

# 基于分段式粒子群优化 GA - PID 算法的精准施肥控制系统研究

郭辉<sup>1</sup> 罗清瑜<sup>1</sup> 饶志强<sup>2</sup> 甄军<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆天诚农机具制造有限公司, 铁门关 841007;  
3. 新疆农业大学交通与物流工程学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 针对传统外槽轮式排肥器在排肥过程中存在显著脉动性,排肥均匀性较差的问题,本研究提出了一种基于分段粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA)相结合的PID控制方法,并设计了对应的精准施肥控制系统。结合 PSO 算法快速寻找局部最优解的能力和 GA 算法高效的全局搜索能力,实现精准施肥系统的快速响应和高精度肥料流量调控。通过适应度试验和分段优化试验,对上述控制算法进行性能评估,并搭建施肥流量试验平台进行台架试验和土槽试验,以验证控制器的大田适应性。试验结果表明:PSO 优化的 GA - PID 算法在适应度试验中表现出显著优势,仅 13 次迭代就收敛于 0,算法精度和迭代速度均优于 GA,PSO 算法。分段优化试验显示,精准施肥控制系统的最短响应时间为 0.36 s,相较于未采用 PSO 优化 GA 算法的分段优化的控制系统,响应时间降低了 91.44%。台架试验和土槽试验的施肥精度平均值分别为 98.07% 和 97.69%。上述试验结果表明,该控制算法满足精准施肥系统快速响应和高精度施肥的需求,提高了控制系统鲁棒性,为固体颗粒肥高精度调控提供了理论和实践依据。

**关键词:** 精准施肥; 自动控制; 粒子群算法; 遗传算法; 分段式 PID 算法

中图分类号: S232.3; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)05-0230-11

OSID:



## Precision Fertilization Control System Based on Segmented Particle Swarm Optimization GA - PID Algorithm

GUO Hui<sup>1</sup> LUO Qingyu<sup>1</sup> RAO Zhiqiang<sup>2</sup> ZHEN Jun<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China  
2. Xinjiang Tiancheng Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Tiemenguan 841007, China  
3. College of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Traditional external slot-type fertilizer distributors exhibit significant pulsation during the fertilizing process, leading to poor uniformity of fertilizer application. To address these issues, a PID control method was proposed based on combination of segmented particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA), and a corresponding precision fertilization control system was designed. This method leveraged the ability of PSO to quickly find local optimal solutions and the efficient global search capability of GA to achieve rapid response and high-precision fertilizer flow regulation in the precision fertilization system. The performance of the control algorithm was evaluated through fitness tests and segmented optimization tests, and a fertilization flow test platform was established for bench tests and soil bin tests to verify the adaptability of the controller in the field. The results showed that the GA - PID algorithm optimized by PSO demonstrated significant advantages in the fitness test, converging to 0 in only 13 iterations, with higher precision and faster iteration speed compared with GA and PSO algorithms alone. The segmented optimization test indicated that the shortest response time of the precision fertilization control system was 0.36 s, which was 91.44% reduction compared with the system without the PSO-optimized GA algorithm. The average fertilization accuracy in bench tests and soil bin tests was 98.07% and 97.69%, respectively. These results demonstrated that the control algorithm met the requirements of rapid response and high-precision fertilization, enhanced the robustness of the control system, and provided theoretical and practical support for high-precision regulation of solid granular

fertilizers.

**Key words:** precision fertilization; automatic control; particle swarm algorithm; genetic algorithm; segmented PID algorithm

## 0 引言

变量施肥是精准农业的重要组成部分,不仅能够降低种植成本,还能改善土壤质量<sup>[1]</sup>。目前在精准施肥控制系统中,随速变量施肥控制系统仍然存在车速测量延迟性高、开环施肥控制系统精度度较低、传统 PID 控制变量施肥的系统延迟性高、适用于水肥一体化的精准控制施肥系统在控制固体颗粒肥方面的应用较为困难等问题<sup>[2-5]</sup>。因此,实施变量施肥对施肥控制方法提出了更高要求,研究更加高效的施肥控制技术成为实现变量施肥的重要途径<sup>[6]</sup>。

近年来国内外学者针对变量施肥技术进行了广泛研究。想要实时调节肥料流量大小,必须要从算法方面进行研究。曹梦龙等<sup>[7]</sup>提出一种基于改进蝗虫优化算法的模糊神经网络 PID 控制算法,解决了传统模糊神经 PID 控制算法易出现网络参数调整不合适导致控制效果差的问题。朱凤磊等<sup>[8]</sup>设计一种基于蝙蝠算法(BA)优化的 BP 神经网络 PID 控制器,系统平均调节时间为 41.24 s,实现对水肥一体化系统中肥料流量的快速精准控制。王辉等<sup>[9]</sup>设计了施肥播种机高精度肥料流量控制系统,系统采用肥料流量检测模块获取实时肥料流量并作为反馈输入,在匀速车速下,施肥量控制精度平均值为 97.81%。苏中滨等<sup>[10]</sup>提出基于粒子群算法(PSO)和模拟退火算法的二自由度 PID 控制器,实现对无人自转旋翼机的有效控制。MENG 等<sup>[11]</sup>设计了一种基于 PSO 优化的 BP 神经网络 PID 控制器,实现了对液体肥料的精准控制,该系统平均调节时间为 41.17 s。虽然目前对于 PID 控制器的算法方面有一定的进展,但当前国内在变量施肥系统的研究仍处于起步阶段<sup>[12-13]</sup>,尤其是精准施肥系统在控制固体颗粒肥流量的研究上,控制系统的调节时间较长,控制精度还有待提高<sup>[14]</sup>。

在 PID 控制器的优化中,遗传算法 GA 通过交叉与变异操作生成多样化的种群,帮助搜索空间中的不同区域,但可能存在早期收敛的问题<sup>[15-23]</sup>。PSO 算法通过在全局搜索空间中不断调整粒子的位置和速度<sup>[24]</sup>,能够有效避免陷入局部最优解<sup>[25-26]</sup>。

在施肥作业时,不同目标施肥量、车速和施肥口宽度下,为实现高精度、低超调、快速响应的变量控

制施肥,本研究通过引入 GA 算法和 PSO 算法相结合的优化方法,改进传统 PID 控制模型,针对不同变量需求优化变量施肥控制参数,将固体肥料的实时流量值作为控制系统的反馈值,提高系统的精准性与稳定性。

