

# 基于改进蜣螂算法的恒温热水器 PLC 控制系统设计与实现

王晓瑜<sup>1</sup>, 白利晨<sup>2</sup>, 宋 鹤<sup>1</sup>

(1. 西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**针对恒温热水器系统稳定性和精确性要求,提出了改进蜣螂算法优化 PID 控制器策略,建立了恒温控制系统数学模型并在 MATLAB 仿真实现;搭建了恒温控制实验系统,设计了拓扑图和控制流程图,控制器选用西门子 S7-1200 PLC 及拓展模块,在 TIA Portal V18 环境下编写电加热器调温控制程序,使用触摸屏完成监控界面搭建。实验结果表明,通过改进蜣螂算法的恒温控制策略,系统快速性提高 31.3%,超调量减少 91.8%,触摸屏实时监测与操作,满足恒温控制系统稳准快的控制目标,具有较好的参考价值。

**关键词:**恒温控制系统;改进蜣螂算法;PID 控制;PLC;触摸屏

**中图分类号:**TP336

**文章编号:**1000-0682(2026)04-0015-05

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.003

## Design and implementation of a constant temperature water heater PLC control system based on the improved dung beetle algorithm

WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, BAI Lichen<sup>2</sup>, SONG He<sup>1</sup>

(1. Electronic Engineering College, Xi'an Aeronautical Institute, Shaanxi Xi'an 710077, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi Xi'an 710055, China)

**Abstract:**In response to the stability and accuracy requirements of the constant temperature water heater system, an improved dung beetle algorithm for optimizing the PID controller strategy was proposed. A mathematical model of the constant temperature control system was established and implemented in MATLAB simulation. A constant temperature control experimental system was built, and the topology diagram and control flow chart were designed. The controller was the Siemens S7-1200 PLC and its expansion module. The temperature control program for the electric heater was written in the TIA Portal V18 environment, and the monitoring interface was built using a touch screen. The experimental results show that through the improved dung beetle algorithm for constant temperature control strategy, the system's rapidity is increased by 31.3%, and the overshoot is reduced by 91.8%. The real-time monitoring and operation through the touch screen meet the control goals of stability, accuracy, and rapidity of the constant temperature control system, and have good reference value.

**Keywords:**constant temperature control system; improved dung beetle algorithm; PID controller; PLC; touch screen

## 0 引言

近年来,越来越多的智能算法被提出,改进蜣螂算法优化 PID 控制器参数借助 PLC 控制器应用于工业自动化、流程行业以及过程控制等行业。文献[1]采用蜣螂算法对四类蜣螂位置进行贪婪选择,

收稿日期:2025-12-27

基金项目:陕西省科技厅项目(2025JC-YBQN-944);陕西省一流线下课程(陕教[2021]107号)

第一作者:王晓瑜(1974—),女,陕西西安人,博士,教授,现从事智能控制算法教研工作。E-mail:1143468861@qq.com

最终获得最优解 PID 控制器预测方法, 仿真证明该方法明显减小了系统误差并增加了控制参数的鲁棒性。文献[2]设计了一种基于蜣螂算法优化的模糊 PID 控制器, 仿真证明该方法显著提升了系统的静态、动态稳定性。文献[3]通过在蜣螂优化算法中引入非支配排序策略与拥挤距离计算, 有效提升了算法的精度与收敛性能。仿真实验结果显示, 在泊位分配与能量调度时减小了运行成本和船只的等待时间。文献[4]提出了一种多策略增强的蜣螂优化算法, 在实际工程应用时体现了其优越性。因此, 针对工业控制等行业恒温控制的准确性与快速性问题, 提出了改进蜣螂算法(improved dung beetle algorithm, IDBO)优化 PID 控制器参数的方法, 采用灰箱法进行数据驱动建模; 设计恒温热水器实验系统, 控制器选用 SIMATIC S7-1200PLC 并完成控制器程序的编写与调试, 监控与操作设备选用触摸屏, 通过仿真与实验共同验证, 表明 IDBO 算法优化的 PID 参数, 在温度控制时调节时间缩短, 超调量减小, 控制稳定性提升。

