

基于粒子群优化RBF-PID的液肥变量施肥控制系统研究

潘成钟 尤泳 马朋勃 王昭宇

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对阀控液压马达液肥变量施肥控制系统稳态精度低和响应速度慢等问题, 提出了一种基于粒子群优化RBF-PID (PSO-RBF-PID) 控制的液肥变量施肥控制算法。首先建立液肥变量施肥控制系统闭环传递函数, 利用粒子群算法对RBF神经网络关键参数进行寻优, 并以传统PID控制和RBF-PID控制为对照, 采用Matlab/Simulink软件进行仿真分析。仿真结果表明, PSO-RBF-PID控制下系统调节时间和跟踪误差均最小, 验证了算法的可行性。搭建液肥变量施肥控制系统试验台架并进行室内试验, 对系统流量测量精度进行验证, 结果表明系统测量相对误差小于4%, 满足测量要求。不同算法控制下进行系统静态和动态特性试验, 试验结果表明, 传统PID控制、RBF-PID控制和PSO-RBF-PID控制下系统流量最大相对误差分别为5.33%、3.83%、2.50%, 目标流量突变时系统平均调节时间分别为5.16、3.80、2.19 s。所提出的PSO-RBF-PID控制算法各个指标均优于传统PID和RBF-PID控制算法, 能够保证系统具有良好的静态和动态特性, 满足液肥变量施用要求。

关键词: 液肥; 变量施肥; RBF-PID控制; 粒子群优化

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)S2-0053-9

Variable Rate Fertilization Control System for Liquid Fertilizer Based on PSO Optimized RBF-PID Control

PAN Chengzhong YOU Yong MA Pengbo WANG Zhaoyu

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of low steady-state accuracy and slow response speed of variable fertilization control system for liquid fertilizer of valve-controlled hydraulic motor, a variable fertilization control algorithm for liquid fertilizer based on particle swarm optimization RBF-PID (PSO-RBF-PID) was proposed. Firstly, the closed-loop transfer function of the control system of liquid fertilizer variable fertilization control system was established, and the key parameters of RBF neural network were optimized by PSO algorithm, and compared with traditional PID and RBF-PID control, Matlab/Simulink software was used for simulation analysis. The simulation results showed that the adjustment time and tracking error of the system under PSO-RBF-PID control were the smallest, which verified the feasibility of the algorithm. A test bench of liquid fertilizer variable rate fertilization control system was built and indoor experiments were carried out to verify the flow measurement accuracy of the system. The results showed that the relative error of the system measurement was less than 4%, which met the measurement requirements. The static and dynamic characteristics of the system under the control of different algorithms were tested. The experimental results showed that the maximum relative errors of system flow under the control of traditional PID, RBF-PID and PSO-RBF-PID were 5.33%, 3.83% and 2.50%, respectively, and the average adjustment time of the system was 5.16 s, 3.80 s and 2.19 s, respectively, when the target flow value changed suddenly. Each index of the proposed PSO-RBF-PID control algorithm was superior to that of the traditional PID and RBF-PID control, which can ensure that the system had good static and dynamic characteristics and met the variable application requirements of liquid fertilizer.

Key words: liquid fertilizer; variable rate fertilization; RBF-PID control; particle swarm optimization algorithm

收稿日期: 2024-07-08 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)

作者简介: 潘成钟(1999—), 男, 硕士生, 主要从事液肥变量施肥技术研究, E-mail: pancz_edu@163.com

通信作者: 尤泳(1980—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事牧草机械化研究, E-mail: youyong@cau.edu.cn

0 引言

液肥具有肥料利用率高、肥效好等优点,应用广泛,液肥变量施用可充分发挥其现有优势,避免施肥量不当对作物和环境造成的不利影响^[1-4]。为保证液肥变量施用精度,需开展液肥变量施肥控制系统研究以提高系统控制性能。