## 1 系统结构与原理

### 1.1 系统结构

精准施肥控制系统结构图如图 1 所示,主要由 PLC 工控一体机、霍尔测速传感器、霍尔转速传感器、变频器和施肥电机组成。PLC 工控一体机为三菱 FX3U-430E 型,配有 4.3 英寸触摸屏、8 路继电器输出、4 路 AD 输入、2 路 DA 输出和 12 路 X 点输入模块。用户通过触摸屏设置目标施肥量、播种机幅宽和电机数量,系统可根据车速实时调控施肥量,并监控施肥流量、车速、地膜和滴灌带状态。变频器为 HY-20A-2PWM 型直流电机调频器,控制电机转速。施肥电机为 12V-50W 型直流电机。两个霍尔测速传感器分别安装在覆土滚筒的两侧,选用 M30-12V 型电感式传感器(沃奇电气有限公司)。霍尔转速传感器用于测量施肥流量,选用 M10-12V 型电感式传感器(沃奇电气有限公司)。

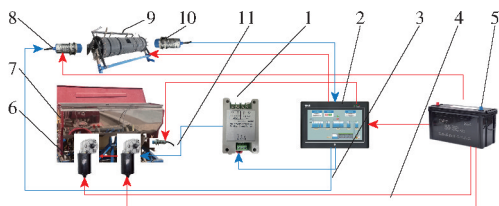


图 1 精准施肥控制系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of precision fertilization control system

1. 变频器 2. PLC 工控一体机 3. 数据传输线 4. 电源线 5. 拖拉机蓄电池 6. 施肥电机 7. 肥料箱 8. 1号霍尔测速传感器
9. 覆土滚筒 10. 2号霍尔测速传感器 11. 霍尔转速传感器

### 1.2 施肥流量控制原理

施肥流量控制原理如图 2 所示。用户在 PLC 工控一体机触摸屏输入目标施肥量、作业幅宽和施肥电机数量,两个霍尔测速传感器实时扫描播种机车速。系统根据车速和目标施肥总量计算实时施肥流量,传感器测量电机转速,计算实际施肥流量。控制系统通过 PSO 优化的 GA-PID 控制模块对比目标量与实际量,通过 PLC 的 DA 模拟量输出模块调节变频器,进而调节施肥电机转速,实现变

量施肥。

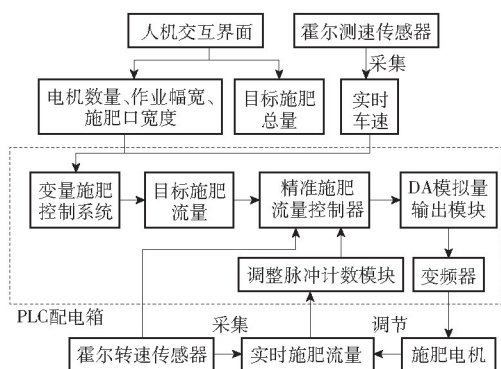


图2 施肥流量控制原理图

Fig. 2 Schematic of fertilization flow control

### 1.2.1 速度检测

速度检测系统是依靠安装在覆土滚筒旁两侧的霍尔测速传感器来实现检测。若已知播种机的覆土滚筒直径为  $D$ , 则播种机行驶速度为<sup>[27]</sup>

$$V = \frac{3.6m_1\pi D}{16t_1} \quad (1)$$

式中  $V$ ——播种机行驶速度, km/h

$m_1$ ——在  $t_1$  时间间隔内扫描监测到的磁钢出现次数

$t_1$ ——速度检测时间间隔, s

1号霍尔测速传感器所测量的速度为  $V_1$ , 2号霍尔测速传感器所测量的速度为  $V_2$ , 比较1s内  $V_1$  与  $V_2$  的速度大小, 取最大测量速度为行驶速度  $V$ 。

### 1.2.2 施肥控制

根据外槽轮施肥器的工作原理, 变量施肥控制模型为<sup>[14]</sup>

$$Q = \frac{0.6q}{k_v VBN} \quad (2)$$

式中  $Q$ ——目标总施肥量, kg/hm<sup>2</sup>

$q$ ——单个施肥电机每分钟排肥量, g/min

$B$ ——作业幅宽, 即相邻两个施肥电机之间的距离, m

$N$ ——施肥电机数量, 取2

$k_v$ ——机具打滑率, 由于该施肥控制系统是由伺服电机驱动排肥轴转动, 根据实际田间试验, 打滑率选用1.05<sup>[28]</sup>

进行PLC的DA模拟量输出模块的控制电压与电机转速之间的回归试验。得到控制电压与电机转速之间的关系, 即

$$n = 15.71V_c - 20.32 \quad (3)$$

式中  $n$ ——电机转速, r/min

$V_c$ ——控制电压, V

式(3)符合一元一次线性回归曲线特性, 其拟合方程的决定系数为0.9998。

### 1.2.3 施肥流量与电机转速和施肥宽度的回归方程拟合

由于施肥流量是由施肥电机转速与肥料箱的施肥口缝隙宽度双因素决定的, 故经过标定试验, 得到了不同施肥缝隙宽度、电机转速条件下单位时间内的施肥流量, 利用Matlab软件进行二元一次线性方程拟合, 得到的拟合方程为

$$q = -28.9090 + 26.0226n + 1.1075L \quad (4)$$

式中  $L$ ——施肥口宽度, mm

式(4)的拟合系数  $R^2$  为0.9978, 拟合系数较高, 说明施肥流量  $q$  与电机转速  $n$ 、施肥口宽度  $L$  的线性拟合度较强。

### 1.2.4 施肥流量检测模型

实际施肥流量的检测主要通过安装在施肥电机转轴旁的霍尔转速传感器来测量<sup>[28]</sup>, 该传感器为高速转速传感器, 为精准测量实际施肥流量, 在施肥电机转轴上安装了4个感应磁铁, 传感器每感应到1次,  $m_2$  则加1, 其公式为

$$n_a = \frac{15m_2}{t_2} \quad (5)$$

式中  $n_a$ ——实际施肥电机转速, r/min

$t_2$ ——测量电机转速时间, s

$m_2$ —— $t_2$  时间内霍尔转速传感器监测到的感应磁铁出现的次数

## 2 PSO改进分段式GA-PID系统模型的建立

霍尔测速传感器测量车速, 用户在触摸屏输入的目标施肥流量和施肥口宽度等参数作为施肥控制系统的输入, 霍尔转速传感器实时反馈实际施肥流量。系统通过对比目标与实际施肥流量, 控制器计算输出模拟信号传递给PLC的DA模块, 驱动变频器调节电机完成闭环控制。