## 1 恒温热水器控制系统的数学模型建立

根据能量守恒定律, 得出相对应的热平衡方程, 经过求解可以得出系统的数学模型为:

$$G(s) = \frac{T(s)}{U(s)} = \frac{K_u}{CMs + HAT} \quad (1)$$

式中:  $C$  是比热容;  $M$  是电热丝质量, g;  $T$  是炉内温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  是时间;  $K_u$  是比例系数;  $H$  是热传递系数;  $A$  是传热面积;  $T_0$  是环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

实际系统存在时延, 近似确定系统结构为具有时延的一阶惯性环节:

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s} \quad (2)$$

$$\text{式中: } K = \frac{K_u}{HAT}, T = \frac{CM}{HAT}.$$

使用灰箱模型法建立数学模型, 通过阶跃响应法辨识系统的传递函数  $G$ 。LabVIEW 采集 PLC 中的温度与电压数据后, 将数据导入 MATLAB 的系统模型辨识箱, 最终辨识出系统数学模型式(2)的参数, 如图 1 所示, 图中黑色线条为实际温度曲线, 蓝色为传递函数拟合的温度曲线, 拟合度为 93.63%, 表明辨识的传递函数与实际系统高度相似<sup>[5]</sup>。

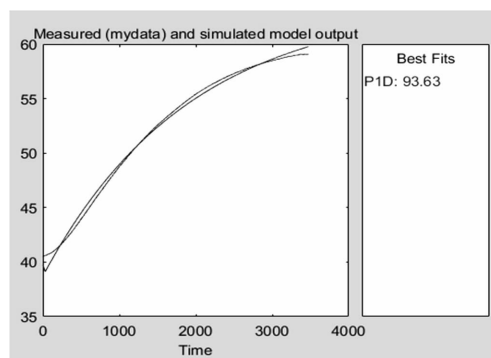


图 1 数据系统辨识拟合结果

辨识后的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{7.0938}{1 + 1909.9s} e^{-30s} \quad (3)$$

## 2 蜣螂算法设计及其改进

### 2.1 蜣螂算法

蜣螂优化算法(DBO)由薛建凯等人于 2022 年提出, 其设计灵感来源于蜣螂在自然界中表现出的滚球、舞蹈、繁殖、觅食及偷窃等一系列行为<sup>[6]</sup>。该算法通过模拟以上行为机制来实现全局优化求解。与其他优化算法相比, DBO 在收敛速度、解的精确性方面展现出较好的性能, 尤其在处理单目标优化问题时具有一定优势。

#### 2.1.1 滚球蜣螂

模拟蜣螂滚粪球行为, 并利用自然光导航, 蜣螂快速推动粪球沿直线滚动。位置更新公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + a \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x \quad (4)$$

$$\Delta x = |x_i(t) - X^w|$$

式中:  $x_i(t+1)$  为第  $i$  个蜣螂下一时刻位置;  $x_i(t)$  为第  $i$  个蜣螂当前时刻位置;  $x_i(t-1)$  为第  $i$  个蜣螂上一时刻位置;  $a$  代表蜣螂方向是否偏离, 通常为 1 或 -1;  $k \in (0, 0.2]$ , 通常取值为 0.1 作为偏转系数;  $b \in (0, 1]$ , 通常取值为 0.3 作为自然系数;  $X^w$  代表适应度函数值最差的蜣螂位置。

#### 2.1.2 孵卵蜣螂

蜣螂将推行的粪球藏匿在一个安全位置, 也就是边界选择策略。位置更新公式为:

$$Lb^* = \max(X^* \times (1 - R), Lb) \quad (5)$$

$$Ub^* = \max(X^* \times (1 + R), Ub)$$

式中:  $Lb^*$  和  $Ub^*$  分别为安全位置的下限和上限;  $Lb$  和  $Ub$  分别为蜣螂搜索的下限和上限;  $X^*$  为本次迭代局部最优蜣螂位置;  $R$  为惯性权值其式如下:

$$R = 1 - t/t_{\max} \quad (6)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $t_{\max}$  为最大迭代次数。