阀控液压马达系统由于具有调速性能好、功率密度大和响应速度快等优点而被广泛用于液肥变量施肥控制系统中^[5-6],但由于系统自身存在非线性、滞环性和参数时变性等特点^[7],且系统实际作业工况复杂,对其进行精确控制难度较大。苗中华等^[8]提出一种带摩擦状态观测的滑模变结构控制算法,解决了阀控中空液压马达系统在作业时由于摩擦力矩非线性和不可预测性导致转动误差较大的问题,提高了系统静态特性。陈远玲等^[9]针对阀控双液压马达驱动的甘蔗根切器在作业过程中由于负载时变性带来的转速不稳定问题,提出一种主从控制方法,主液压马达采用PID控制,从液压马达分别采用PID、模糊PID和滑模变结构控制算法,保证了作业稳定性。梁春英等^[10]针对阀控液压马达变量施肥系统PID控制中参数整定复杂问题,通过采用遗传算法对PID参数进行整定,减小了系统控制误差。张锦辉等^[11]基于BP神经网络PID控制方法对拖拉机液压马达和液压缸进行调控,保证了拖拉机在较大坡度田间作业时机身稳定性和在丘陵山地崎岖路况下行走的适应性。谭顿等^[12]采用改进粒子群算法对PID同步控制策略的双液压马达系统进行优化,有效减小了系统超调和波动。LU等^[13]将鲁棒H-infinity控制算法用于阀控液压马达系统,解决了复杂扭矩条件下控制精度低的问题。ZHU等^[14]提出了双闭环复合鲁棒控制策略,有效保证了双泵双阀控液压马达系统在外外部干扰作用下的控制稳定性。目前阀控液压马达系统主要采用模糊PID控制、滑模变结构控制、BP神经网络PID控制和鲁棒控制等策略,基于RBF神经网络PID控制(RBF-PID)这种非线性适应性较强的控制方法研究较少,且主要是对变负载、定转速和大扰动条件下应用场景进行了研究,但对具有流量脉动性和突变性的液肥变量施肥系统方面研究未见报道。

粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)是一种简单易实现、全局搜索能力强和收敛速度快的寻优算法,在非线性和非线性控制系统中具有明显的优化效果^[15-16]。为提高以阀控液压马达为基础的液肥变量施肥系统的控制性能,本文在RBF-PID控制算法的基础上,采用PSO算法对RBF神经网络参数进行迭代寻优,并通过仿真分析和台架试验验证优化后算法的应用效果。

1 控制系统建模

1.1 阀控液压马达系统传递函数

阀控液压马达系统是液肥变量施肥控制系统的主要组成部分,通过调控电液比例阀输出流量对液压马达转速进行控制。控制电压 U 与电液比例阀输出流量 Q 的传递函数、电液比例阀输出流量 Q 与液压马达输出转速 ω 的传递函数为^[17]

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{K_a K_q}{\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\zeta_v}{\omega_v} s + 1} \\ G_2(s) = \frac{\omega(s)}{Q(s)} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_c D_m^2}{V_t J_t}} \quad \zeta_h = \frac{K_c + C_{im}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_c J_t}{V_t}}$$

式中 $Q(s)$ ——输出流量, L/min

$U(s)$ ——输入电压, V

K_a ——比例放大器增益, A/V

K_q ——阀流量增益, $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{V})$

ω_v ——阀固有频率, rad/s

ζ_v ——阀阻尼比

$\omega(s)$ ——液压马达输出角速度, rad/s

ω_h ——液压系统固有频率, rad/s

ζ_h ——液压阻尼比

β_c ——油液弹性模量, Pa

D_m ——液压马达排量, m^3/rad

V_t ——液压马达两腔及连接管道总容积, m^3

J_t ——系统转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

K_c ——阀的压力-流量系数, $\text{m}^5/(\text{N}\cdot\text{s})$

C_{im} ——液压马达总泄漏系数

1.2 液肥泵传递函数

液肥泵输入动力由阀控液压马达系统提供,由于液肥泵和液压马达通过刚性联轴器连接,故可认为液肥泵和液压马达转速相等。因此,液肥泵输出流量与输入轴转速关系可表示为

$$Q_b(s) = \frac{n_b D_b \eta_b}{10^3} = \frac{60\omega(s) D_b \eta_b}{2\pi \times 10^3} \quad (2)$$