为减少误差并提高仿真模型的稳定性, 需优化PLC的PID控制逻辑。具体为: 根据式(2)将目标总施肥量计算转换为目标施肥流量, 然后根据式(3)、(4)将目标施肥流量进一步计算转换为对应的目标电压值, 最终建立PLC DA控制端输出的控制电压与电机转速之间的传递函数, 此方法减少中间变量, 降低误差, 实现精准施肥系统的优化控制。

### 2.1 施肥控制系统数学模型的建立

根据实际施肥系统以及相应施肥电机特性, 无明显延迟现象<sup>[9]</sup>, 选用一阶传递函数来描述精准施肥控制系统的数学模型, 用拉普拉斯变换来表示施肥电机的输入和输出, 即

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_{s1}s + 1} \quad (6)$$

式中  $G_1(s)$ ——施肥控制模块的传递函数

$K_1$ ——系统增益系数,表示系统的稳态响应

$T_{s1}$ ——系统时间常数,取 1

$s$ ——拉普拉斯变换中的复频率变量

根据式(3)和式(4)将目标施肥流量所对应的目标施肥电压作为开环系统的输入,采样时间间隔为 1 s,获得施肥电机电压变化的数据。采用一阶近似方法<sup>[8]</sup>,在 Matlab 软件中对数据进行拟合, $K_1$  取 15.71。

式(6)的传递函数作为后续建立仿真 PID 控制器的数学模型。

## 2.2 离散 PID 控制器设计

由于 FX3U 型 PLC 是一种数字控制器,它通过采样周期对数据进行离散化处理,并基于离散时间实现 PID 控制算法。

离散 PID 控制器的输出  $u(k)$  公式为<sup>[8]</sup>

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d (e(k) - e(k-1)) \quad (7)$$

式中  $e(k)$ ——当前误差

$e(k-1)$ ——上个采样周期误差

$K_p, K_i, K_d$ ——比例、积分和微分增益系数

$e(i)$ ——第  $i$  个采样时刻的系统误差

FX3U 中的 PID 算法依赖于设定的采样时间,采样时间决定了 PID 控制的响应速度。如果采样时间较长,控制响应会变慢;如果过短,则可能导致控制系统不稳定。根据实际试验标定,采样时间设为 100 ms。FX3U PLC 还提供了积分上限和下限设置,可以防止积分饱和(即积分项过大导致系统失控)。上限根据变频器的变压调节范围设为 500,下限最低输出不能为负值,因此设为 0。

将上述数学模型写入 Matlab 的 PID 仿真模块,响应模块选用式(1),经过试凑法<sup>[17]</sup>试验标定,可得 1 组初始的 PID 参数: $K_p = 1, K_i = 0.1, K_d = 0.1$ 。

离散型 PID 控制器在稳定性较高、线性控制性能较强的控制系统中应用较为广泛,但是对于随速精准变量施肥、喷药这种具有复杂的非线性控制性能的系统来说,其控制精度和面对复杂大田环境下的响应速度均不能达到理想效果<sup>[29-31]</sup>。

## 2.3 基于遗传算法 GA 优化的 PID 控制器设计

遗传算法 GA 优化的 PID 控制器是针对上述问题提出的一种控制策略。GA 是一种启发式的全局优化方法,它模仿生物进化的过程,用于优化问题求解<sup>[16]</sup>。在 PID 参数优化中,GA 通过选择、交叉和变异等操作来寻找合适的 PID 控制参数( $K_p, K_i, K_d$ )。

GA 算法优化 PID 控制器的结构如图 3 所示。

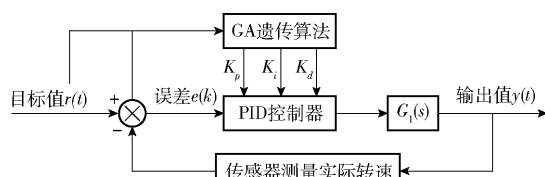


图3 基于GA遗传算法的PID控制器结构图

Fig. 3 Structure diagram of PID controller based on GA genetic algorithm

具体运算步骤为:

### (1) 初始种群生成

根据 2.2 节得到的 PID 参数在后续 GA 算法随机生成 PID 初始参数时,该组 PID 参数为 GA 算法提供合理随机初始化参数起点,其次,PID 参数的变异会受到范围限制,试凑法确定的初始参数在此范围之内,因此,这些参数可以在一定范围内进一步微调优化,而不会偏离合理值<sup>[3]</sup>。在代码中,通过 generate\_random\_pid() 函数初始化一个随机种群,其中每个个体均是 3 个维度(即  $K_p, K_i, K_d$ ),维度参数范围为: $K_p \in [0, 2], K_i \in [0, 1], K_d \in [0, 1]$ 。种群个数  $N$  为 50,迭代次数设为 200 次,变异概率选为 0.1<sup>[25]</sup>,交叉概率设为 0.7。

### (2) 定义适应度函数

适应度函数以 ITSE(积分时间平方误差)、ITAE(积分时间误差)<sup>[20]</sup>、稳定时间<sup>[25]</sup>等性能指标为目标,其表达式为

$$J = \int_0^T w_1 t e(t)^2 dt + \int_0^T w_2 t |e(t)| dt + w_3 t_3 \quad (8)$$

式中  $e(t)$ ——系统误差

$t_3$ ——系统稳定时间,即调节时间

$w_1, w_2, w_3$ ——权值,分别取 0.001、0.999、2.0

$J$ ——适应度函数的值(目标函数值)

$T$ ——积分上限时间

$t$ ——积分变量,表示 0 ~  $T$  的连续时间

公式(8)的目标是使  $J$  最小。

### (3) 轮盘赌选

使用轮盘赌选择方法选择较好的个体进入下一代,轮盘赌选择通过计算个体适应度的选择概率  $P$  实现,计算式为

$$P(i) = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (9)$$

式中  $f_i$ ——个体  $i$  的适应度

$f_j$ ——个体  $j$  的适应度

### (4) 交叉操作

交叉是遗传算法中的核心操作,用于通过交换两个个体的部分基因来生成新个体。假设两个父代

个体表示为

$$\begin{cases} Parent_1 = [K_{p1}, K_{i2}, K_{d2}] \\ Parent_2 = [K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}] \end{cases} \quad (10)$$

