

基于ICOA-Smith-LADRC的塑料激光焊接压力控制

龚光城, 杨 秀, 范正晟

江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月1日; 发布日期: 2025年3月11日

摘 要

针对塑料激光焊接压力系统的非线性与时滞性特点, 引入线性自抗扰控制器和Smith预估器进行控制, 同时, 为尽可能地提高整定线性自抗扰控制器参数效率和系统控制效果, 采用改进的小龙虾算法对其参数进行迭代寻优。改进的内容包括三个方面: 首先, 针对算法种群多样性不足, 初始化种群时采用逻辑映射算法, 使得产生的种群更加均匀, 提高种群的多样性; 其次, 为充分利用小龙虾个体维度间的有用信息, 提高算法的维间搜索能力, 引入纵向交叉策略; 最后, 为避免结果陷入局部最优, 根据迭代次数对每次迭代后的最优个体进行柯西变异或高斯变异, 对比变异后的个体与当代最差个体, 优胜劣汰。实验结果表明: 改进小龙虾算法的Smith-LADRC控制器在塑料激光焊接压力系统上具有更好的控制效果。

关键词

塑料激光焊接压力系统, 线性自抗扰控制, Smith预估器, 改进小龙虾算法

ICOA-Smith-LADRC-Based Pressure Control for Laser Welding of Plastics

Guangcheng Gong, Xiu Yang, Zhengsheng Fang

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 1st, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

Aiming at the nonlinearity and time lag characteristics of the plastic laser welding pressure system, the linear active disturbance controller and Smith predictor are introduced for control, and at the

same time, in order to improve the efficiency of the parameter of the rectified linear self-concern controller and the system control effect as much as possible, the improved crayfish algorithm is used to iteratively seek the optimization of its parameters. The improvements include three aspects: first, for the lack of population diversity in the algorithm, a logic mapping algorithm is used to initialize the population, which makes the resulting population more homogeneous and improves the diversity of the population; second, in order to make full use of the useful information between the dimensions of the crayfish individuals and to improve the inter-dimensional search capability of the algorithm, a vertical crossover strategy is introduced; finally, in order to avoid the results from falling into a local optimum, the optimal individual is selected for each time based on the number of iterations. The optimal individual after iteration is subjected to Cauchy's mutation or Gaussian mutation, Comparing the mutated individuals with the worst contemporary individuals and selecting the better ones. The experimental results show that the Smith-LADRC controller with an improved crayfish algorithm has a better control effect on the plastic laser welding pressure system.

Keywords

Plastic Laser Welding Pressure System, Linear Active Disturbance Control, Smith Predictor, Improved Crayfish Optimization Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来, 由于塑料具有质量轻、化学性质稳定、绝缘性和耐磨性好以及易于加工成型等优点, 已被广泛应用于工业、建筑、汽车制造、医疗和日常生活等领域。然而, 对于某些塑料部件仅通过塑料注塑是不现实的, 需要进行二次连接。目前, 对于塑料及其合成塑料的常见连接工艺方法主要有三种: 机械连接、粘合剂连接和焊接连接, 焊接连接所得到的塑料产品相比于其他两种连接方式强度更高、外观更好[1]。塑料激光焊接技术作为一种新兴的焊接技术, 具有能量密度高、焊接速度快、焊接强度高、焊缝美观以及气密性良好等优点, 能够很好的满足汽车部件的生产。

在激光焊接塑料部件的过程中, 如汽车中的倒车雷达、车载摄像头, 其焊接质量受到激光功率、离焦率、焊接速度以及夹具压力等因素的影响[2]。在焊接产品时, 夹具压力贯穿于整个生产过程, 包括了出光焊接前的触发压力、出光焊接时的压力和出光焊接后的保压压力。夹具压力作为焊接质量的主要影响因素之一, 夹具的夹紧力过大, 会影响焊接产品的外观, 严重的会损坏产品; 夹具压紧力过小, 会导致产品焊接强度不够, 因此, 焊接压力的控制至关重要。

现有的伺服压力控制多采用传统的 PID 控制[3], 整定耗时耗力, 控制系统的控制效果往往达不到最优, 针对这个问题, 有学者采用智能优化算法对 PID 控制器的参数进行优化[4], 如最为人知的粒子群算法、遗传算法和蚁群算法等。PID 算法只有当有误差时才开始进行调节, 其控制系统的抗干扰能力存在一定的缺陷。韩京清教授在经典 PID “基于误差消除误差” 的理论基础上创立自抗扰控制理论, 自抗扰控制(ADRC)不依赖于精确的数学模型, 将系统的内部扰动和外部扰动视为总扰动, 通过扩张状态观测器对其进行估计和补偿, 其鲁棒性强, 具有良好的抗干扰能力[5]。针对自抗扰控制器待整定参数多、整定难度大的问题, 高志强教授提出了线性自抗扰控制器(LADRC), 该控制器不仅减少了待整定的参数, 而且控制效果好、抗扰能力强[6]。因此, 将线性自抗扰控制器引入到塑料激光焊接压力系统中。同时,

为降低压力系统的时滞性影响控制系统的性能, 引入可以克服系统滞后影响的 Smith 预估器。小龙虾算法[7] (Crayfish optimization algorithm, COA)是一种群智能算法, 该算法收敛速度快、寻优能力强, 但易于陷入局部最优, 为此提出一种改进的小龙虾算法引入到压力控制系统中对线性自抗扰控制器(LADRC)参数进行整定优化, 来实现对塑料激光焊接压力系统更好的控制。

2. 压力系统建模

塑料激光焊接机的压力系统主要由伺服电机、星型减速机以及滚珠丝杠等组成。伺服电机与星型减速机相连, 通过电机与星型减速机来驱动轴承推动夹具并与盖板进行按压, 同时结合压力传感器与控制器, 可实现焊接的压力控制。

