

# 基于改进金鹰算法PID策略控制塑料焊接温度

费思芃, 范正晟

江西理工大学电气工程与自动化学院控制工程专业, 江西 赣州

收稿日期: 2024年6月11日; 录用日期: 2024年9月12日; 发布日期: 2024年9月20日

## 摘要

为了调节塑料激光焊接过程中的温度变化, 本文将金鹰算法(Golden Eagle Optimizer, GEO)进行改进, 并将改进的IGEO (金鹰优化算法)引入塑料激光焊接温度调控系统中, 利用IGEO预测PID控制算法, 从而进行参数优化, 以提高传统PID控制器的控制性能。

## 关键词

遗传算法, PID控制, 塑料激光焊接

# Using Improved Golden Eagle Algorithm PID Strategy to Control Plastic Welding Temperature

Sipeng Fei, Zhengsheng Fan

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

Received: Jun. 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To regulate temperature variations during plastic laser welding, this study improves the Golden Eagle Optimizer (GEO) algorithm and introduces the enhanced IGEO (Improved Golden Eagle Optimizer) into the temperature control system. IGEO is utilized to predict PID control algorithms, optimizing parameters to enhance the control performance of traditional PID controllers.

## Keywords

Genetic Algorithm, PID Control, Plastic Laser Welding

Copyright © 2024 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

近年来, 废弃塑料的资源化利用正成为重要话题[1]。据统计, 我国 2021 年共产生废弃塑料约 6300 万吨, 除少部分可被再生利用外, 其余部分主要被填埋或焚烧处理, 对生态环境造成严重影响[2]。同时, 汽车产销需求也逐年增加轻量化设计作为汽车制造业的一个重要发展方向, 因此, 越来越多的塑料制品正取代金属部件用于汽车的生产制造当中[3]。塑料激光焊接技术是利用激光束对要焊接的塑料接触面进行加热和熔化形成熔池, 然后通过加压或振动等方式使其凝固, 从而使两个或多个塑料件结合在一起。塑料激光焊接技术的优势在于, 激光束能够对塑料进行高精度的加热和熔化, 且作用区域只位于焊接点附近, 对非焊接区域的影响小, 因此相比传统的焊接方式更加精确可靠。该技术产生的振动应力和热应力比较小, 能降低焊接产品内部组件的老化率, 提高产品的使用寿命[4]。

影响塑料激光焊接焊缝质量的工艺参数主要有激光功率、焊接速度、光斑直径等因素[5]。但是在实际焊接工作过程中以现有的技术无法实时检测焊缝的质量, 所以需要其他中间参数来判断焊接质量, 而经过研究证明这些影响焊缝质量的工艺参数最终都会影响到焊接温度, 所以可以将焊接温度作为焊接过程的表征来间接判断焊接质量, 通过实时检测焊接温度来判断焊缝质量。

目前对于温度控制领域使用较多的控制方法是基于传统 PID 法的闭环控制, 可以对塑料激光焊接系统采用 PID 控制器, 传统的 PID 控制器虽然规律简单、鲁棒性好, 但是对于复杂的非线性模型还是无法达到精度的要求, 存在响应速度慢、调节时间长等缺点, 因此本文对传统的 PID 控制器进行了优化和改进, 从而实现工程上的控制要求。

近年来, 众多学者提出了许多的元启发算法, 包括粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO) [6]、遗传算法(Genetic Algorithm, GA) [7]、灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO) [8]等被应用于解决实际问题的优化算法。受金鹰捕猎行为的启发, Mohammadi-Balani 等人[9]于 2021 年提出了金鹰优化算法(GEO)。金鹰优化算法的策略简单、求解效果好, 因此本文将改进的金鹰优化算法引入塑料激光焊接温度调控系统中, 利用 IGEO 预测 PID 控制算法, 从而进行参数优化, 以提高传统 PID 控制器的控制性能。