### 2.1.3 小蜣螂

小蜣螂在特定的觅食区域内寻找食物, 这个觅食区域通常围绕当前种群中的最佳位置, 即局部最佳位置, 用于实现局部的探索 and 开发。位置更新公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - Lb^*) + C_2 \times x_i(t) - Ub^* \quad (7)$$

式中:  $C_1$  为随机数并满足正态分布;  $C_2$  为范围满足  $(0, 1)$  的随机向量。

### 2.1.4 小偷蜣螂

偷窃其他蜣螂的粪球, 在种群中随机选择, 代表当前的解, 并更新自己的位置。位置更新公式为:

$$x_i(t+1) = X^b + S \times g \times (|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X^b|) \quad (8)$$

式中:  $X^b$  为目前全局最优蜣螂的位置;  $S$  为常数;  $g$  为  $1 \times 3$  维随机向量。

### 2.1.5 改进的蜣螂算法

DBO 算法在搜索过程中初始种群的位置随机分布, 均匀分布搜索空间及种群多样性较差; 而且该算法的种群位置更新灵活度低, 无法调整迭代前/后期的搜索范围, 导致算法过早结束或陷入局部最优解<sup>[7]</sup>。以上问题主要是因为偷窃蜣螂的位置更新权重依赖于当前种群最优值, 这一机制导致该子种群规模有限且多样性不足。为了改善这一问题, 对偷窃蜣螂的位置更新引入自适应  $t$  分布扰动, 通过对其分布位置施加随机扰动来增强该部分的种群多样性。所采用扰动策略基于  $t$  分布的概率密度函数  $f(t)$  为:

$$f(t) = \frac{\text{Gam}(\frac{v+1}{2})}{(\pi v)^{\frac{1}{2}} \text{Gam}(\frac{v}{2})} \times (1 + \frac{t^2}{v})^{-\frac{v+1}{2}} \quad (9)$$

式中:  $\text{Gam}()$  为伽马函数;  $v$  为自由度参数。

自适应  $t$  分布扰动策略的核心在于其自由度参数随迭代过程动态调整。当自由度较低时, 它近似柯西分布, 有利于全局探索; 当自由度趋近无穷大时, 则收敛于高斯分布, 更侧重于局部开发。因此, 设计了一种随迭代次数增加而增长的自由度调整公式, 使得扰动机制在进化初期偏向柯西分布特性, 促使算法进行大范围探索, 有效避免早熟收敛。随着不断迭代, 扰动从柯西分布逐步过渡到高斯分布特性, 提升算法在局部区域的精确探索, 从而提升收敛精确度与缩短收敛时间。该策略显著增强了算法在全局探索与局部开发间的自适应平衡能力, 最终提

升了整体寻优性能。具体位置更新方式如下:

$$x_i(t+1) = (|x_i(t) - t(C_{\text{iter}}) \times X^*|) \times S \times g + |x_i(t) - X^b| + X^b \quad (10)$$

式中:  $t(C_{\text{iter}})$  为自由度参数在不同迭代次数时的  $t$  分布。

## 3 IDBO - PID 控制器

### 3.1 IDBO - PID 控制器结构

传统 PID 控制器参数在调参时需人为调整, 调整后的参数鲁棒性不强、精度低与控制效果差<sup>[8]</sup>。IDBO 具有在大规模范围内易获得全局最优解的特点, 并引入自适应  $t$  分布扰动改进 DBO, 改善其种群位置的分布。

选用 IDBO 算法优化 PID 控制器参数, 其结构见图 2。偏差  $e(t)$  是由设定的目标值  $r(t)$  与测量实际值的负反馈  $y(t)$  叠加。