压力系统中, 伺服电机在转矩控制模式下的电压平衡方程如式(1)所示:

$$U_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + k_e \omega \quad (1)$$

其中, U_q 为伺服电机电压(V), L 为伺服电机定子电感(H), i_q 为伺服电机的电枢电流(A), k_e 为反电动势常数, ω 为电动转子角速度(W)。

伺服电机轴转矩平衡方程如式(2)所示:

$$T = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

其中, T 为伺服电机的输出转矩(N.M), K_T 为转矩增益系数(N.M/A), T_L 为负载转矩, B 为折算粘性阻尼系数, J 为伺服电机轴上的转动惯量。

伺服电机输出转矩如式(3)所示:

$$T = K_T i_q \quad (3)$$

联合公式 1、公式 2 和公式 3, 进行拉式变换可得到 $\omega(s)$ 与 $U_q(s)$ 的比值公式, 从而得到伺服电机的数学模型传递函数, 如式(4)所示:

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{U_q(s)} = \frac{K_T}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_e K_r} \quad (4)$$

伺服驱动器驱动电机运动, 电机的载荷输出公式如式(5)所示:

$$F(x) = k \frac{l \int_0^x \omega(t) dt}{2\pi} \quad (5)$$

其中, k 为弹性系数, 对载荷输出进行拉普拉斯变换得:

$$sF(s) = \frac{kl\omega(s)}{2\pi} \quad (6)$$

综合以上分析, 联合式(4)和式(6), 压力系统的数学模型如下所示:

$$G(s) = \frac{F(s)}{U_q(s)} = \frac{klK_T}{2\pi(LJs^3 + (RJ + LB)s + (RB + K_e K_r)s)} \quad (7)$$

3. 控制算法

3.1. 三阶 LADRC 控制器

自抗扰控制器中包含了跟踪微分器(TD)、误差反馈控制率(SEF)与状态观测器(ESO), 线性自抗扰控

制器是在自抗扰控制器的基本结构上进行修改,其结构包含线性跟踪微分器(LTD)、线性误差反馈控制率(LSEF)以及线性状态观测器(LESO)三个部分[5] [6]。LESO 能够观测存在的各种扰动,实现扰动的补偿,是 LADRC 的核心。为减少 LADRC 控制器需整定的参数,将省去线性跟踪微分器结构,即本文采用的线性自抗扰控制器仅包含线性误差反馈控制率和线性状态观测器。

将塑料激光焊接压力系统作为三阶控制对象,采用三阶的 LADRC 控制器,对应的 LESO 形式如下:

$$\begin{cases} e = z_1 - y, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e, \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e, \\ \dot{z}_3 = z_4 - \beta_3 e + b_0 u, \\ \dot{z}_4 = -\beta_4 e \end{cases} \quad (8)$$

其中, u 为系统输入, y 为系统输出, b_0 为控制器增益, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 表示的是观测器的增益矩阵参数,参数不同,观测器效果也不同。

为降低控制器在参数整定时的难度,采用带宽法来整定 LESO 的参数。假设观测器带宽为 ω_0 ,根据极点配置法如式(9):

$$(s + \omega_0)^4 = s^4 + \beta_1 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_3 s + \beta_4 \quad (9)$$

则 LESO 的增益矩阵参数可根据观测器带宽 ω_0 进行表示,表示结果如下式所示:

$$\begin{cases} \beta_1 = 4\omega_0 \\ \beta_2 = 6\omega_0^2 \\ \beta_3 = 6\omega_0^3 \\ \beta_4 = \omega_0^4 \end{cases} \quad (10)$$

LESF 将系统输入状态值与系统状态估计值的误差作为输入进行线性组合,构成最初控制量,再与观测器观测到的总扰动进行计算,得到控制器的最终控制量。三阶 LADRC 的 LSEF 形式如下式:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = z_2 \\ e_3 = z_3 \\ e_4 = z_4 \\ u_0 = \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 + \alpha_3 e_3 + \alpha_4 e_4 \end{cases} \quad (11)$$

式中, e_1 , e_2 , e_3 , e_4 为系统输状态值与系统状态估计值误差, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 为误差系数, u_0 为控制器初始控制量(LSEF 的输出)。

LADRC 的 LESF 常用基于控制器带宽的方法对参数进行整定,假设控制器的带宽为 ω_c ,那么 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 关于控制器带宽的表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \omega_c^3 \\ \alpha_2 = 3\omega_c^2 \\ \alpha_3 = 3\omega_c \\ \alpha_4 = 1 \end{cases} \quad (12)$$

根据以上的分析,本文所设计的三阶 LADRC 结构图如图 1 所示。

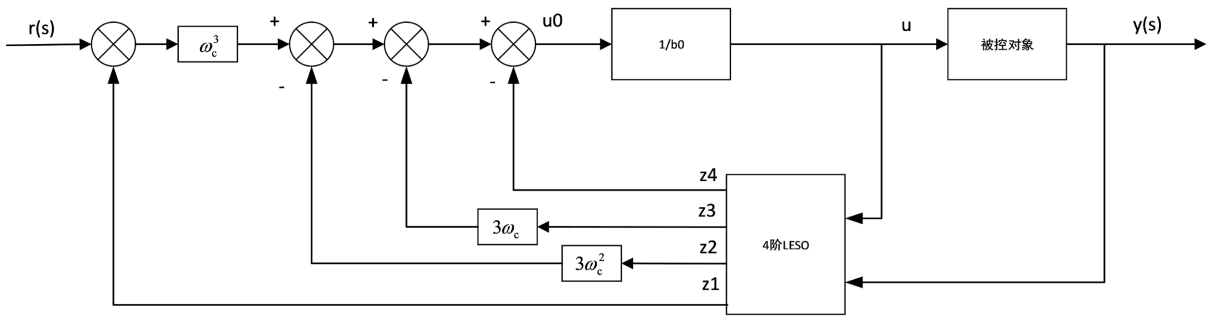


Figure 1. Third-order LADRC structure
图 1. 三阶 LADRC 结构

3.2. Smith 预估器设计

Smith 预估器是 O.J.M.Smith 提出的一种克服系统纯滞后有效方法[8]。Smith 预估器是在被控系统原有的基础上加入一个与该系统相关的预估模型，预估模型的作用是对被控系统时间滞后进行补偿，被控系统与预估模型组成一个无时间滞后的广义被控对象，对这个广义被控对象进行控制能有效克服系统滞后的影响。其原理图见图 2 所示。