## 2. 金鹰算法(GEO)

金鹰在捕猎过程中是螺旋运动的, 并且每只鹰都可以记住迄今为止它所去过最适宜捕猎的地方。如图 1 所示, 在二维空间可以将金鹰的盘旋过程用攻击向量和巡航向量来表述。

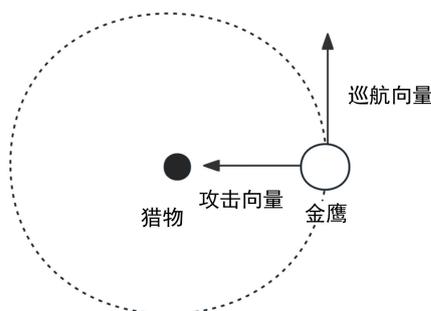


Figure 1. Attack vector and cruise vector  
图 1. 攻击向量与巡航向量

其中攻击向量表达式为式(1), 巡航向量表达式为式(2):

$$\bar{A}_i = \bar{X}_f^* - \bar{X}_i^* \tag{1}$$

$$h_1x_1 + h_2x_2 + \dots + h_nx_n = d \Rightarrow \sum_{j=1}^n h_jx_j = d \tag{2}$$

式中,  $\bar{A}_i$  为第  $i$  只金鹰的攻击矢量,  $\bar{X}_f^*$  为当前金鹰所到达的最佳地点(猎物位置),  $\bar{X}_i^*$  第  $i$  只金鹰目前的位置。此处,  $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  为攻击向量,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  为决策/设计变量向量,  $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$  为被选中的猎物的位置,  $d$  用于计算  $\bar{C}_1$ 。

通过以下三步法来找到一个随机维度的目的地地点:

- 从变量中随机选择一个变量作为固定变量。
- 将随机值赋给除第  $k$  个变量以外的所有变量, 因为第  $k$  个变量是固定的。
- 用式(3)求出固定变量的值。

$$C_k = \frac{d - \sum_{j \neq k}^j a_j}{a_k} \tag{3}$$

式中,  $C_k$  为目标点  $C$  的第  $k$  个元素,  $a_j$  攻击向量的  $\bar{A}_i$  第  $j$  个元素,  $k$  为固定变量的编号, 找到了巡航的随机目的地。式(4)显示了巡航超平面上的目的点的一般表示。

$$\bar{C}_1 = \left\{ c_1 = rand, c_2 = rand, \dots, c_k = \frac{d - \sum_{j \neq k}^j a_j}{a_k}, \dots, c_{n=rand} \right\} \tag{4}$$

式中,  $rand$  为  $[0,1]$  的随机数。

金鹰的位移由攻击和向量组成。现将金鹰迭代的步长向量定义为式(5)与式(6):

$$\Delta x_i = \bar{r}_1 P_a \frac{\bar{A}_i}{\|\bar{A}_i\|} + \bar{r}_2 P_c \frac{\bar{C}_i}{\|\bar{C}_i\|} \tag{5}$$

$$\|\bar{A}_i\| = \sqrt{\sum_j^n a_j^2}, \|\bar{C}_i\| = \sqrt{\sum_j^n c_j^2} \tag{6}$$

式中,  $P_a$  为攻击系数,  $P_c$  为巡航系数。  $\bar{r}_1$  和  $\bar{r}_2$  为  $[0,1]$  内的随机向量。

通过迭代中的步向量加到迭代中的位置, 可以简单计算出金鹰在迭代中的位置, 即式(7):

$$x^{t+1} = x^t + \Delta x_i^t \tag{7}$$

式中,  $x^{t+1}$  为金鹰的第  $t+1$  次的位置,  $x^t$  为金鹰的第  $t$  次的位置,  $\Delta x_i^t$  为金鹰移动的步长大小。