交叉操作后,生成的两个子代个体可以表示为

$$\begin{cases} Child_1 = [K_{p1}, K_{i2}, K_{d2}] \\ Child_2 = [K_{p2}, K_{i2}, K_{d1}] \end{cases} \quad (11)$$

(5) 变异操作

变异通过随机改变个体的一个或多个基因来增加种群的多样性。参数变异后为

$$\begin{cases} K'_p = K_p + \delta K_p \\ K'_i = K_i + \delta K_i \\ K'_d = K_d + \delta K_d \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\delta$ ——随机扰动量

在不同车速下,施肥系统可能表现出多种动态特性(如超调量和响应时间的变化),生成 10 组经 GA 算法优化后的 PID 参数作为 PSO 优化的初始种群,这些参数均为控制系数的较优解<sup>[32]</sup>。GA 容易陷入这些局部最优解,导致优化后的 PID 参数在某些车速下表现良好,但在其他车速下性能下降。本研究通过交叉操作及式(12),生成 10 组被 GA 算法优化后的 PID 参数,该参数为控制系统较优解,作为 PSO 优化的初始种群。这一过程为 PID 控制器提供了多样化且符合实际情况的参数选择,增强了 PSO 优化 GA-PID 控制器的大田适用性。

### 2.4 基于 PSO 改进分段式 GA-PID 控制器设计

通过 GA 优化后得到的较优参数在初始阶段就已接近最优解,使得 PSO 算法在寻找全局最优解时更为高效。该控制器系统结构如图 4 所示。

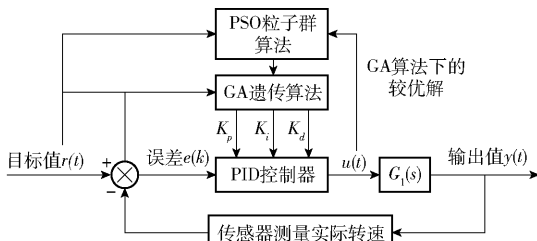


图 4 PSO 改进 GA-PID 算法控制器结构图

Fig. 4 PSO improved GA-PID algorithm controller structure diagram

具体代码步骤如下:

(1) 选取 GA 优化后的最佳 10 组参数作为 PSO 优化的初始位置,则粒子数量 pso\_num\_particles 为 10;粒子群初始速度设为 0。

(2) 速度和位置更新:每个粒子根据自身的历史最佳位置和全局最佳位置更新速度。由于式(13)粒子收敛过快,导致陷入局部最优解,因此添加惯性权重  $w$ ,其表达式为

$$v_i(k+1) = v_i(k) + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (g - x_i) \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_i^{(k+1)} = w v_i^{(k)} + c_1 r_1 (p_i - x_i^{(k)}) + c_2 r_2 (g - x_i^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $c_1$ ——自我认知系数,取 0.5<sup>[33]</sup>

$c_2$ ——社会认知系数,取 0.5<sup>[33]</sup>

$r_1, r_2$ ——随机数,用于增加随机性

$p_i$ ——粒子历史最佳位置

$g$ ——全局最佳位置

$k$ ——当前迭代次数

$v_i$ ——粒子速度向量

$x_i$ ——粒子位置向量

$v_{id}^{(k+1)}$ ——粒子  $i$  在第  $k+1$  次迭代时,第  $d$  维的速度向量

$x_{id}^{(k)}$ ——粒子  $i$  在第  $k$  次迭代时,第  $d$  维的位置向量

$x_i^{(k)}, x_i^{(k+1)}$ ——第  $k, k+1$  次迭代时的位置向量

$x_{id}^{(k+1)}$ ——粒子  $i$  在第  $k+1$  次迭代时,第  $d$  维的位置向量

$v_i^{(k)}, v_i^{(k+1)}$ ——第  $k, k+1$  次迭代时的速度向量

本研究的 PSO 算法部分的惯性权重取值采用动态调整策略<sup>[33]</sup>(称为线性递减惯性权重,LDIW),即:权重随迭代次数从最大惯性权重  $w_{max}$  ( $w_{max} = 0.9$ ) 线性递减至最小惯性权重  $w_{min}$  ( $w_{min} = 0.6$ ),平衡了针对 GA 算法提供的初始粒子群部分的全局探索与局部开发,计算式为

$$w^k = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})k}{K_{max}} \quad (15)$$

式中  $K_{max}$ ——总迭代次数

$w^k$ ——第  $k$  次迭代时的惯性权重

(3) PSO 迭代次数 pso\_num\_iterations = 50。

(4) 通过公式(8)计算适应度函数。在每次位置更新后,通过适应度函数评估新位置的性能,以决定是否更新个人最佳和全局最佳位置。

综上所述,本文设计的 PSO 优化 GA-PID 算法流程如图 5 所示。

为进一步提高三菱 PLC PID 控制器的响应速度并减轻其运算负担,通过对目标值分段处理,结合 PSO 优化 GA 算法对各段进行优化,从而有效解决精准施肥系统滞后性和误差较高的问题。

## 3 仿真试验

### 3.1 仿真模型

运用 Matlab 的控制系统工具箱(Control system

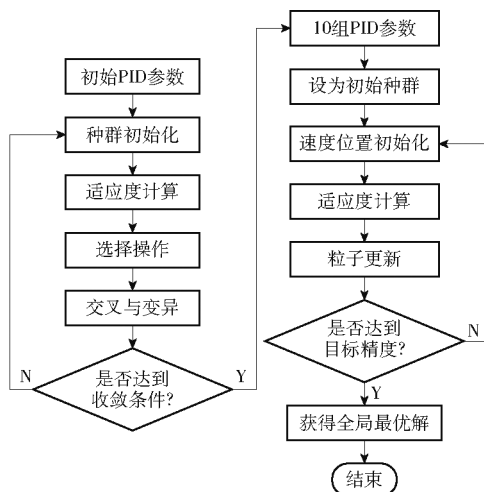


图 5 基于粒子群算法 PSO 优化的 GA 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of GA algorithm based on PSO optimization of particle swarm optimization (PSO)

toolbox) 及 Simulink 仿真模块进行仿真试验,将阶跃信号或目标值输入 Step 模块,将各类算法在控制系统工具箱训练得到的 PID 参数解写入 PID 模块,观察 Scope 响应曲线,记录相关仿真结果。仿真模型如图 6 所示。

