置更新公式定义见式(20)。

$$X_{new} = X_{best} \times (1 + \tan(\pi(r - 0.5))) \quad (20)$$

式中: X_{new} 为新的最佳位置; r 为(0,1)之间的随机数; $\tan(\pi(r - 0.5))$ 本质上是生成服从柯西分布的随机变量。

为了确保算法的收敛性,变异操作结合了贪婪选择策略。即只有当变异后的新位置适应度优于原最优位置时,才更新全局最优解,否则保持不变。贪婪规则描述见式(21)。

$$X_{best}^{t+1} = \begin{cases} X_{new}, & f(X_{new}) < f(X_{best}^t) \\ X_{best}^t, & f(X_{new}) \geq f(X_{best}^t) \end{cases} \quad (21)$$

通过引入柯西变异扰动策略,IBWO算法能够充分利用柯西分布的广泛搜索能力。该策略提供强有力的随机扰动,强制算法探索解空间中的未知区域,从而显著提高了寻找全局最优参数的概率。

4 仿真分析

4.1 仿真参数设置

通过文献[13],采用阶跃响应法对系统进行模型辨识,得到注塑机料筒的近似传递函数 $G(s)$ 见式(22)。

$$G(s) = \frac{0.6}{60s + 1} e^{-6s} \quad (22)$$

参数设置如下:白鲸种群规模为50,最大迭代次数为100,白鲸维度为5,仿真时间400 s。选取时间乘以绝对误差积分作为适应度函数,该指标能综合评价系统的响应速度和稳态误差,其表达式见式(23)。

$$J = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (23)$$

式中: J 为适应度值; $e(t)$ 为设定值与实际值的误差。

4.2 IBWO算法性能分析与控制系统响应对比

为验证本文提出的IBWO算法在模糊PID参数寻优中的有效性,选取了经典的PSO算法和标准BWO算法作为基准对照组进行仿真实验。算法的适应度函数收敛曲线如图4所示。在种群规模与迭代次数一致的情况下,PSO和BWO算法分别在第48次和第64次迭代附近陷入局部最优,收敛精度有限;而IBWO算法在第77次迭代时成功逃离局部极值,并持续收敛至更高精度的解。这一结果充分验证了引入改进策略,有效解决了算法易早熟收敛的问题,表现出更优的全局收敛精度与收敛速度。

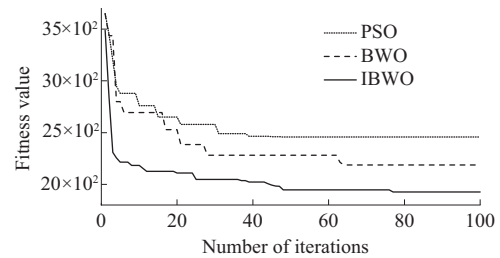


图4 适应度函数收敛曲线

Fig. 4 Fitness function convergence curves

为了进一步评估IBWO-模糊PID控制器在注塑机温度控制系统中的动态性能,分别采用传统PID、模糊PID、PSO-模糊PID、BWO-模糊PID及本文设计的IBWO-模糊PID五种控制系统进行单位阶跃响应对比实验。系统阶跃响应曲线如图5所示,各控制系统的具体性能指标列于表2。对比结果表明:IBWO-模糊PID控制系统的动态响应性能最优。相比BWO-模糊PID,超调量降低了3.78%,调节时间缩短了93.3 s,稳态控制精度可达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。IBWO算法在参数整定上的高精度与快速性,

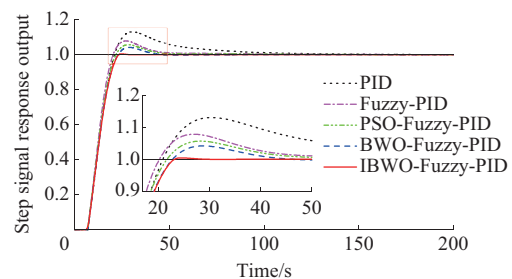


图5 阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves

能够实现近乎零超调的控制效果,显著提升产品质量和生产效率并降低能耗。

表2 各控制系统的具体性能指标

Tab. 2 Specific performance indicators for each control system

Control algorithm	$\sigma/\%$	t_r/s	t_s/s
PID	13.07	21	178.8
Fuzzy-PID	7.83	20.3	163.2
PSO-Fuzzy-PID	5.67	21.8	150.7
BWO-Fuzzy-PID	4.18	22.9	134.7
IBWO-Fuzzy-PID	0.4	23.3	41.4

Notes: σ is overshoot; t_r is rise time; t_s is settling time.