如果金鹰的新位置的适应度值比它记忆中的位置更好, 这只鹰的记忆会随着新位置更新。在新的迭代中, 每只金鹰从种群中随机选择一只金鹰, 围绕其最佳访问位置旋转, 计算攻击矢量与巡航矢量。式(5)中的攻击系数和巡航系数见式(8), 用来控制攻击和巡航向量对步长矢量的影响。

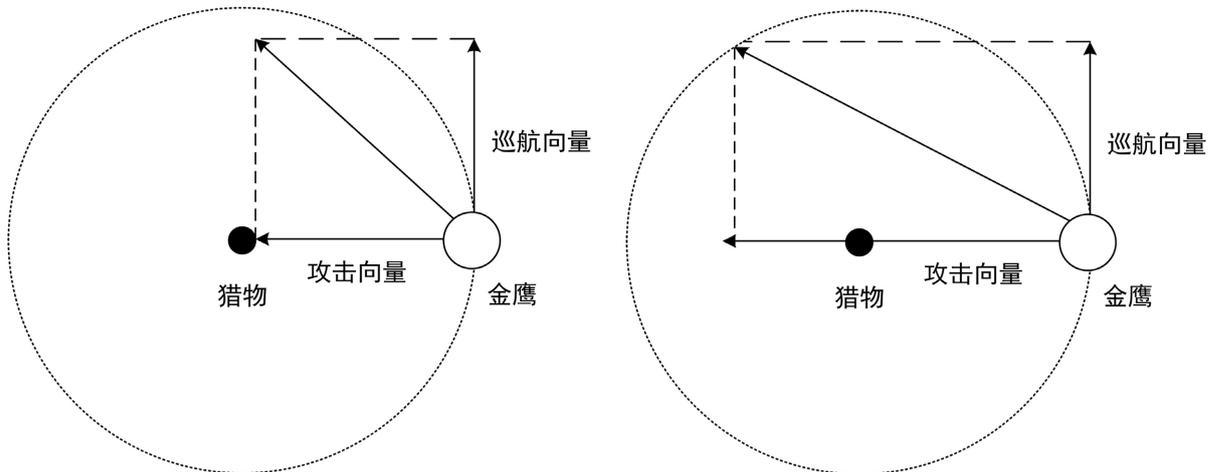
$$\begin{cases} P_a = P_a^0 + \frac{t}{T} |P_a^T + P_a^t| \\ P_c = P_c^0 + \frac{t}{T} |P_c^T + P_c^t| \end{cases} \tag{8}$$

式中,  $P_a^0$  和  $P_a^T$  为  $P_a$  的初值和终值,  $P_c^0$  和  $P_c^T$  为  $P_c$  的初值和终值。

### 3. 基于 GEO 算法的 PID 参数优化

#### 3.1. 引入对称映射优化

金鹰算法在搜索过程中, 主要由  $P_c$  和  $P_a$  两个参数控制,  $P_a$  决定算法的局部开发强度,  $P_c$  影响算法的探索能力。图 2 为金鹰在巡航过程和攻击过程时攻击向量和巡航向量的相应变化。



**Figure 2.** Schematic diagram of position update for cruise process (left) and attack process (right)  
**图 2.** 巡航过程(左)和攻击过程(右)位置更新原理图

由上图可以发现, 无论在攻击过程还是在巡航过程, 该算法只注意对一半的巡航区域的搜索, 而忽略了另一半, 这对于迭代初期来说并不利于整个空间的充分探索, 可能会使算法陷入局部最优。因此, 本文为了弥补这一缺陷利用了对称搜索策略, 对另一半巡航区域也进行了搜索。如式(9)、(10)所示:

$$x_{ref}^{t+1} = 2 \times x_i^{t+1} - x_f^* \tag{9}$$

$$x_{new}^{t+1} = \begin{cases} x_{ref}^{t+1} & \text{if } F(x_{ref}^{t+1}) < F(x_i^{t+1}) \\ x_i^{t+1} & \text{if } F(x_{ref}^{t+1}) > F(x_i^{t+1}) \end{cases} \tag{10}$$