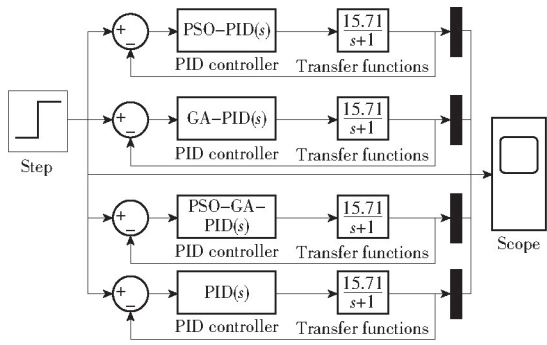


图 6 Simulink PID 仿真控制器

Fig. 6 Simulink PID simulation controller

### 3.2 Rastrigin 函数仿真

为验证 PSO 优化 GA - PID 算法的性能,采用 Rastrigin 函数作为测速函数,Rastrigin 函数表达式为<sup>[10]</sup>

$$f = 20 + z_1^2 + z_2^2 - 10(\cos(2\pi z_1) + \cos(2\pi z_2)) \quad (16)$$

式中  $z_1, z_2$  ——自变量(决策变量)

Rastrigin 函数是多峰函数,收敛于 0。设置迭代次数为 100,种群规模设为 50,自我认知系数  $c_1 = 0.5$ ,社会认知系数  $c_2 = 0.5$ 。

通过图 7 中的收敛曲线,可以观测到 GA、PSO 和 PSO - GA 3 种算法的误差分别是:1.8、0、0。由图可以得知:①PSO - GA 算法的收敛速度最快,在初始阶段迅速降低适应度并逐渐接近最优解,仅仅经过 13 次迭代就收敛于 0。PSO 算法与本研究的 PSO - GA 算法误差均可达到 0,但 PSO - GA 算法的

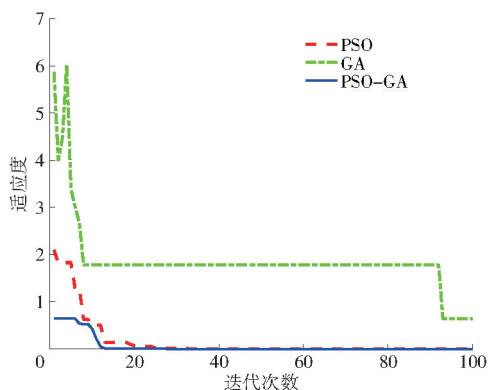


图 7 GA、PSO、PSO - GA 算法收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of GA, PSO, PSO - GA algorithms

迭代次数最少,可以看出 PSO - GA 算法不仅误差低,且优化效率高。②PSO - GA 结合了 PSO 的快速全局搜索和 GA 的局部搜索优化能力。在收敛过程中,GA 的遗传交叉和变异操作能够帮助跳出局部最优,而 PSO 的粒子更新则增强了全局搜索的效率。这种结合的效果,使 PSO - GA 既保持了快速搜索的能力,又能更精确地收敛到全局最优解。

综上所述,PSO - GA 算法具有收敛速度快、收敛精度高的优越性,与单一的 GA 或 PSO 相比,PSO - GA 算法在全局和局部寻优性能上实现了较好的平衡,因此适合需要快速且精确优化的应用场景。

### 3.3 阶跃信号仿真

为验证 PSO 优化 GA 算法和分段 PID 控制器结合的优化效果,通过 Matlab 建立相应的控制系统,将常规离散型 PID 控制器、GA - PID 控制器、PSO - PID 控制器和 PSO 优化 GA - PID 控制器分别对控制系统进行阶跃信号响应试验,研究 4 组算法对阶跃信号的收敛,仿真结果如图 8 所示。

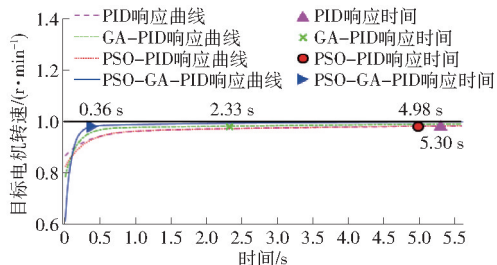


图 8 4 组控制器对阶跃信号的响应输出图

Fig. 8 Output plot of response of four sets of controllers to step signal

由图 8 可知,PSO - GA - PID 控制器的响应时间是 0.36 s,GA - PID 控制器的响应时间次之,为 2.33 s,PSO - PID 控制器的响应时间为 4.98 s,常规离散型 PID 控制器的响应时间是 5.30 s。PSO 改进的 GA - PID 控制器明显由于其他 3 个控制器,收敛精度高且响应速度快。

### 3.4 分段 PSO - GA - PID 仿真试验

为提高 PLC 响应速度并减少计算负担,需对电机转速范围进行分段处理,由于 PLC DA 模块的控制电压控制电机转速,该模块的控制电压范围为 0 ~ 5 V,所对应的电机转速范围为 0 ~ 58 r/min,将目标电压值作为 PLC 的 PID 控制模块的输入值。用万用表和转速仪测量不同控制电压所对应的电机转速如表 1 所示。

表 1 不同控制电压所对应的电机转速

Tab.1 Motor speed corresponding to different control voltages

控制电压/V	电机转速/(r·min <sup>-1</sup> )
5.0	58
4.5	50
4.0	43
3.5	35
3.0	27
2.5	19
2.0	11
1.5	3

针对大田的复杂工况,将上述目标电压分为 4 段,即:[4,5] V、[3,4] V、[2,3] V、[1.5,2) V。由表 1 可知,上述分段电压值所对应的分段电机转速为:[43,58] r/min、[27,42] r/min、[11,26] r/min、[3,10] r/min。上述电机转速范围作为目标值跳转分段选参(即  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ )的范围。每段电压值范围的中值对应的电机转速作为仿真试验的目标值,那么上述每段电压值的中值分别为:4.5、3.5、2.5、1.7 V,所对应的电机转速为:50、35、19、6.5 r/min。由于电机小于 1.5 V 的控制电压就会停止工作,为满足极端工况下的精准施肥目的,因此 [1.5,2) V 该分段中选用最小值 1.5 V 对应的电机转速值 3 r/min 作为仿真试验目标值。