4.3 抗干扰性能分析

注塑成型过程中,环境温度变化或电压波动等干扰因素会直接影响料筒温度的稳定性,进而影响塑件质量。为验证IBWO模糊PID控制系统的抗干扰能力,在系统达到稳态后的220 s处,施加幅值为0.5的阶跃扰动信号进行模拟测试。抗干扰测试的仿真对比曲线如图6所示。从图6可以看出,在施加扰动后,IBWO-模糊PID控制系统能够在最短时间内恢复至稳态设定值。这表明该控制策略展现出了出色的抗干扰性能以及良好的鲁棒特性,能够满足注塑机精密温控的实际工艺需求。

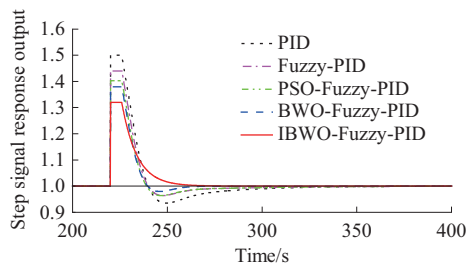


图6 抗干扰测试的仿真对比曲线

Fig. 6 Simulation comparison curves for anti-interference testing

5 结论

(1)针对BWO存在的收敛速度迟缓、易早熟收敛等缺陷,本文提出了融合 Tent 混沌映射、非线性自适应权重及柯西变异策略的改进算法(IBWO)。仿真结果表明,IBWO算法有效弥补了早熟收敛缺陷,相比 PSO 算法和标准 BWO 算法在早期陷入停滞,IBWO 算法能够持续寻优并在第 77 次迭代成功跳出局部极值,表现出更优的全局收敛精度与收敛速度。

(2)通过将 IBWO 算法应用于注塑机料筒温度模糊 PID 控制器的参数整定中,系统的动态响应性能最优。阶跃响应对比实验表明,与 BWO-模糊 PID 控制系统相比,IBWO-模糊 PID 控制系统的超

调量降低了 3.78%,调节时间减少了 93.3 s,实现了对设定温度的快速、平稳跟踪。

(3)在系统抗干扰性能测试中,当施加幅值为 0.5 的阶跃扰动信号后,IBWO-模糊 PID 控制系统产生的温度波动幅度最小,且恢复至稳态所需时间最短。这证实该控制策略在面对注塑成型过程中环境或电压波动时,具有极强的鲁棒性和抗干扰能力。

参考文献

- [1] 陶永亮,张明怡,张宏. 基于“双碳”目标下注塑机节能化的改进[J]. 橡塑技术与装备,2022,48(11):60–63.
TAO Yongliang, ZHANG Mingyi, ZHANG Hong. Improvement of energy-saving for injection molding machine based on “double carbon” target[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(11):60–63.
- [2] 吕有忠,王伟伟,李家荣. PLC 技术在注塑机控制中的应用[J]. 工业控制计算机,2025,38(11):168–169,172.
LYU Youzhong, WANG Weiwei, LI Jiarong. Application of PLC technology in injection molding machine control[J]. Industrial Control Computer, 2025, 38(11):168–169, 172.
- [3] 付饶. 注塑机料筒温度调控和计算机仿真研究[J]. 工程塑料应用,2020,48(1):72–75.
FU Rao. Research on temperature control and computer simulation of injection molding machine barrel[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):72–75.
- [4] 吕燕,赖旭芝,蔡葵. 基于鲁棒 PID 控制器的注射机料筒温度控制系统[J]. 塑料科技,2020,48(2):93–97.
LYU Yan, LAI Xuzhi, CAI Kui. A temperature control system for injection molding machine barrel based on robust PID controller[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(2):93–97.
- [5] 李珊珊,韦成杰. 基于模糊自适应 PID 的注塑机机筒温度实时控制[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(5):82–84,94.
LI Shanshan, WEI Chengjie. Real time control of barrel temperature in injection molding machine based on fuzzy self-tuning PID [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(5):82–84, 94.
- [6] 曹华,李伟. 注塑机料筒温度控制方法研究[J]. 制造业自动化,2022,44(9):112–115.
CAO Hua, LI Wei. Study on temperature control method of injection molding machine[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(9): 112–115.
- [7] 张文汇. 基于模糊 PID 算法的电气自动化仪器远程控制方法[J]. 自动化与仪器仪表,2022(7):144–147.
ZHANG Wenhui. Remote control method of electrical automation instrument based on Fuzzy PID algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2022(7):144–147.
- [8] 王惊雷. 基于差分进化算法的模糊控制器在全自动注射机的应用[J]. 塑料科技,2021,49(3):77–80.