式中,  $x_{ref}^{t+1}$  表示  $x_i^{t+1}$  经过对称映射后的位置。

通过对称映射优化, 可以在实际塑料焊接温度控制过程中快速找到最优温度值, 从而减少计算时间。

#### 3.2. 引入变异算法

自适应  $t$  分布[10]结合了柯西分布和高斯分布的优点, 在自由度参数  $n \in (1, \infty)$  的过程中, 可以通过  $t$  分布突变算子来平衡和提高算法的局部搜索能力。所以, 为了防止金鹰算法过早地陷入局部最优, 在鹰群位置迭代的更新阶段通过引入自适应  $t$  分布[8]更新位置。含有自由度为  $n$  的  $t$  分布概率密度的函数如式(11)所示:

$$\rho(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^{-\frac{n+1}{2}} \tag{11}$$

本文采用迭代次数为  $t$  分布的自由度参数的  $t$  分布变异算子对解的位置进行扰动, 从而实现算法在迭

代前期具有好的全局开发能力, 在迭代后期具有好的局部探索能力, 提高收敛速度的同时, 防止过早收敛。位置更新的方式如式(12)所示:

$$x^{t+1} = x^t + x^t * t(n) \tag{12}$$

通过引入变异算法可以避免控制系统在实际控制温度时陷入局部最优, 并且减少计算时间。

### 3.3. IGEO 的算法流程

根据上述提出的两种优化方法对 GEO 算法进行改进, 并给出了 IGEO 的流程图, 如图 3 所示。