式中 $Q_b(s)$ ——液肥泵输出流量, L/min

n_b ——液肥泵动力输入轴转速, r/min

D_b ——液肥泵排量, mL/r

η_b ——液肥泵容积效率, %

由式(2)可得到液肥泵输出流量 Q_b 与输入轴角速度 ω 传递函数关系式为

$$G_3(s) = \frac{Q_b(s)}{\omega(s)} = \frac{3D_b \eta_b}{100\pi} \quad (3)$$

1.3 反馈环节传递函数

控制系统反馈环节由流量传感器和电流转电压模

块组成,首先通过流量传感器对液肥实时输出流量 Q_b 进行精确测量,再通过电流转电压模块将传感器输出的电流信号转换为控制器可识别电压信号 $U_{j\circ}$ 。因此反馈环节传递函数可表示为

$$H(s) = \frac{U_j(s)}{Q_b(s)} = \frac{33e^{-\tau s}}{1000} \quad (4)$$

式中 $U_j(s)$ ——输出反馈电压,V

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)H(s)} = \frac{28.30}{2.23 \times 10^{-9}s^4 + 5.23 \times 10^{-7}s^3 + 1.29 \times 10^{-4}s^2 + 0.012s + 1.934} \quad (5)$$

2 控制算法原理及仿真

2.1 RBF-PID控制器设计

PID控制广泛应用于变量施肥等各种控制领域,在实际应用中一般采用增量式PID控制^[18],其原理为

$$\begin{cases} \Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + \\ \quad K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \\ u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\Delta u(k)$ ——控制电压变化量,V

K_p ——比例系数

K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

$e(k)$ ——当前时刻流量偏差,L/min

$u(k)$ ——当前时刻控制电压,V

$u(k-1)$ ——上一时刻控制电压,V

表1 控制系统主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of control system

参数	数值
放大器增益 $K_a/(A \cdot V^{-1})$	0.15
流量增益 $K_q/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1})$	7.94×10^{-4}
流量-压力系数 $K_f/(m^5 \cdot N^{-1} \cdot s^{-1})$	4.167×10^{-11}
阀固有频率 $\omega_n/(\text{rad} \cdot s^{-1})$	125.66
阀阻尼比 ζ_n	0.5052
油液弹性模量 β/Pa	7×10^8
液压马达排量 $D_m/(m^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	3.183×10^{-6}
液压系统固有频率 $\omega_n/(\text{rad} \cdot s^{-1})$	168.43
液压系统阻尼比 ζ_n	0.318
液肥泵排量 $D_b/(mL \cdot r^{-1})$	88
液肥泵容积效率 $\eta_b/\%$	90

选取误差平方函数作为PID参数的整定指标,即

$$E(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (7)$$

式中 $r(k)$ ——设定的系统理论输出流量,L/min

$y(k)$ ——系统实际输出流量,L/min

为减小PID控制误差,将RBF神经网络应用于PID参数整定过程,形成RBF-PID控制。RBF神经网络是一种前馈式神经网络,由输入层、隐藏层和输出层构成。为保证网络能够对系统实际输出液肥流量进行精准预测,选取 $\Delta u(k)$ 、 $y(k)$ 和 $e(k)$ 作为网络3个输入变量,网

τ ——延迟时间,s

查阅流量传感器技术手册,得到其采样时间约为100ms,由于系统采样造成的延迟时间较短,且采样是实时进行,对系统影响不大,因此反馈环节延迟时间 τ 可忽略不计。

1.4 控制系统传递函数

控制系统主要技术参数如表1所示。将数值代入,可得到控制系统闭环传递函数为

络输出为流量辨识输出 $y_m(k)$,网络隐藏层节点数取6,即网络结构为3-6-1^[19-20]。

RBF神经网络流量辨识输出为液肥变量控制系统当前时刻实际输出流量预测值,即

$$y_m = \sum_{j=1}^6 \omega_j h_j \quad (8)$$

式中 y_m ——RBF网络的流量辨识输出,L/min

ω_j ——RBF网络第 j 个输出层权值

h_j ——网络第 j 个隐藏层节点输出

由于RBF神经网络流量辨识输出 $y_m(k)$ 需要不断逼近控制系统实际输出流量 $y(k)$,因此在控制过程中需对RBF网络关键参数进行调整,选取RBF神经网络性能指标为

$$J_l = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2 \quad (9)$$

采用梯度下降法对RBF神经网络节点中心、节点宽度和输出层权值进行调整^[21],即

$$\begin{cases} \Delta c_{ji} = -\eta \frac{\partial J_l}{\partial c_{ji}} = \eta (y(k) - y_m(k)) \omega_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \\ \Delta b_j = -\eta \frac{\partial J_l}{\partial b_j} = \eta (y(k) - y_m(k)) \omega_j h_j \frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^3} \\ \Delta \omega_j = -\eta \frac{\partial J_l}{\partial \omega_j} = \eta (y(k) - y_m(k)) h_j \\ c_j = (c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}) \\ x = (\Delta u(k), y(k), e(k)) \end{cases} \quad (10)$$