采用 PSO 优化 GA - PID 控制器分别对目标电机转速 (50、35、19、3 r/min) 进行仿真试验。利用 Matlab 的 Control system toolbox 和图 6 所示的 Simulink 模块,对每组目标值进行 5 次训练,筛选响应时间最短的参数作为最优解。仿真时间设定为 100 ms,记录 Scope 中的 PID 响应曲线。

图 9 为采用分段最优解下 PSO 优化 GA - PID 控制器的响应曲线。由图 9 可以看出,平均调节时间为 0.51 s。表明分段处理目标转速采用最优解参数更适应复杂多变的变量施肥工况。分别对 4 组目标电机转速各做 5 次 PSO 优化 GA - PID 算法试验,针对同一目标重复做 5 次试验得到的 PID 参数(即  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ )均相同,表明本研究的 PSO - GA 算法系统稳定性较高。针对不同分段训练得到的 4 组最优

参数如表 2 所示。

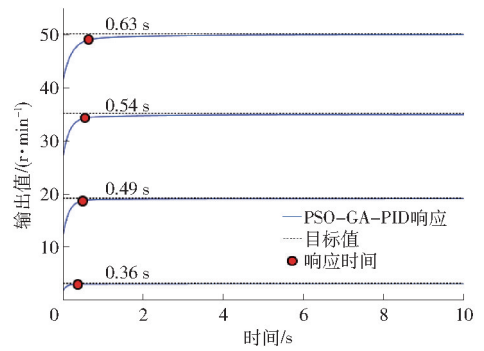


图 9 采用分段最优解下 PSO 优化 GA - PID 控制器的响应曲线

Fig.9 Response curves of GA - PID controller optimized by using piecewise optimal solution for PSO

表 2 不同目标施肥电机转速所对应的 PID 参数最优解  
Tab.2 Optimal solutions of PID parameters corresponding to different target fertilization motor speeds

目标转速范围/(r·min <sup>-1</sup> )	$K_p$	$K_i$	$K_d$
43 ~ 58	2.00	0.98	0.32
27 ~ 42	2.00	0.94	0.23
11 ~ 26	1.40	0.97	0.12
3 ~ 10	2.00	0.93	0.10

## 4 软件设计

本研究设计的人机交互界面通过 YKBuilder 软件实现,包含自动控制、手动控制、参数调节和监控 4 个功能界面,如图 10 所示。自动控制界面通过霍尔测速传感器扫描磁钢次数,判断播种机施肥状态和速度大小,启动 PSO 改进分段式 GA - PID 算法下的精准施肥控制系统,手动控制界面允许调节施肥流量,并提供恒速施肥选项(200、150、100、50 kg/h),自动控制界面即可实现随速精准施肥功能。监控界面显示车速、目标施肥流量、实时施肥流量,参数界面可供用户输入目标施肥流量、作业幅宽、施肥缝隙宽度及 PID 参数。所有操作可通过 PLC 的 DA 模拟输出模块驱动变频器调节电机转速。该软件的程序流程图如图 11 所示。



图 10 人机交互界面

Fig.10 Human-computer interaction

## 5 试验

### 5.1 肥料流量测量系统精准度验证试验

实时施肥流量的精准度是该变量控制施肥系统

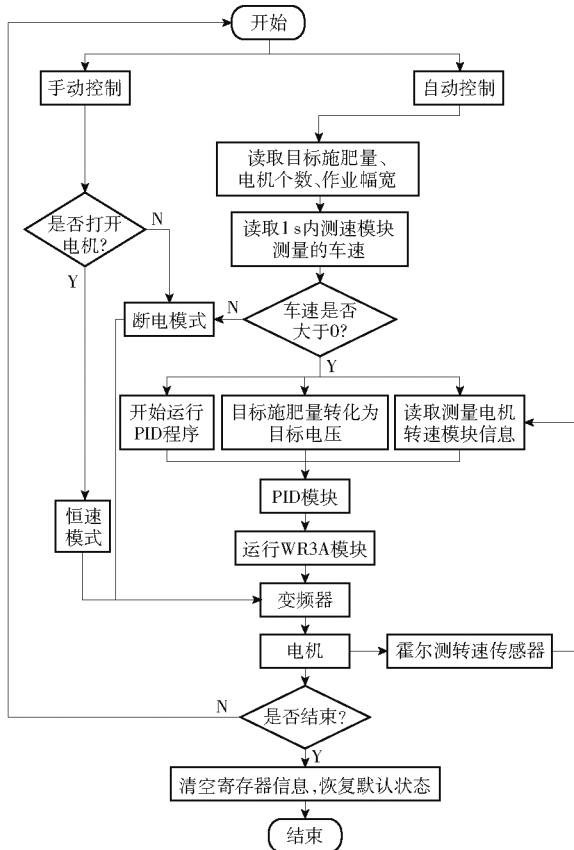


图 11 软件程序流程图

Fig. 11 Flowchart of software program

最重要的环节之一,根据式(3)测得的控制电压与实际电机转速之间的回归方程和式(4)施肥流量与电机转速和施肥宽度的回归方程拟合,对霍尔转速传感器测得的实时施肥流量进行精准度验证试验,如图 12 所示。

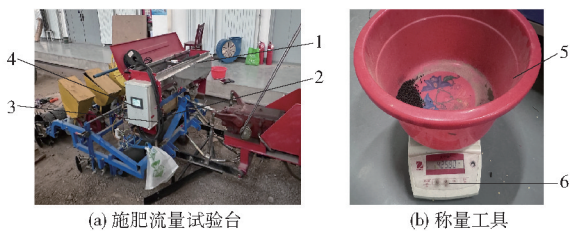


图 12 精准度验证试验

Fig. 12 Accuracy verification test

1. 肥箱 2. 施肥电机 3. 霍尔转速传感器 4. 配电箱 5. 称量盆 6. 电子秤

试验选用复合型颗粒肥(史丹利农业集团股份有限公司),氮磷钾质量比为 23:4:6,肥料颗粒均匀且无结块。试验台主要包括肥料箱、霍尔测速传感器(沃奇电气有限公司)、称量盆、电子秤(奥豪斯电子天平公司)。当电机转动时会带动施肥轴同步转动,霍尔测速传感器安装在电机同步施肥轴的侧面,该轴上安装了 4 个感应磁铁,转动一圈会产生 4 个脉冲信号,在施肥管下方放置称量盆,用电子秤称量记录 1 min 内盆内的肥料质量<sup>[14]</sup>,将施肥缝隙宽度