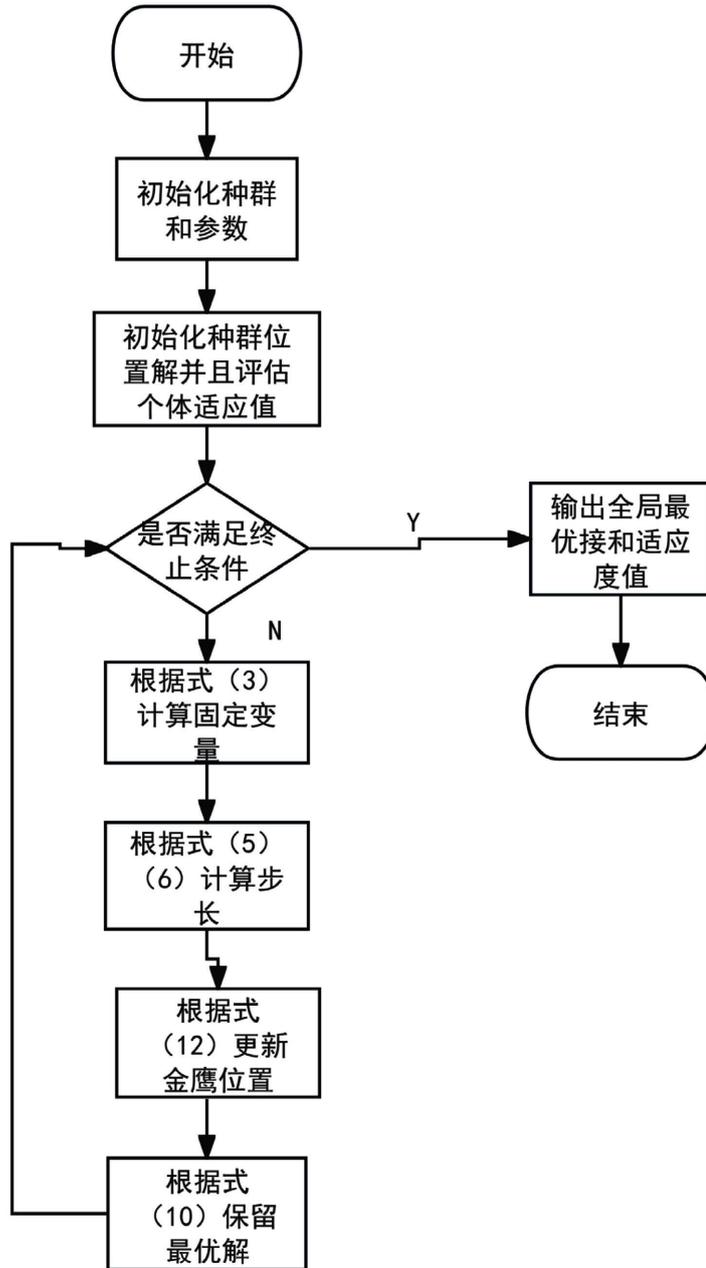


Figure 3. Flowchart of the IGEO algorithm  
图 3. IGEO 算法的流程图

### 3.4. 改进金鹰预测 PID 控制器设计

基于 IGEO 算法的 PID 参数优化结构如图 4 所示。每次迭代中, 温度控制系统以获取的 PID 参数完成一次仿真并得到综合 ITAE 值。IGEO 算法通过比较综合 ITAE 值更新最优点, 并给定新的 PID 参数, 在完成迭代次数后, 输出最佳控制参数及相应的综合 ITAE 值。

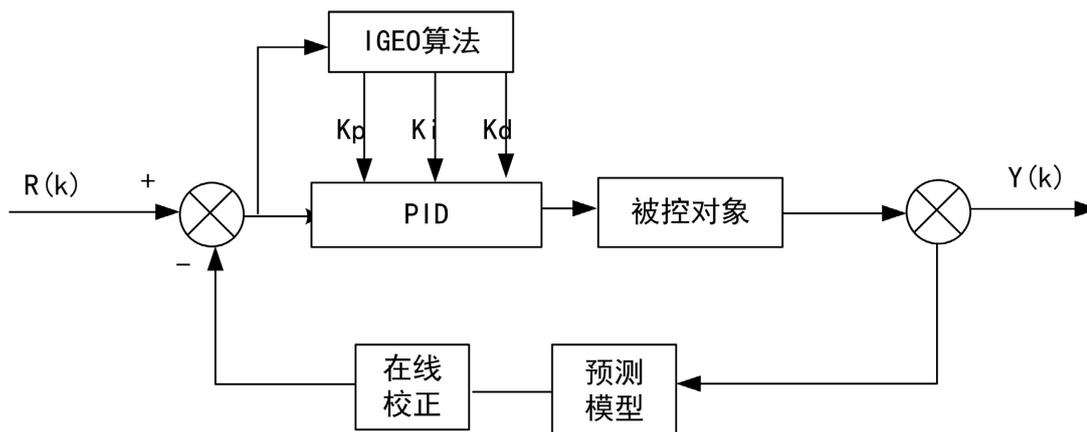


Figure 4. PID parameter optimization structure based on IGEO algorithm  
图 4. 基于 IGEO 算法的 PID 参数优化结构

## 4. 系统仿真和结果分析

### 4.1. 仿真实验

本次仿真实验是在 MATLAB 的 Simulink 中进行。以上海某公司的工厂数据为基础, 利用系统辨识得出以下的传递函数, 如式(13)所示:

$$G_0(s) = \frac{3.689}{s^2 + 0.081s + 1} e^{-0.005s} \quad (13)$$

考虑到实际工业中采用的温度传感器很少温度响应时间能够达到 10 ms 以下, 因此根据实际情况将滞后时间修正为  $T_d = 0.025$  s, 如式(14)所示:

$$G_0(s) = \frac{3.689}{s^2 + 0.081s + 1} e^{-0.025s} \quad (14)$$

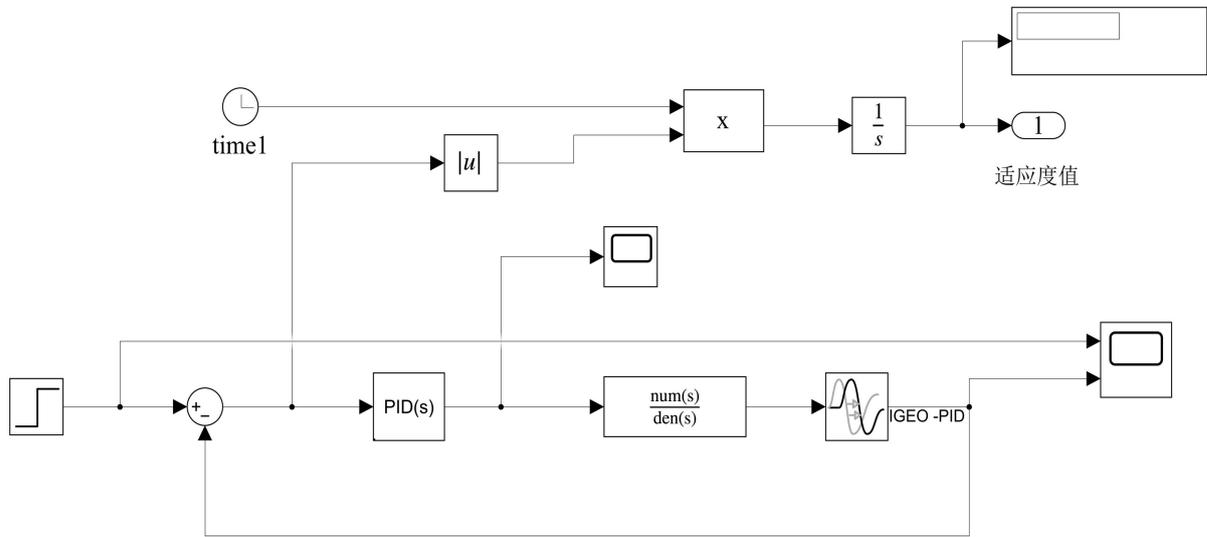
考虑到此实验对控制性能的相关要求, 因此选择 ITAE 作为目标函数更加合适, ITAE 的表达式如式(15)所示:

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (15)$$

在 Matlab-Simulink 环境下搭建 GEO 和 IGEO 的控制系统, 并设置好基本参数。Simulink 环境下搭建金鹰优化 PID 控制系统的仿真模型, 如图 5 所示。

### 4.2. 仿真结果比较与分析

为了验证 IGEO 算法预测 PID 参数的控制效果, 对图 4 所示的温控系统在 Matlab 中进行了仿真。对 GEO 算法和 IGEO 算法在 ITAE 独立下重复进行 6 次实验, 实验结果如表 1 所示, 两种算法关于 ITAE 适应度值寻优比较结果如表 2 所示。



**Figure 5.** Golden Eagle optimized PID simulation model  
**图 5.** 金鹰优化 PID 仿真模型

**Table 1.** Comparison of fitness values from 6 experimental results between GEO algorithm and IGEO algorithm  
**表 1.** GEO 算法与 IGEO 算法寻优适应度值 6 次实验结果对比

算法/次数	1	2	3	4	5	6
GEO	1337.1045	1325.1738	1367.4878	1484.1075	1327.2514	1395.2541
IGEO	1174.3786	1160.7596	1189.7014	1207.1540	1161.2784	1194.1546

**Table 2.** Comparison of fitness values between GEO algorithm and IGEO algorithm  
**表 2.** GEO 算法与 IGEO 算法寻优适应度值比较

算法	最优值	最差值	平均值	标准差
GEO	1325.1783	1484.1075	1372.1299	55.5893
IGEO	1160.7596	1207.1540	1181.2378	17.1994

从上述数据可以看出, IGEO 算法的寻优适应度值结果比 GEO 算法寻优适应度值结果更小, 数据离散程度也比 GEO 算法更小, 同时计算的适应度值与 GEO 算法比也更为稳定。图 6 是两种算法的适应度值与迭代次数的关系, 随着算法的迭代, 适应度值最终稳定为一个准确值。取第二组(适应度值最优组)数据的适应度值变换曲线。从结果可以看出, IGEO 算法无论是初始寻优速度、收敛速度, 还是寻优结果上来看, 都明显优于 GEO 算法。