式中 c_j ——第 j 个隐藏层节点中心向量

x ——网络输入向量

b_j ——第 j 个隐藏层节点宽度

更新后网络参数为

$$\begin{cases} c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji} + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \\ b_j(k) = b_j(k-1) + \Delta b_j + \alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \\ \omega_j(k) = \omega_j(k-1) + \Delta \omega_j + \alpha (\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)) \end{cases} \quad (11)$$

式中 η ——网络学习率 α ——动量因子

针对传统PID控制中, K_p 、 K_i 、 K_d 3个控制参数在控制过程中为固定值,导致控制系统动态性能不佳、适应性较差,采用梯度下降法对PID控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行调整^[20-22],即

$$\begin{cases} \Delta K_p = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial K_p} = \eta_p e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} (e(k) - e(k-1)) \\ \Delta K_i = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial K_i} = \eta e^2(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \\ \Delta K_d = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial K_d} = \eta_d e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \cdot \\ (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{cases} \quad (12)$$

式中 η_p —— K_p 学习率
 η_i —— K_i 学习率
 η_d —— K_d 学习率

式(12)中,偏导量 $\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 为待求解参数,可通过RBF神经网络的Jacobian信息近似得到^[23]。其表达式为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j h_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2} \quad (13)$$

其中 $x_1 = \Delta u(k)$

式中 x_j ——输入向量 \mathbf{x} 的第1个分量

最终得到的RBF-PID控制器总体控制结构如图1所示。

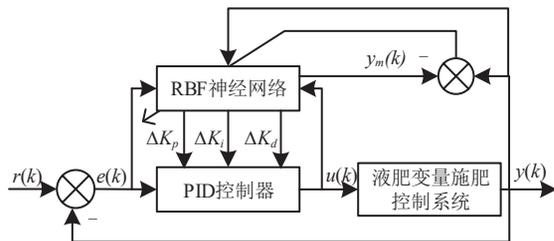


图1 RBF-PID控制原理框图

Fig. 1 Block diagram of RBF-PID control principle

2.2 PSO算法寻找RBF网络最优参数

RBF-PID控制中,RBF神经网络隐藏层节点中心 c_{ji} 、节点宽度 b_j 以及输出层权值 ω_j 的初始参数值对网络预测精度和收敛性能存在较大影响,参数选取不当会导致RBF神经网络泛化性差和易陷入局部极值等问题^[24],采用PSO算法对RBF神经网络参数初始值进行寻优。

将待优化的RBF神经网络参数编码为PSO算法中粒子位置矩阵 P ,矩阵维度为 5×6 ,其表达式为

$$P = \begin{bmatrix} C \\ B \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & \cdots & c_{61} \\ c_{12} & c_{22} & \cdots & c_{62} \\ c_{13} & c_{23} & \cdots & c_{63} \\ b_1 & b_2 & \cdots & b_6 \\ w_1 & w_2 & \cdots & w_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 C ——网络隐藏层节点中心矩阵

B ——网络隐藏层节点宽度向量

W ——网络输出层权值向量

PSO算法优化原理为

$$\begin{cases} P_i(t+1) = P_i(t) + w(t)V_i(t+1) \\ V_i(t+1) = w(t)V_i(t) + k_1(t)r_1(P_{\text{best},i}(t) - P_i(t)) + \\ k_2(t)r_2(G_{\text{best},i}(t) - P_i(t)) \end{cases} \quad (15)$$

式中 P ——粒子位置

V ——粒子速度

$w(t)$ ——粒子惯性权值

$k_1(t)$ ——个体学习因子

$k_2(t)$ ——群体学习因子

r_1, r_2 ——0~1之间随机数

为加快PSO算法的收敛性能,解决普通PSO算法中存在全局搜索能力弱、易陷入局部最优解等问题,采用线性下降策略对PSO算法惯性权值进行调整^[25]。即

$$w(t) = w_{\max} - \frac{n(w_{\max} - w_{\min})}{N} \quad (16)$$

式中 w_{\max} ——最大惯性权值

w_{\min} ——最小惯性权值

n ——当前迭代次数

N ——最大迭代次数

PSO算法学习因子 k_1, k_2 采用变化值进行动态调整,以提高算法收敛性能。其中,个体学习因子 k_1 采用线性递减策略,群体学习因子 k_2 采用线性递增策略。

$$\begin{cases} k_1(t) = k_{1,\max} - (k_{1,\max} - k_{1,\min}) \frac{n}{N} \\ k_2(t) = k_{2,\min} + (k_{2,\max} - k_{2,\min}) \frac{n}{N} \end{cases} \quad (17)$$