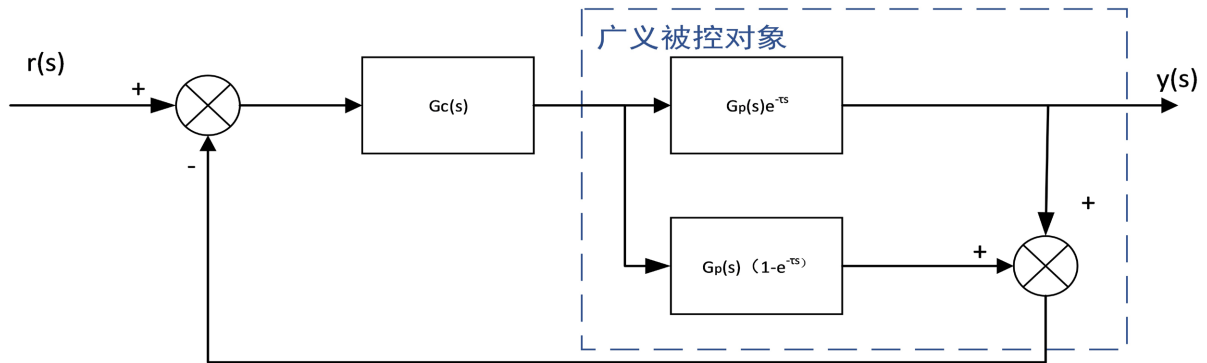


Figure 2. Schematic diagram of Smith predictor
图 2. Smith 预估器原理图

图 2 中， $G_c(s)$ 为控制器传递函数， $G_p(s)e^{-\tau s}$ 为被控系统传递函数， $G_p(s)(1-e^{-\tau s})$ 为 Smith 预估模型的传递函数。

根据 Smith 预估器原理图可知被控系统与预估模型所组成的广义被控对象传递函数为 $G_p(s)$ ，系统的等效闭环传递函数如式(13)所示：

$$G(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (13)$$

此时闭环特征方程中已不存在纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ ，从而消除了纯滞后环节的影响，提高了系统的稳定性。由于塑料激光焊接压力系统具有滞后性，为提高被控系统的控制效果，降低滞后性的影响，加入 Smith 预估器。

3.3. 小龙虾优化算法

3.3.1. 小龙虾算法概述

小龙虾优化算法是由 HeimingJia 教授等人在 2023 年提出的一种新的元启发算法，该算法具有寻优

能力强、收敛速度快等优点[7]。小龙虾优化算法受启发于小龙虾的觅食、避暑和竞争行为，其算法总共分为两个阶段：开发阶段和探索阶段。小龙虾的觅食行为和竞争行为属于算法的开发阶段，避暑行为属于算法的探索阶段。

小龙虾的行为受到环境温度的影响，15℃~30℃时小龙虾具有觅食行为，在 25℃时摄食能力最佳，其摄食能力关于温度近似正态分布，而当温度高于 30℃时小龙虾会进入洞穴避暑。根据小龙虾的生活习性，COA 算法中温度范围为 20℃~35℃，其温度表达式见式(14)，小龙虾的摄食量 p 与温度之间的关系见式(15)。

$$temp = rand \times 15 + 20 \tag{14}$$

其中， $temp$ 为小龙虾生存环境的温度。

$$p = C_1 \times \left(\frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma}} \times \exp \left(-\frac{(temp - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right) \tag{15}$$

其中， μ 为最适合小龙虾的摄食的温度，为 25℃， σ 和 C_1 用于控制在不同温度下小龙虾的摄入量。

在处理多维优化问题时，每只小龙虾为 $1 \times dim$ 的矩阵，代表问题的一个解决方案， N 只小龙虾组成一组候选解 X ，候选解 X 与优化问题的维度和种群大小有关，表达式见式(16)，种群的初始化见式(17)。

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_N] \tag{16}$$

其中， X 为初始化种群位置， N 为种群数量。

$$X_{i,j} = lb_j + (ub_j - lb_j) \times rand \tag{17}$$

其中， $X_{i,j}$ 为 X_i 小龙虾的第 j 维的值， lb_j 为第 j 维的下限， ub_j 为第 j 维的上限。

初始化种群结束后，进入探索阶段和开发阶段。

(1) 探索阶段

小龙虾的行为是受到环节温度影响的，当小龙虾所在的环境温度大于 30℃，小龙虾会寻找洞穴避暑，此时会出现两种情况，一是寻找的洞穴没有其他小龙虾争夺，二是寻找的洞穴存在其他小龙虾争夺，这两种情况是随机出现的，因此这里采用随机值 $rand$ 来模拟这两种情况，随机值 $rand \in (0,1)$ 。随机值 $rand < 0.5$ 时表示寻找的洞穴无其他小龙虾争夺，而随机值 $rand \geq 0.5$ 时表示小龙虾寻找的洞穴存在争夺。因此，环境温度大于 30℃，随机值 $rand < 0.5$ 时表示的是小龙虾找洞穴避暑且没有与其他小龙虾竞争洞穴的行为，此阶段属于探索阶段。洞穴位置 X_{shade} 的定义如下：

$$X_{shade} = (X_G + X_L) / 2 \tag{18}$$

其中， X_G 为到目前为止通过迭代次数获得的最佳位置， X_L 表示当前总体的最佳位置。

此阶段小龙虾位置的迭代方程为：

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + C_2 \times rand \times (X_{shade} - X_{i,j}^t) \tag{19}$$