固定为 10 mm,通过式(5)将 1 min 内霍尔转速传感器所测得的电机转速用式(4)得到实际施肥流量 $q_{em}$  (g/min),将霍尔传感器测量的实际流量与称量所获得的实际流量做对比,结果如表 3 所示。

表 3 肥料流量测量系统精准度验证结果

Tab. 3 Accuracy verification results of fertilizer flow measurement system

施肥轴转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	肥料测量值/ g	肥料称量值/ g	误差/%
3	60.56	59.67	1.46
11	251.34	249.50	0.73
19	475.23	480.01	1.01
27	699.88	705.42	0.79
35	884.24	885.08	0.08
43	1 088.65	1 081.45	0.67
50	1 293.05	1 276.50	1.30
58	1 476.02	1 451.90	1.57

由表 3 可得,在施肥电机不同转速下,霍尔转速传感器 2s 内测得的电机转速经过式(4)所得到的肥料测量值与实际肥料的称量值之间相差较小,测量精度较高,最大误差为 1.57%,最小误差为 0.08%。

## 5.2 台架试验

通过图 12a 的施肥流量试验台进行恒车速台架试验,模拟精准施肥系统在恒定车速下的施肥情况。首先,将试验所需的不同恒定车速的数值输入 PLC 的测速模块代码中,使得 PLC 模拟恒定车速的工况,可准确得到恒定车速下精准施肥系统的施肥情况。使用图 12b 的称量盆称量 1 min 内该控制系统在设定的不同恒定车速下的施肥流量<sup>[29-30]</sup>。

为保证全过程稳定的车速与试验精准性,且能够涵盖较广的车速范围<sup>[30]</sup>,选取 1~6 km/h 的车速作为恒车速试验的范围,施肥口宽度设为 10 mm,选用转速分别为 11、27、43 r/min 所对应的 1 min 内的施肥流量 251、719、1 110 g 作为目标值。精准度计算式为

$$\theta = \left( 1 - \frac{|G_1 - G_2|}{G_2} \right) \times 100\% \quad (17)$$

式中  $G_1$ ——实际施肥量,g

$G_2$ ——理论施肥量,g

$\theta$ ——精准度,%

由表 4 可得,恒车速台架试验的施肥精度最高达 98.89%,施肥控制精度最低为 96.86%,平均施肥精度为 98.01%。

## 5.3 土槽试验

2024 年 10 月于新疆农业大学老满城校区智能农业装备实验室进行土槽试验(图 13),变量施肥控



PSO-GA 3 种算法进行了适应度对比试验,结果表明 PSO-GA 算法收敛速度明显优于其他两种算法,优化精度高,仅迭代了 13 次就收敛于 0。

(3) 运用 Matlab 进行了仿真试验,比较离散型 PID、GA-PID、PSO-PID 和 PSO-GA-PID 控制器的响应性能,结果显示本研究的 PSO-GA-PID 控制器的响应时间最短,为 0.36 s,采用 PSO 优化 GA 算法的 PID 控制器相较于未采用该优化算法的其他 PID 控制器,响应时间平均降低了 91.44%。

(4) 为降低三菱 PLC 的运算负荷,电机转速被

分段为 4 段,进行分段优化。每个分段的最优解 PID 参数通过 PSO 优化 GA 算法得到,满足了 PLC 在响应速度、精度和调节时间方面的要求。Simulink 仿真试验结果表明,采用了 PSO 优化 GA 算法的 PID 控制器面对不同分段目标值,均能够快速响应且无超调现象,平均响应时间为 0.51 s。

(5) 台架试验中,施肥精准度最高达 98.89%,平均为 98.01%;土槽试验中,施肥精准度最高达 98.70%,平均施肥精度为 97.69%,均可达到施肥控制系统的施肥精准度要求。

## 参 考 文 献

- [1] 冯靖仪. 稻田作物生产的碳足迹及化肥减施的温室气体减排潜力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. FENG Jingyi. Research on the carbon footprint of rice field crop production and the greenhouse gas emission reduction potential of fertilizer reduction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [2] 胡成红,徐金,奚小波,等. 变量施肥技术研究现状及发展对策[J]. 农业装备技术,2021,47(1):4-8,13.
- [3] 刘辛,黄琼桃,周莹,等. 基于 GA-BP 遗传神经网络优化 PID 控制器参数研究[J]. 自动化应用,2024,65(21):54-58,62. LIU Xin, HUANG Qiongtao, ZHOU Ying, et al. Research on optimization of PID controller parameters based on GA-BP genetic neural network[J]. Automation Applications,2024,65(21):54-58,62. (in Chinese)
- [4] ZHOU J, ZHANG Q, WAN Y. Self-tuning Fuzzy PID controller on DC/DC Converter based on SA-GA[C]//Proceedings of 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology,2016:718-724.
- [5] ZHU X, GUAN J, LIU Z, et al. Fuzzy PID control of single chamber semi active hydro-pneumatic suspension based on GA optimization[C]//2024 43rd Chinese Control Conference,2024:792-797.
- [6] 任灵杰,田敏,李江全,等. 我国变量施肥技术的研究现状与发展分析[J]. 农机化研究,2023,45(10):10-15. REN Lingjie, TIAN Min, LI Jiangquan, et al. Research status and development analysis of variable fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Machinery Research,2023,45(10):10-15. (in Chinese)
- [7] 曹梦龙,马俊林. 改进蝗虫优化算法在模糊神经网络 PID 控制中的研究[J]. 电子测量技术,2022,45(20):74-80. CAO Menglong, MA Junlin. Research on improved grasshopper optimization algorithm in PID control of fuzzy neural networks[J]. Electronic Measurement Technology,2022,45(20):74-80. (in Chinese)
- [8] 朱凤磊,张立新,胡雪,等. 基于蝙蝠优化 BP-PID 算法的精准施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):135-143. ZHU Fenglei, ZHANG Lixin, HU Xue, et al. Precision fertilizer application control system based on BA optimization BP-PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.1):135-143. (in Chinese)
- [9] 王辉,刘艺豪,周利明,等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):32-40. WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow segmented PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):32-40. (in Chinese)
- [10] 苏中滨,张磊磊,马铮,等. 基于改进 PSO 的无人自转旋翼机二自由度 PID 飞行控制[J]. 农业机械学报,2022,53(1):151-158. SU Zhongbin, ZHANG Leilei, MA Zheng, et al. Flight control of two-degree-of-freedom PID unmanned gyrocopter based on improved PSO[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 151-158. (in Chinese)
- [11] MENG Z, ZHANG L, WANG H, et al. Research and design of precision fertilizer application control system based on PSO-BP-PID algorithm[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1395.
- [12] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2116-2125. BAI Youlu. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences,2018,51(11):2116-2125. (in Chinese)
- [13] 刘春山,李梦月,陈思羽,等. 精准施肥技术的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,47(7):294-300. LIU Chunshan, LI Mengyue, CHEN Siyu, et al. Research status and development trend of precision variable fertilizer application technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,47(7):294-300. (in Chinese)
- [14] 张季琴,刘刚,胡号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报,2021,37(10):38-45. ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38-45. (in Chinese)
- [15] INTHIYAZ S, NALLI R, RAKESH T, et al. GA based PID controller: design and optimization[C]//2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). IEEE, 2021: 285-289.
- [16] 刘小娟,夏运东,李刚,等. 基于 GA 优化 PID 算法的液压机械容积调速系统控制仿真分析[J]. 锻压技术,2022,47(3):164-168. LIU Xiaojuan, XIA Yundong, LI Gang, et al. Simulation analysis on volumetric speed regulation system control for hydraulic machinery based on PID algorithm optimized by GA[J]. Forging Technology,2022,47(3):164-168. (in Chinese)