使PSO算法更好地平衡局部搜索和全局搜索,大幅度提高群体全局逼近能力,从而在更短的时间内找到最优解^[26]。

适应度函数可以衡量PSO算法优化效果,为确定RBF神经网络的最优参数,以单位阶跃信号下的RBF-PID控制输出效果作为评价依据,采用时间乘绝对误差准则(Integral of time and absolute error, ITAE)作为PSO算法优化的适应度函数^[27],适应度函数越小,表明系统输出累积误差越小,优化效果越好。其表达式为

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (18)$$

综上所述,PSO算法优化RBF-PID控制流程如图2所示。

2.3 控制系统仿真

在Matlab/Simulink软件中对控制系统进行仿真,设置仿真时间步长为0.001 s,求解器为ode3。根据所建立的控制系统闭环传递函数,利用软件内置的PID模块搭建PID控制下系统仿真模型。根据Z-N(Ziegler-Nichols)整定公式选取PID初始参数,如表2所示。通过Matlab中的margin函数^[19]求得控制系统的极限增益 k_u 为0.030 4,振荡周期 ω_u 为165 rad/s,故系统振荡周期 $T_u = 2\pi/\omega_u = 0.038$ s。根据表2求得PID初始参数为 $K_p = 0.018, K_i = K_p/T_i = 0.947, K_d = K_p T_d = 0$ 。

搭建RBF-PID控制下的液肥变量施用系统仿真模型如图3所示。取 $\eta = 0.25, \alpha = 0.05, \eta_p = \eta_i = \eta_d = 0.2$ 。

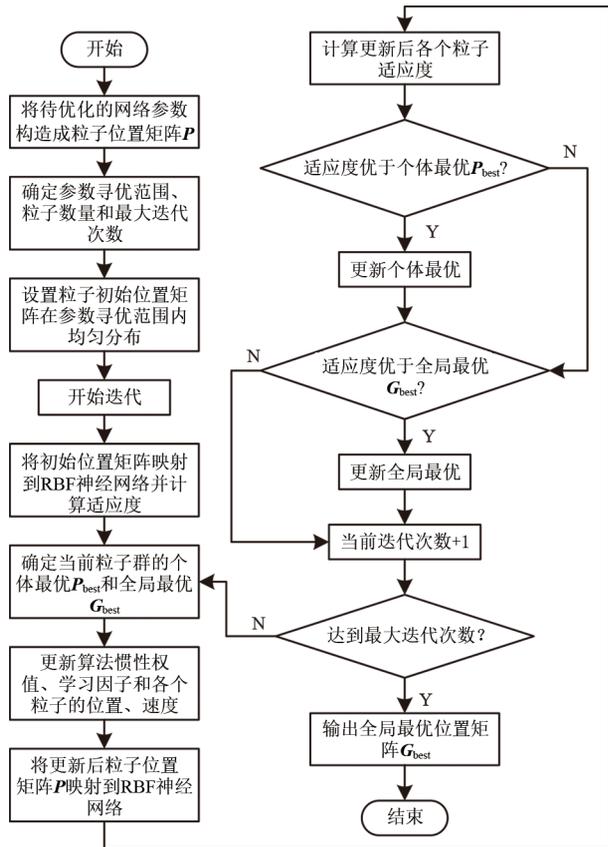


图2 PSO算法优化RBF-PID自适应控制流程图

Fig. 2 Flowchart of RBF-PID adaptive control optimized by PSO algorithm

表2 Z-N公式整定PID控制参数

Tab. 2 Tuning PID control parameters by Z-N formula

控制类型	K_p	T_i	T_d
P	$0.5k_u$	∞	0
PI	$0.4k_u$	$0.8T_u$	0
PID	$0.6k_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