其中， t 为当前迭代次数， $t + 1$ 为下一代迭代次数， C_2 是一条递减曲线。

曲线 C_2 的方程为：

$$C_2 = 2 - (t/T) \tag{20}$$

其中， T 为最大迭代次数。

(2) 开发阶段

小龙虾的洞穴竞争阶段和觅食阶段都属于算法的开发阶段。

① 竞争阶段

根据探索阶段的设定，当小龙虾所在的环境温度大于 30℃、随机值 $rand \geq 0.5$ 时，小龙虾会抢夺洞穴，发生竞争。小龙虾争夺洞穴的行为方程如下所示：

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t - X_{z,j}^t + X_{shade} \tag{21}$$

其中， z 为小龙虾随机个体，如式(22)所示。

$$z = \text{round}(rand \times (N - 1) + 1) \tag{22}$$

② 觅食阶段

根据小龙虾的生活习性，当小龙虾所在的环境温度小于等于 30℃，小龙虾会进行觅食活动，即觅食阶段。在此阶段，小龙虾在进食时，若食物大小合适会直接摄取，若食物过大，则会撕碎食物交替进食。食物 X_{food} 的定义见式(23)，食物大小 Q 的定义见式(24)。

$$X_{food} = X_G \tag{23}$$

$$Q = C_3 \times rand \times (fitness_i / fitness_{food}) \tag{24}$$

其中， C_3 为食物因子，值为 3； $fitness_i$ 为第 i 个小龙虾适应度值， $fitness_{food}$ 为食物所在位置的适应度值。

当食物大小 $Q \leq (C_3 + 1)/2$ 时，小龙虾会向食物移动直接食用，小龙虾直接食用食物的方程如式(25)。

$$X_{i,j}^{t+1} = (X_{i,j}^t - X_{food}) \times p + p \times rand \times X_{i,j}^t \tag{25}$$

当食物大小 $Q > (C_3 + 1)/2$ 时，食物太大，小龙虾会撕碎食物，撕碎食物后食物的大小如式(26)所示。将食物撕裂后，小龙虾会使用爪子将撕裂的食物依次送入口中食用，采用正弦函数与余弦函数组合模拟这个过程，同时，小龙虾吃下的食物也与食物摄入量 p 有关。因此，小龙虾的交替进食的方程如式(27)所示。

$$X_{food} = \exp\left(-\frac{1}{Q}\right) \times X_{food} \tag{26}$$

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + X_{food} \times p \times (\cos(2 \times \pi \times rand) - \sin(2 \times \pi \times rand)) \tag{27}$$

3.3.2. 小龙虾算法的改进

针对小龙虾算法存在过早收敛和易于陷入局部最优的不足，提出一种改进的小龙虾算法。一是由于小龙虾初始种群是通过随机数生成的，会出现小龙虾局部聚集的情况，这时候不利于算法的寻优，因此将混沌系统引入 COA 算法中，采用混沌映射方法生成初始种群；二是为了提高维间的搜索能力，引入纵向交叉策略；三是防止算法陷入局部最优，对适应度最优的小龙虾个体进行高斯变异和柯西变异。

(1) 逻辑映射初始化

小龙虾算法在初始化时是在上下界内随机生成小龙虾个体的位置，这种初始化方式可能会出现小龙虾位置不均匀而导致算法陷入局部最优解的情况。混沌是一种典型的非线性现象，能按照自己的规律在一定范围内无重复的遍历全部状态，通过混沌运动的有界性和遍历性能够完成收索的优化[9]。因此，可以将混沌系统运用于种群的初始化中，这利于初始种群的均匀。常见的混沌系统由 Logistic 系统、Cubic 系统、Chen 系统等，本文选用 Logistic 映射来实现小龙虾种群初始化。

Logistic 映射的数学模型如式(28)所示：

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), n = 0, 1, 2, \dots \tag{28}$$

其中, μ 为控制参数, $0 < \mu \leq 4$, $x_{n+1} \in [0,1]$ 。

当 $3.5699456 < \mu \leq 4$ 时 Logistic 映射会呈现混沌状态; 特别的, 当 $\mu = 4$ 时 Logistic 映射会呈现出典型的混沌特征, 因此, 本文设定 $\mu = 4$ 。

(2) 引入纵向交叉策略

为加强 COA 算法的搜索能力, 防止算法陷入局部最优, 在算法中加入纵向交叉策略。在小龙虾根据环境温度进行觅食行为或者是避暑行为或者是竞争行为更新位置后, 对更新后的小龙虾种群进行纵向交叉, 纵向交叉的公式如式(29)所示。

$$X'_{i,d_1} = r \times X_{i,d_1} + (1-r) \times X_{i,d_2} \tag{29}$$

其中, X'_{i,d_1} 为交叉后第 d_1 维的值, $r \in (0,1)$, d_1 和 d_2 为维度信息, 小于等于维度值 dim , 第 d_1 维和第 d_2 维进行纵向交叉生成新个体的第 d_1 维, 交叉后新个体其他维的值与原个体保持相同。