- WANG Jinglei. Application of fuzzy controller based on differential evolution algorithm in automatic injection molding machine[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(3):77–80.
- [9] 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 Jintao, GUO Hai, WANG Lei, et al. Design of fuzzy PID temperature control system for plastic extruder based on GA optimization[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(4):84–90.
- [10] ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 251. DOI:10.1016/j.knosys.2022.109215.
- [11] 孙潇, 蒋行国, 熊刚, 等. 基于改进白鲸优化算法的PID参数优化[J]. *新余学院学报*, 2025, 30(4):48–55.
- SUN Xiao, JIANG Xingguo, XIONG Gang, et al. Research on PID parameter optimization based on improved Beluga whale optimization algorithm[J]. *Journal of Xinyu University*, 2025, 30(4):48–55.
- [12] CZEPIEL M, BAŃKOSZ M, SOBCZAK-KUPIEC A. Advanced injection molding methods: Review[J]. *Materials*, 2023, 16(17). DOI:10.3390/ma16175802.
- [13] MENG J T, SUN W, PAN Q F, et al. Research and application of improved particle swarm fuzzy PID algorithm based on self-disturbance rejection in temperature control system of plastic extruder[J]. *IEEE Access*, 2024, 12:41 620–41 630.
- [14] 欧阳琦, 张倍培, 刘晋康, 等. 基于改进XGBoost的注塑机液压系统故障诊断研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2023, 52(7):78–83.
- OUYANG Qi, ZHANG Beipei, LIU Jinkang, et al. Research on fault diagnosis of hydraulic system of injection molding machine based on improved XGBoost[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2023, 52(7):78–83.
- [15] 戴春雨, 马廉洁, 蒋涵存, 等. 基于多种策略改进的鲸鱼优化算法[J]. *计算机工程与科学*, 2024, 46(9):1 635–1 647.
- DAI Chunyu, MA Lianjie, JIANG Hancun, et al. An improved whale optimization algorithm based on multiple strategies[J]. *Computer Engineering and Science*, 2024, 46(9):1 635–1 647.
- [16] LI K W, LI S H, HUANG Z C, et al. Grey Wolf Optimization algorithm based on Cauchy-Gaussian mutation and improved search strategy[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12. DOI: 10.1038/s41598-022-23713-9.

(上接第115页)

- [22] KANG C, LIU Z, SHIRINZADEH B, et al. Parametric optimization for multi-layered filament-wound cylinder based on hybrid method of GA-PSO coupled with local sensitivity analysis[J]. *Composite Structures*, 2021, 267. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113861.
- [23] LEH D, MAGNEVILLE B, SAFFRÉ P, et al. Optimisation of 700 bar type IV hydrogen pressure vessel considering composite damage and dome multi-sequencing[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(38):13 215–13 230.
- [24] ZU L, KOUSSIOS S, BEUKERS A. Optimal cross sections of filament-wound toroidal hydrogen storage vessels based on continuum lamination theory[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(19):10 419–10 429.
- [25] ZHAO X D, LIANG J G, ZHAO C J, et al. Experimental and numerical analysis of low-velocity impact behavior of wound products using multi-filament winding technique[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25:7 292–7 306.
- [26] UOZUMI T, OHTANI A, NAKAI A, et al. Non-crimp tubular preforming with automation system and high productivity[J]. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2015, 5(8). DOI:10.17265/2159-5275/2015.08.002.
- [27] 郭章新, 韩小平, 朱西平, 等. 纤维束交叉起伏对缠绕复合材料刚度的影响[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(1):179–184.
- GUO Zhangxin, HAN Xiaoping, ZHU Xiping, et al. Calculating stiffness of filament winding composite for considering the filament undulation and crossover[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(1):179–184.