作为 IDBO - PID 控制器的输入, IDBO 通过智能寻优, 计算出 PID 控制器的 3 个参数: 比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  和积分系数  $K_d$ , 实现对被控对象的调节。采用 IDBO 不断优化 PID 控制器参数值, 达到最优控制效果。

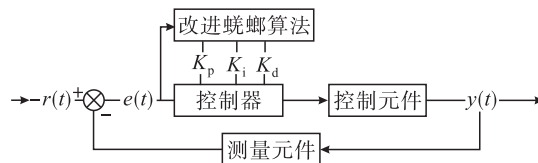


图 2 蜣螂算法整定 PID 控制器结构图

### 3.2 基于 MATLAB 的仿真验证与分析

辨识后的传递函数见式(3)。设定热水器温度  $40^\circ\text{C}$ , 温度波动误差带范围  $\pm 5\%$ , 搭建传统 PID 控制器、DBO - PID 控制器及 IDBO - PID 控制器, 系统的输出响应曲线如图 3 所示, 不同 PID 参数仿真结果对比见表 1。

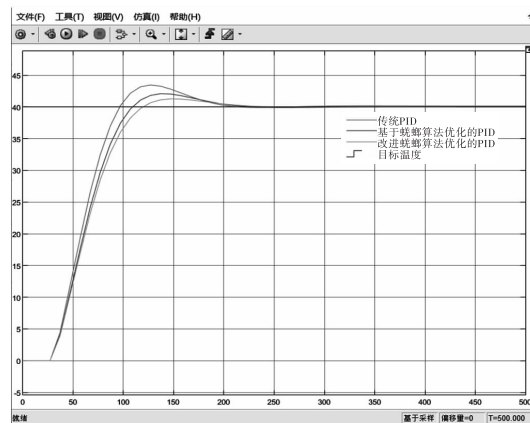


图 3 PID Controller 输出响应曲线

表 1 不同 PID 参数仿真结果对比

|             | 传统 PID 控制器  | DBO - PID 控制器 | IDBO - PID 控制器 |
|-------------|-------------|---------------|----------------|
| $K_p$       | 5.000 0     | 4.751 0       | 4.195 9        |
| $K_i$       | 0.050 000 0 | 0.002 643 6   | 0.002 172 6    |
| $K_d$       | 0.500 00    | 0.167 49      | 0.843 32       |
| $\sigma/\%$ | 7.9         | 4.9           | 3.05           |
| $T_s/s$     | 160.491     | 147.309       | 106.741        |

由图 3 及表 1 可以看出,3 种控制器的输出响应曲线在同样条件下,IDBO - PID 相比传统 PID 快速性提高了 33.49%,相比 DBO - PID 快速性提高 27.54%;该文方法有效性得证。

## 4 基于 IDBO 的恒温热水器控制系统实验实现

### 4.1 系统总体方案设计

基于 IDBO 的恒温热水器控制系统拓扑图如图 4 所示。温度变送器采集热水器温度传送至 S7 - 1200PLC 及拓展模块,PLC 通过 A/D 模数转换为数字量,并将数字量水温送至触摸屏,实现数据的实时远程交互;在触摸屏界面输入设定水温,PLC 接收水温设定值后,通过 PID 模块计算出单相交流调压模块的控制电压并输出模拟量信号,实时调整单相交流调压模块的输出电压,从而控制加热器的电压与水箱温度,最终实现电加热器进行热水器加热的实时控制与监控。

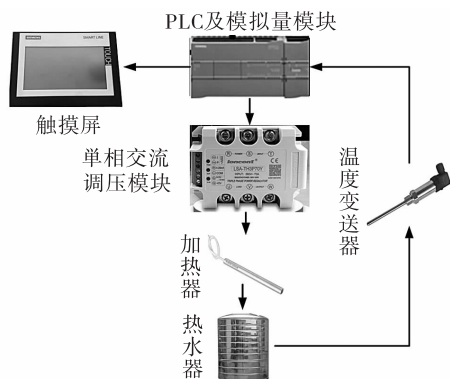


图 4 系统拓扑图

### 4.2 硬件系统设计

核心控制选用西门子 PLC 1214C DC/DC/DC、模拟量输入输出选择模拟量拓展模块 SM1234、西门子触摸屏、JNT - 131 温度变送器、单相全隔离交流调压模块及电加热器各 1 个。