将纵向交叉后得到的个体与原来本体进行适应度值对比, 若交叉后的小龙虾个体适应度值更优, 则替换掉原有个体, 否则不进行替换。

(3) 引入高斯变异和柯西变异

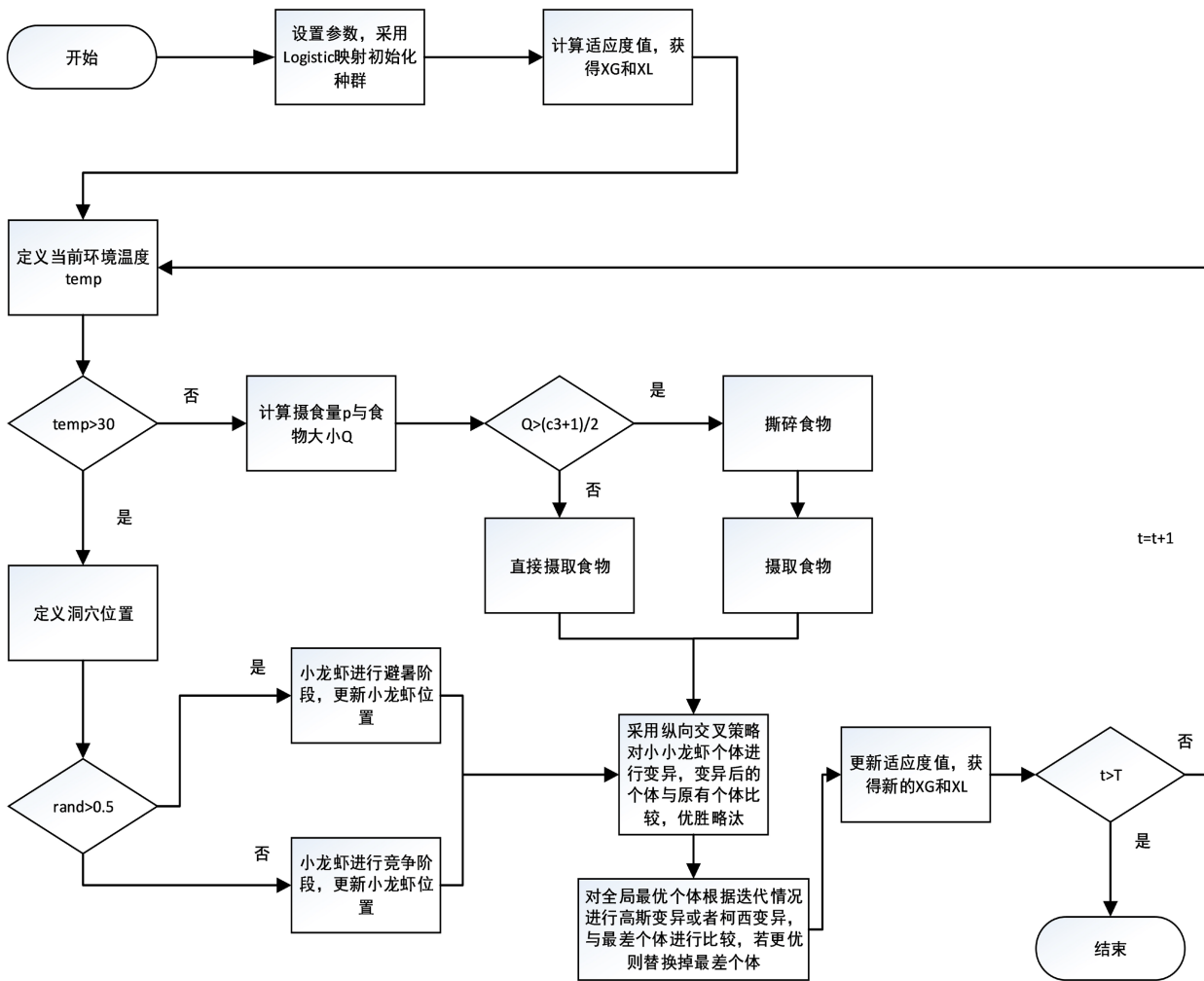


Figure 3. Flowchart of improved crayfish optimization algorithm
图 3. 改进小龙虾算法流程图

为了进一步提高 COA 算法的搜索能力和优化精度,防止陷入局部最优,在算法中引入高斯变异和柯西变异。在算法迭代前期对最优个体采用柯西变异,加强个体的全局寻优能力,跳出局部最优;在算法后期对全局最优个体采用高斯变异,提高个体的局部寻优能力,提高算法优化精度。

变异后的个体与当代最差个体进行对比,若变异后的个体比最差个体的适应度值更差,则不接受变异后的个体;若变异后的个体的优于变异前的最优个体的适应度值,则接受变异个体替换最差个体,保证小龙虾种群朝着更好的方向发展。小龙虾个体变异公式见式(30)。

$$\begin{cases} X'_i = X_i + 0.6 * Cauchy(0,1, dim), t < 0.1T \\ X'_i = X_i + 0.1 * Gauss(0,1, dim), t \geq 0.1T \end{cases} \quad (30)$$

其中, X'_i 为最优个体变异后的个体, $Gauss(0,1, dim)$ 为维度为 dim 的高斯分布随机变量, $Cauchy(0,1, dim)$ 为维度为 dim 的柯西分布随机变量,本文 dim 设置为 3;当迭代次数小于 $0.1T$ 时进行柯西变异,当迭代次数不小于 $0.1T$ 时进行高斯变异。

改进后的算法流程图如图 3 所示。

3.4. 改进小龙虾算法的 Smith-LADRC 控制器设计

ITAE 是时间与误差绝对值乘积积分的性能指标,以系统误差函数 $e(t)$ 为泛函的积分评价,综合体现了系统误差与时间之间的关系[10]。ITAE 指标的值越小,系统的控制性能越好,因此本文算法适应度值 $fitness$ 的采用的计算公式与 ITAE 性能指标相关,见式(31)。

$$fitness = \frac{\int_0^{t_s} t |e(t)| dt}{step} \quad (31)$$

其中, $step$ 为系统设定的阶跃值。

那么,基于 ICOA-Smith-LADRC 的塑料激光焊接压力系统的控制结构框图见图 4,ICOA 优化算法得到的最优参数 b_0 、 w_c 、 w_0 应用于 LADRC 控制器中,优化后的 LADRC 控制器与 Smith 预估器相结合共同控制塑料激光焊接压力系统。