- [17] 孙文峰,刘海洋,王润涛,等. 基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):55-64.  
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):55-64. (in Chinese)
- [18] 李锋,樊玉和,梁辉. 基于改进BP神经网络PID控制器温室温湿度控制研究[J]. 计算机与数字工程,2021,49(5):908-913.  
LI Feng, FAN Yuhe, LIANG Hui. Research on temperature and humidity control of PID controller based on improved BP neural network[J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(5):908-913. (in Chinese)
- [19] 王昊,张立新,吴勋,等. 基于GA-FUZZY-PID算法的精准施肥控制系统研究[J]. 节水灌溉,2023(8):52-58.  
WANG Hao, ZHANG Lixin, WU Xun, et al. A precise fertilization control system based on GA-FUZZY-PID algorithm[J]. Water-saving Irrigation, 2023(8):52-58. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)
- [21] 吴延凯,张伟,王亚刚. 基于GA-PSO的印版滚筒温度二自由度PID参数整定[J]. 包装工程,2020,41(5):185-191.  
WU Yankai, ZHANG Wei, WANG Yagang. Parameter tuning of two-degree-of-freedom PID controller for plate cylinder temperature based on GA-PSO[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5):185-191. (in Chinese)
- [22] 彭燕莉,刘俊红,陶修斌,等. 基于PSO-GA模型的供水管网漏损预测研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2025,41(1):121-129.  
PENG Yanli, LIU Junhong, TAO Xiubin, et al. Study on leak location prediction in water supply networks using PSO-GA model[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science Edition), 2025, 41(1):121-129. (in Chinese)
- [23] 罗泽霖,孟景辉,罗依梦,等. 基于PSO-GA的ZPW-2000A型轨道电路调谐区性能感知方法[J]. 铁道学报,2024,46(8):89-95.  
LUO Zelin, MENG Jinghui, LUO Yimeng, et al. Performance perception method for track circuit tuning area based on PSO-GA[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(8):89-95. (in Chinese)
- [24] 李怀胜,崔瑜. 基于优化模糊PID控制器的精准施肥算法研究与应用[J]. 安徽农业科学,2024,52(15):203-207.  
LI Huaiheng, CUI Yu. Research and application of precision fertilization algorithm based on optimized fuzzy PID controller[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(15):203-207. (in Chinese)
- [25] 冯常奇,江品力. 基于GA参数辨识的直流伺服电机PID调节器的设计[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(4):312-315.  
FENG Changqi, JIANG Pinli. Optimized design for PID adjuster in DC servo-motor with parameters identified by genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2014, 6(4):312-315. (in Chinese)
- [26] YI H, ANDREW E B, ALI H. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: a new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows[J]. Powder Technology, 2018, 325:620-631.
- [27] 赵玉玺,胡军,刘昶希,等. 基于ABC-PID算法的变量喷雾控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(7):57-63.  
ZHAO Yuxi, HU Jun, LIU Changxi, et al. Design and experiment of variable spray control system based on ABC-PID algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7):57-63. (in Chinese)
- [28] 张继成,严士超,纪文义,等. 基于增量式PID算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报,2021,52(3):99-106.  
ZHANG Jicheng, YAN Shichao, JI Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):99-106. (in Chinese)
- [29] 王金峰,吕振阳,赵敏义,等. 基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):151-162.  
WANG Jinfeng, LÜ Zhenyang, ZHAO Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9):151-162. (in Chinese)
- [30] 韩长杰,刘钊,毛罕平,等. 棉花变量施肥整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11):250-261.  
HAN Changjie, LIU Zhao, MAO Hanping, et al. Design and experiment of variable rate fertilization combined soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11):250-261. (in Chinese)
- [31] 侯小秋,李丽华. 基于BP神经网络辨识的预测滤波PID控制[J]. 黄河科技学院学报,2023,25(5):26-31.  
HOU Xiaoqiu, LI Lihua. Predictive filtering PID control based on BP neural network identification[J]. Journal of Yellow River University of Science and Technology, 2023, 25(5):26-31. (in Chinese)
- [32] 南敬昌,陈鑫,严洁. 基于DE-GA算法的阵列天线故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(11):33-39.  
NAN Jingchang, CHEN Xin, YAN Jie. Array antenna fault detection method based on DE-GA algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11):33-39. (in Chinese)
- [33] HAN Y, LIN M, LI N, et al. DCWPSO: particle swarm optimization with dynamic inertia weight updating and enhanced learning strategies[J]. PeerJ Computer Science, 2024, 10: e2253.