### 4.3 软件系统设计

共两部分:第一部分为 PLC 程序设计,使用 TIA Portal V18 软件编写主程序和数据采集程序,主程序

包含控制系统启停、PID 算法程序和热水器水温模拟量转换程序;数据采集包含建模过程中所需的电压阶跃程序。第二部分为触摸屏平台的画面制作,主要完成恒温热水器远程监控界面管理、相关状态和数据的监控等任务;系统控制运行流程图如图 5 所示。

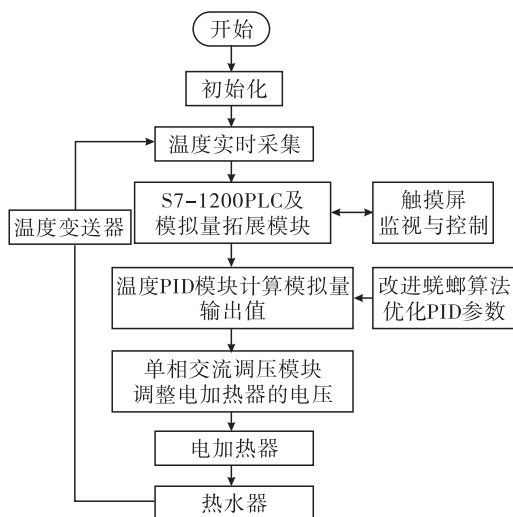


图 5 恒温热水器控制系统运行流程图

系统运行后首先初始化参数,利用温度变送器采集热水器温度并通过 PLC 模拟量拓展模块输入至 PLC;触摸屏通过以太网将温度设定值等信息发送至 PLC,触摸屏采集 PLC 的信号实时显示;PLC 的 PID 模块参数使用 IDBO 优化后的参数,计算出较优的模拟量输出值;通过模拟量拓展模块调整单相交流调压模块的占空比,使电加热器的输入电压调整,最终实现热水器温度的精确控制。

### 4.4 HMI 组态界面搭建与 PLC 通信

#### 4.4.1 HMI 组态界面搭建

使用 WinCC flexible SMART V3 SP1 组态软件开发了两个 HMI 界面,包括登录界面与操作监控界面。恒温热水器的操作监控界面如图 6 所示。

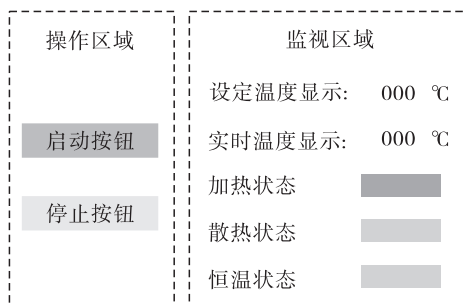


图 6 热水器操作监控界面

#### 4.4.2 PLC 与 HMI 通讯

由于实验涉及多个通讯设备,故通过交换机分

配地址。设置触摸屏地址为 192.168.200.021、PLC 地址为 192.168.200.007,IP 地址为 192.168.200.022,三者通过以太网方式通讯<sup>[9]</sup>。

## 5 改进蜚螂算法的恒温热水器实验系统测试

基于改进蜚螂算法的恒温热水器实验系统如图 7 所示。



图 7 恒温热水器实验系统

系统搭建分 3 部分:热水器温度测量模块、电加热器电压控制模块和系统运行监控模块。

(1)连接温度变送器输出端至 PLC 模拟量拓展模块接线端,配置模拟量输入组态,检测 PLC 能否准确测量热水器温度。通过测量不同水温对比 PLC 采集的温度是否发生变化。