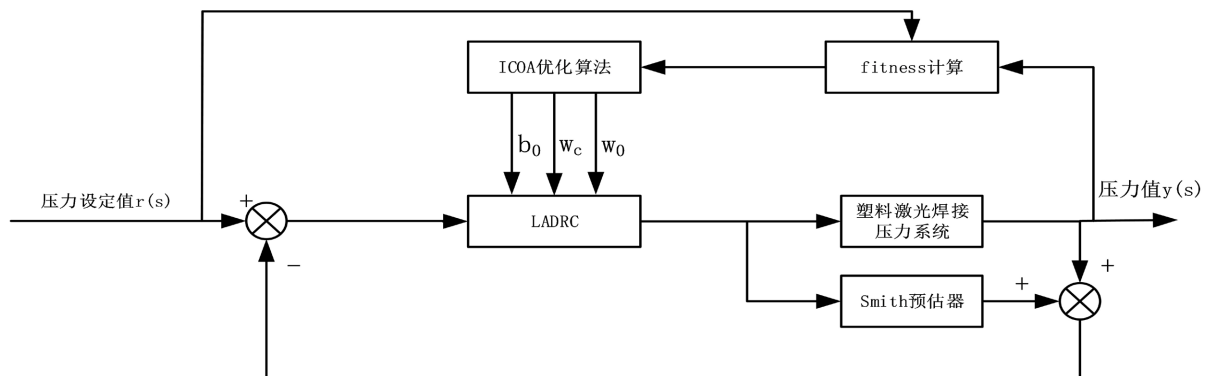


Figure 4. Block diagram of ICOA-Smith-LADRC control structure
图 4. ICOA-Smith-LADRC 控制结构框图

4. 仿真实验结果分析

经过辨识得到的上海某塑料激光焊接设备的压力系统传递函数如下:

$$G(s) = \frac{0.62e^{-1.2s}}{1.04s^3 + 3.12s + 6.25s} \quad (32)$$

操作系统采用 64 位 Windows10, CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-9400 CPU @ 2.90GHz 2.90 GHz, 内存为 16GB, 实验仿真平台采用 matlab2018a。

运用 COA 算法和 ICOA 算法分别为对线性自抗扰控制器参数 b_0 、 w_c 、 w_0 进行整定寻优, 种群大小设置为 40, 迭代次数设置为 60, b_0 的范围设置为[0, 1000], w_c 的范围设置为[0, 5], w_0 的范围设置为[0, 100], 仿真得到的适应度函数值与迭代次数的关系如图 5 所示。