因此选取 IGEO 第二组(适应度值最优组)的 IGEO 模型以及常规 PID 算法计算的 PID 整定参数, 其中设定值为 190℃, 常规 PID 控制效果与 PSO-PID 控制效果对比结果如图 7 所示。由图 7 可知, 经过人工调参的 PID 值, 在 IGEO 的优化下进一步提升了控制效果, 常规 PID 波峰为 219.2℃, 超调量为 29.2%, 达到稳态的时间为 70.3 s。经过 IGEO 算法优化后, 波峰为 193.8℃, 超调量为 3.8%, 稳态时间为 47.6 s。IGEP 优化 PID 超调量是常规 PID 超调量的 13.01%, 稳态所需时间为 67.71%。在相同的外界温降干扰下, IGEO 优化的 PID 响应速度更快, 达到稳态所需时间更短。由此可见, 使用 IGEO 优化 PID 控制算法比常规 PID 控制算法更能满足塑料激光焊接过程中对温度控制的需求。

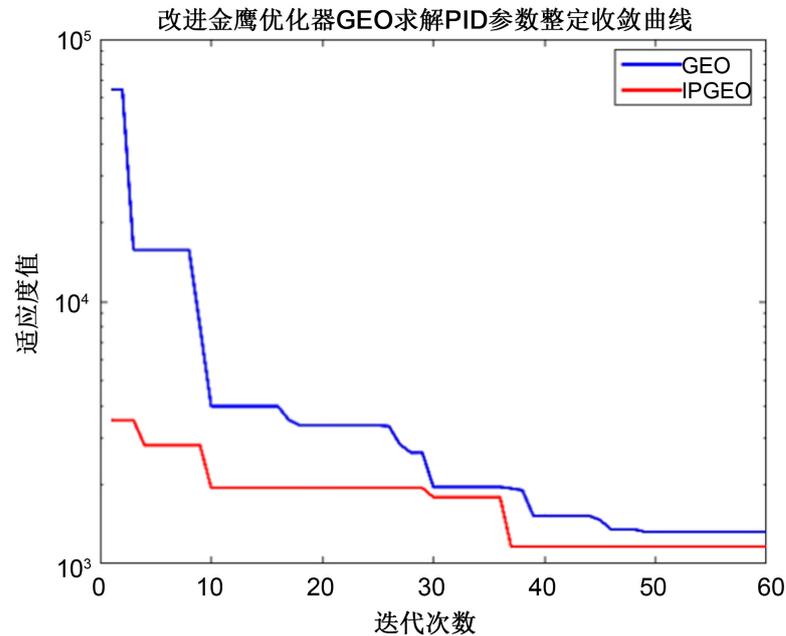


Figure 6. Fitness value change curve  
图 6. 适应度值变化曲线

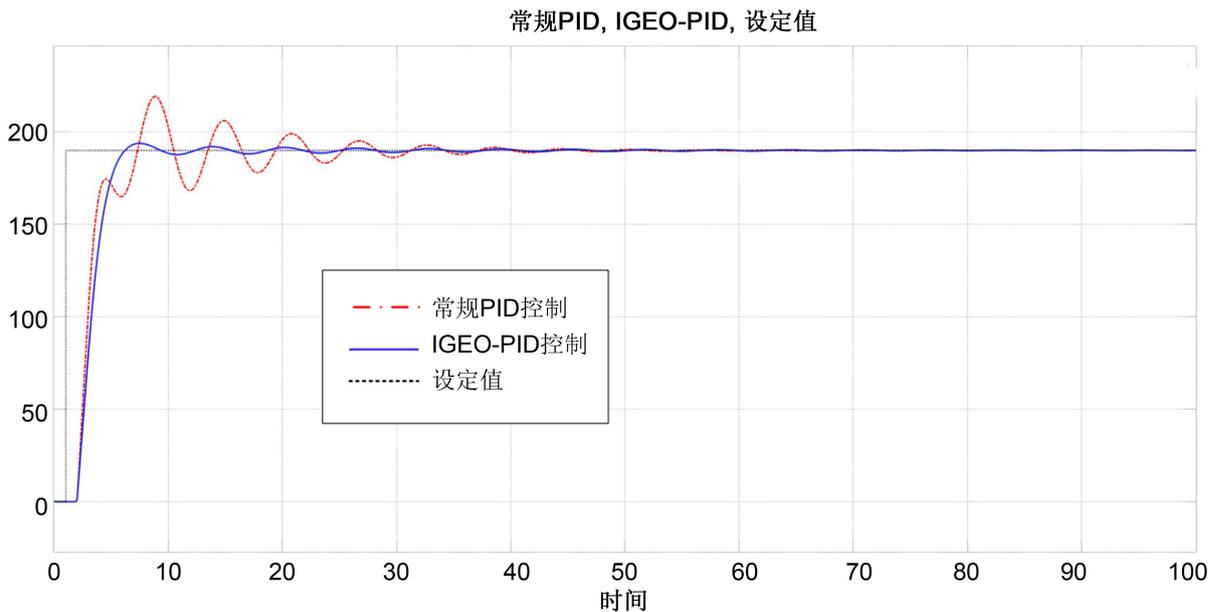


Figure 7. Simulation effect diagram of conventional PID and IGEO optimized PID parameters  
图 7. 常规 PID 与 IGEO 优化 PID 参数仿真效果图

## 5. 结语

本文通过对塑料激光焊接系统需求的分析, 在 Matlab-Simulink 环境中进行程序编写和仿真模型的搭建。在 GEO 算法中引入对称映射优化与变异算法, 得到了 IGEO 算法, 经过六组实验证明 IGEO 算法相较于 GEO 算法寻优适应度值的结果更小, 数据离散程度也更小, 适应度值的计算也更为稳定。运行仿真文件得到常规 PID 和 IGEO-PID 塑料激光焊接系统温度控制的仿真对比效果。实验结果表明, IGEO-PID

不仅在理论上成立, 而且在达到稳态的时间、超调量大小等方面效果优于常规 PID。因此, 该系统有利于提高塑料激光焊接系统温度控制的效率, 同时提高了系统稳定性, 降低了安全隐患。

## 参考文献

- [1] 王象庚, 陈佩圆, 李进, 等. 硅灰热焊接改性塑料颗粒对砂浆抗压强度与微结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(6): 1975-1982.
- [2] 徐建华. 塑料加工业朝着绿色化智能化高端化发展[N]. 中国质量报, 2023-03-07(3).
- [3] 孔茗, 傅戈雁. 塑料激光焊接技术在汽车制造中的应用[J]. 塑料科技, 2018, 46(12): 68-71.
- [4] 侯亚平. 碳罐电磁阀塑料激光焊接机温度控制策略优化及控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [5] 刘海华, 姜宁, 郝云, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯工艺参数对接触热导率的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 56-64.
- [6] Kennedy, J. and Eberhart, R. (2002) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95—International Conference on Neural Networks*, Perth, 27 November-1 December 1995, 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/icnn.1995.488968>
- [7] Holland, J.H. (1992) Genetic Algorithms. *Scientific American*, **267**, 66-72. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0792-66>
- [8] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A. (2014) Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, **69**, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- [9] Mohammadi-Balani, A., Dehghan Nayeri, M., Azar, A. and Taghizadeh-Yazdi, M. (2021) Golden Eagle Optimizer: A Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, **152**, Article ID: 107050. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107050>
- [10] 李楠, 薛建凯, 舒慧生. 基于自适应 t 分布变异麻雀搜索算法的无人机航迹规划[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 69-74.