(2)连接 PLC 模拟量拓展模块的输出端至单相交流调压模块,模拟量模块输出 0~10 V 电压控制单相交流调压模块输出电压,从而控制电加热器输入电压。设置输出模拟量信号为 13824,测量单相交流调压模块输出电压是否为输入电压一半,验证控制设备之间的协调性。

(3)通过交换机连接 PLC 与触摸屏,在触摸屏上绘制监控界面、启停按钮等,通过信号传输,观察触摸屏数据、运行状态是否与 PLC 数据一致,若有,则水温监控部分达到控制要求。

实验系统测试结果的不同 PID 参数见前表 1,动态性能指标见表 2。

表 2 不同 PID 参数实验结果对比表

|             | 传统 PID<br>控制器 | DBO - PID<br>控制器 | IDBO - PID<br>控制器 |
|-------------|---------------|------------------|-------------------|
| $\sigma/\%$ | 12.7          | 6.87             | 1.04              |
| $T_s/s$     | 185.624       | 168.577          | 127.509           |

实验结果表明,IDBO - PID 与传统 PID 相比, $T_s$  减少了 31.3%, $\sigma$  也减少了 91.8%;IDBO - PID 与传统 DBO - PID 相比, $T_s$  减少了 24.4%, $\sigma$  减少了 84.9%。实验表明使用改进的蜚螂算法优化 PID

控制器的系统,快速性与超调量均明显减少,控制策略正确有效实现。

## 6 结语

针对恒温热水器水温的稳定性和快速性,设计了改进蜚螂算法优化 PID 控制器参数的控制策略,使用阶跃响应法采集相关历史数据,通过 MATLAB 系统模型辨识箱辨识本系统的数学模型,在 SIMULINK 环境中搭建恒温热水器的仿真模型,仿真结果表明,同对比传统 PID 和 DBO - PID,IDBO - PID 的快速性分别提升 33.49% 和 27.54%,超调量分别提升 61.4% 和 37.8%。

实验实现的控制器选用西门子 S7 - 1200PLC 及模拟量拓展模块,温度变送器测量热水器的水温作为模拟量输入信息,控制单相交流调压模块的输出电压采用模拟量输出信息,从而改变电加热器的输入电压;其次通过触摸屏进行整个系统的启停控制与实时监控。实验结果表明,同对比传统 PID 和 DBO - PID,IDBO - PID 的快速性分别提升 31.3% 和 24.4%,超调量分别提升 91.8% 和 84.9%,实现了热水器温度的快速、精确控制,对实际应用提供较好的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 栾孝驰,汤捷中,沙云东. 基于蜚螂算法优化深度极限学习机的中介轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2024,43(21):96 - 106 + 127.
- [2] 胡杰,陈再宏,胡燕海,等. 基于蜚螂算法的无刷直流电机速度控制仿真研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2024,37(06):73 - 79.
- [3] 徐先峰,鲁婉琪,王俊哲,等. 基于多目标蜚螂优化算法的泊位分配与能量调度联合优化方法[J]. 交通信息与安全,2024,42(05):111 - 123.
- [4] 吴亚中,陈璐,马强,等. 多策略增强的蜚螂优化算法及其工程应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025,53(02):95 - 103.
- [5] 陈青青. 基于事件触发机制的变风量空调系统预测控制方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2023.
- [6] 雷千龙,侯硕,侯义. 基于改进 DBO 的四旋翼无人机自抗扰参数整定[J]. 信息技术与信息化,2025(01):175 - 178.
- [7] 盛斌,张军. 多策略改进蜚螂优化算法及其应用[J]. 制造技术与机床,2025(03):65 - 76.
- [8] 陈禹,陈磊,张怡,等. 多策略改进的蜚螂优化算法及其应用[J/OL]. 无线电通信技术,1 - 12[2025 - 12 - 16].
- [9] 王晓瑜,王聚. 基于 PLC 与 HMI 的自动化仓库试验台设计与实现[J]. 电子设计工程,2024,32(19):103 - 107.