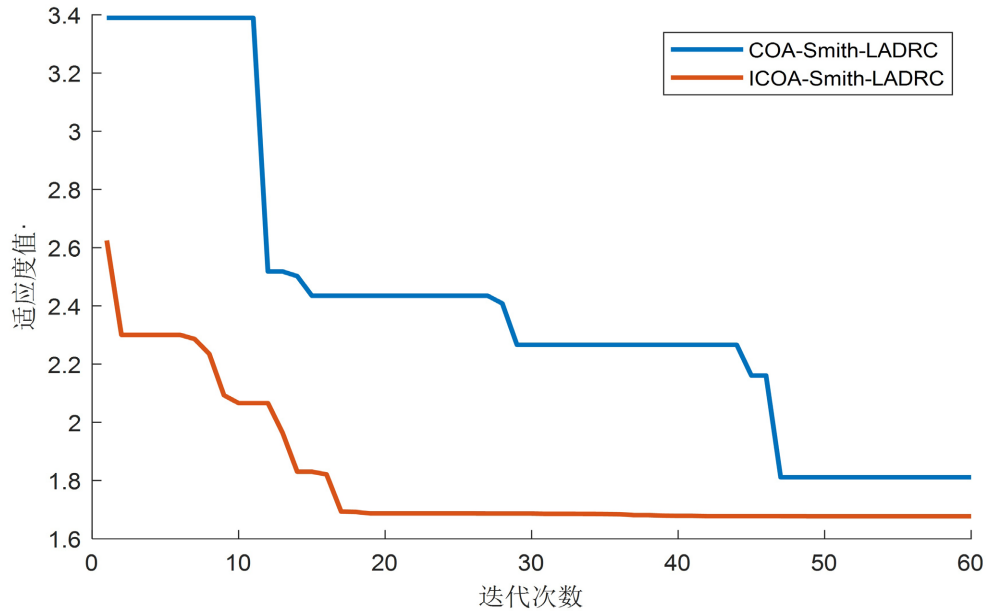


Figure 5. Relationship between fitness value and iteration times

图 5. 适应度值与迭代次数关系

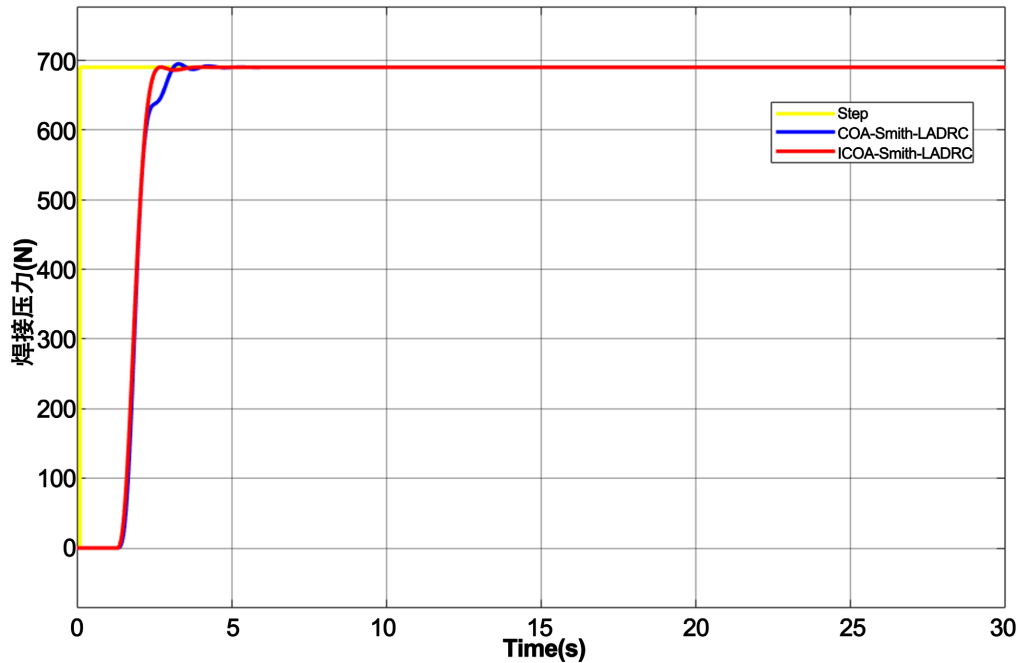


Figure 6. Step performance comparison between COA-Smith-LADRC and ICOA-Smith-LADRC

图 6. COA-Smith-LADRC 与 ICOA-Smith-LADRC 的阶跃性能对比图

实验数据表明：结合 Smith 估计器的 LADRC 控制器控制的压力系统中，采用 COA 整定控制器参数与 ICOA 整定控制器参数相比：ICOA 收敛速度更快，能够跳出局部最优，拥有更强的寻优效果。

将 COA 和 ICOA 整定后的参数带入到 simulink 仿真模型中进行仿真，仿真后的曲线如图 6 所示。图中可以看出 COA 与 ICOA 优化后的系统在给一个阶跃后，两者均无超调。经过 ICOA 优化后的系统达到稳态的时间为 2.35 s，而经过 COA 优化后的系统达到稳态的时间为 2.87 s，ICOA 优化后的控制器控制效果强于 COA。

为验证 ICOA-Smith-LADRC 控制系统的优越性，将采用经验法整定的传统 PID 和 COA 算法整定的 PID 与它进行仿真对比。仿真曲线如图 7 所示，仿真数据见表 1。从表 1 可以看出：COA 优化的 PID 控制器不仅是在超调量还是在调节时间上，都远优经验法整定的 PID 控制器；基于 ICOA 的 Smith-LADRC 控制器不仅无超调，而且调节时间非常短，仅用了 2.35 s，比 COA-PID 快了 5.06 s。可以认为：ICOA-Smith-LADRC 控制器在塑料激光焊接压力系统的控制性能远超前于传统 PID 控制器和 COA-PID 控制器性能。

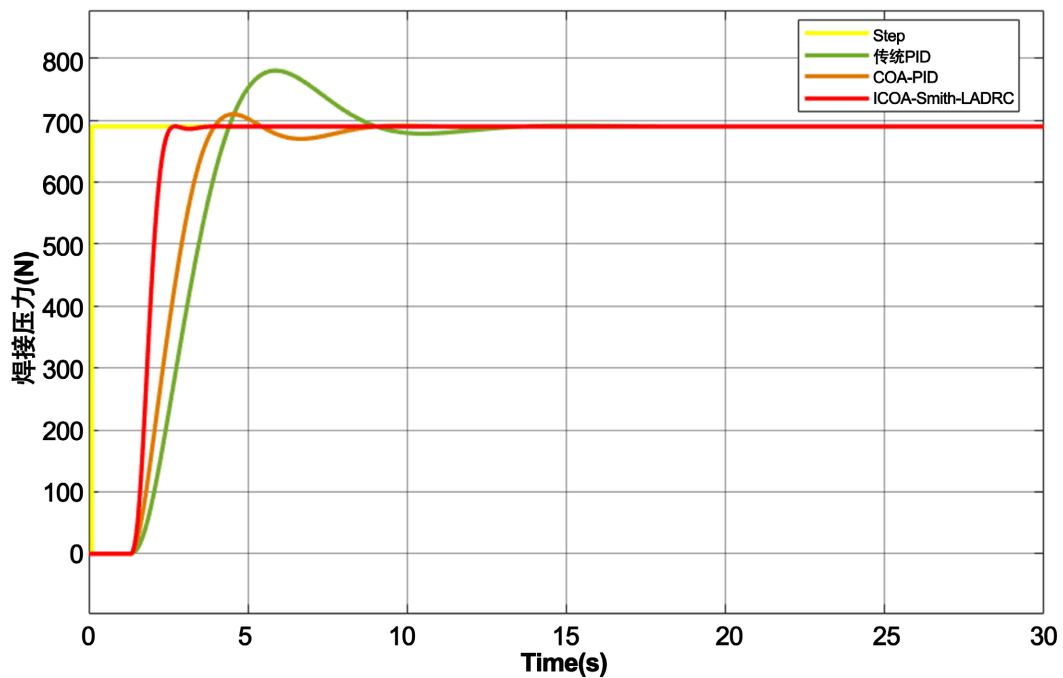


Figure 7. Step performance plot of ICOA-Smith-LADRC against other algorithms

图 7. ICOA-Smith-LADRC 与其他算法的阶跃性能图

Table 1. Step response data for each algorithm

表 1. 各算法阶跃响应数据

算法	调节时间(s)	超调量	峰值时间(s)
传统 PID	8.32	13%	5.80
COA-PID	7.41	2.85%	4.40
ICOA-Smith-LADRC	2.35	0.00%	2.62

为验证 ICOA-Smith-LADRC 控制系统的稳定性，决定在 25 s 时加入 2 s 时常的 10% 的扰动，仿真时间设置为 50 s，ICOA-Smith-LADRC 与传统 PID、COA-PID 的仿真结果如图 8 所示。

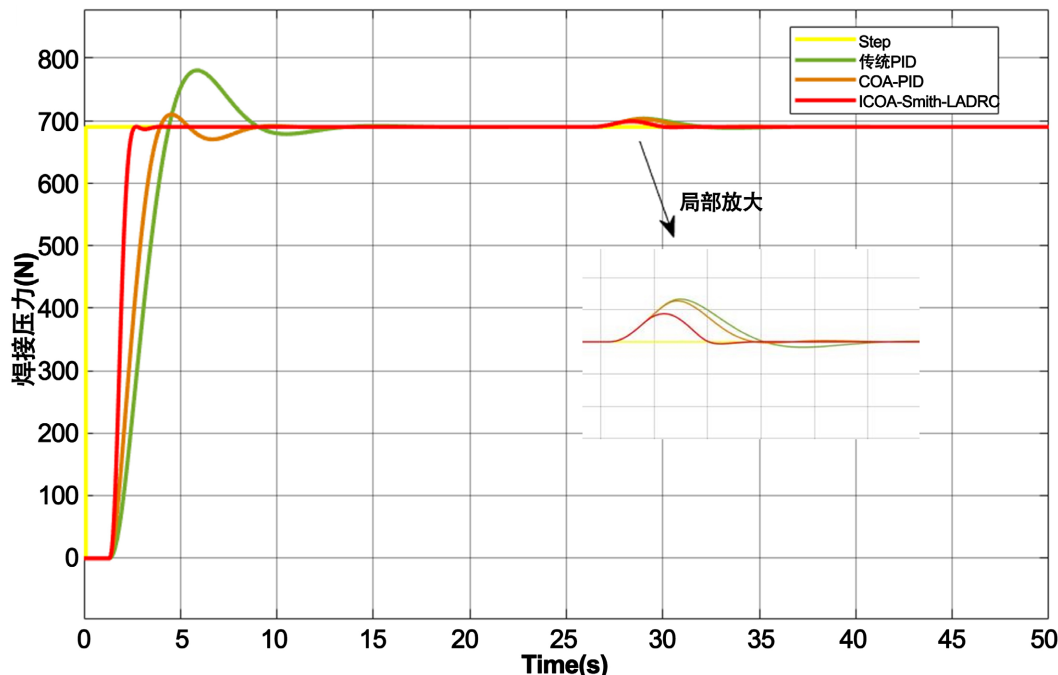


Figure 8. Stability test of ICOA-Smith-LADRC with other algorithms
图 8. ICOA-Smith-LADRC 与其他算法的稳定性测试

从图 8 可以看到：加入 10% 的外界扰动后，传统 PID 控制系统的超调量大且恢复时间最长，ICOA-Smith-LADRC 控制系统的超调量低于 COA-PID，COA-PID 控制系统恢复稳态的时间为 5.6 s，ICOA-Smith-LADRC 控制系统恢复稳态的时间为 3.8 s，比 COA-PID 缩短了 1.8 s。因此，可以认为 ICOA-Smith-LADRC 控制器在塑料激光焊接压力系统的稳定性优于 COA-PID 控制器，ICOA-Smith-LADRC 的抗干扰性能更强。

5. 结论

本文针对塑料激光焊接压力系统的非线性与时滞性，提出了一种 Smith 预估器与 LADRC 控制器相结合并采用改进的小龙虾算法优化 LADRC 参数的控制方法，同时与传统的 PID 控制和基于 COA 算法的 PID 控制进行仿真对比。仿真结果表明：ICOA-Smith-LADRC 控制效果明显优于传统的 PID 控制与 COA-PID 控制，基于 ICOA-Smith-LADRC 的塑料激光焊接压力系统具有响应速度更快、超调量更新小和鲁棒性更强等优点。根据实验结果可以得出：ICOA-Smith-LADRC 控制器能够有效改善塑料激光焊接压力系统的控制效果，能够更好地满足塑料激光焊接时压力的控制需求。

参考文献

- [1] 陈志, 张婉清, 颜昭君. 塑料激光透射焊接技术的研究动态和发展趋势[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 556-563.
- [2] Gonçalves, L.F.F.F., Duarte, F.M., Martins, C.I. and Paiva, M.C. (2021) Laser Welding of Thermoplastics: An Overview on Lasers, Materials, Processes and Quality. *Infrared Physics & Technology*, **119**, Article ID: 103931. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103931>
- [3] 汪宇其, 李泽源, 李向国, 等. 基于驱控一体的伺服压力机控制系统研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 438-445.
- [4] 吕晨悦, 施一萍, 刘瑾, 张金立, 程宗政. CSO-PID 算法在空压机控制系统中的应用[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(1): 157-160.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 19-23.

-
- [6] Gao, Z.Q. (2003) Scaling and Bandwidth-Parameterization based Controller Tuning. *Annual American Control Conference (ACC 2003)*, Denver, 4-6 June, 4989-4996
- [7] Jia, H., Rao, H., Wen, C. and Mirjalili, S. (2023) Crayfish Optimization Algorithm. *Artificial Intelligence Review*, **56**, 1919-1979. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10567-4>
- [8] Smith, O.J.M. (1959) A Controller to Overcome Deadtime. *ISA Journal*, **6**, 28-33.
- [9] 唐巍, 陈学允. 混沌理论及其应用研究[J]. 电力系统自动化, 2000(7): 67-70.
- [10] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003(8): 207-211.