RBF-PID控制中RBF网络节点中心值在对应输入值范围内随机选取,网络宽度向量分量均为1,网络各层输出权值 w 均取为1^[28]。

PSO算法优化RBF-PID控制过程在图3所建立模

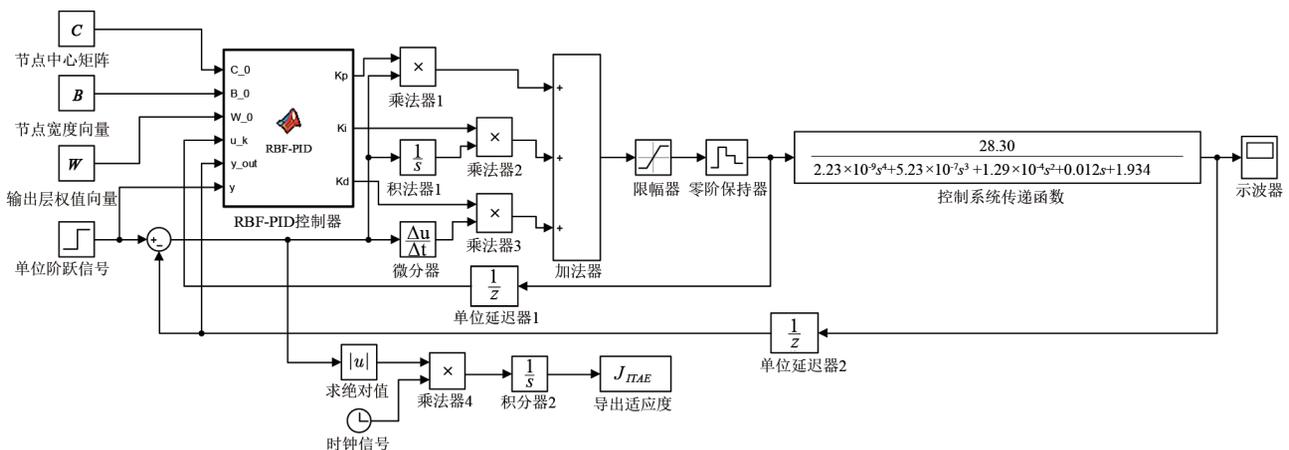


图3 RBF-PID控制器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of RBF-PID controller

型基础上进行,仿真时间为1 s,系统在单位阶跃响应输入得到适应度 J_{ITAE} 最小为优化目标,对模型迭代寻优。取 $w_{max} = 0.9, w_{min} = 0.2, k_{1,min} = k_{2,min} = 0.5, k_{1,max} = k_{2,max} = 2$ 。考虑到PSO算法所求解问题较为复杂,寻优范围较大,设置PSO算法中粒子数量为50,最大迭代次数 N 为100。所有粒子初始时刻的位置矩阵对应分量在系统对应输入值范围内随机赋值。仿真得到适应度曲线如图4所示。

由图4可看出,在粒子群迭代到第70次后,适应度趋于最优值。PSO算法求解到的最优适应度为 1.2×10^{-3} ,将对应的粒子全局最优位置矩阵 G_{best} 分解,并代入RBF-PID控制中,即可实现PSO-RBF-PID控制。PSO算法寻优得到RBF网络最优初始参数为

$$C = \begin{bmatrix} 65.64 & -8.66 & -15.48 & -1.95 & -0.25 & -11.37 \\ 10.68 & -8.11 & -30.01 & -21.22 & -0.32 & -14.58 \\ -16.34 & 9.90 & -18.41 & -15.97 & 4.08 & -12.55 \end{bmatrix}$$

$$B = [3.37 \quad 2.94 \quad 0.59 \quad 4.26 \quad 15.92 \quad 4.25]$$

$$W = [6.80 \quad 1.00 \quad -19.65 \quad -5.62 \quad 1.00 \quad -9.45]$$

为检验不同控制算法下系统稳态性能和追踪性能,对3种不同控制算法进行仿真。传统PID仿真和RBF-PID控制仿真采用前述参数,PSO-RBF-PID控制中RBF网络参数采用PSO算法寻找到的最优值。仿真初始时刻分别以单位阶跃信号和正弦信号作为系统输入信号,仿真时间设为1、2 s,得到系统响应输出曲线如图5所示。

由图5a可知,在单位阶跃信号输入下,采用传统PID控制、RBF-PID控制和PSO-RBF-PID控制下的调节时间分别为0.868、0.529、0.208 s,均无超调量。由图5b可知,在正弦信号输入下,峰值点平均滞后时间分别为0.131、0.046、0.037 s,峰值点最大相对误差分别为16.35%、4.90%和2.50%。仿真结果表明PSO-RBF-PID控制算法的控制信号响应性能和跟踪性能均优于传统PID控制和RBF-PID控制,验证了算法的可行性。

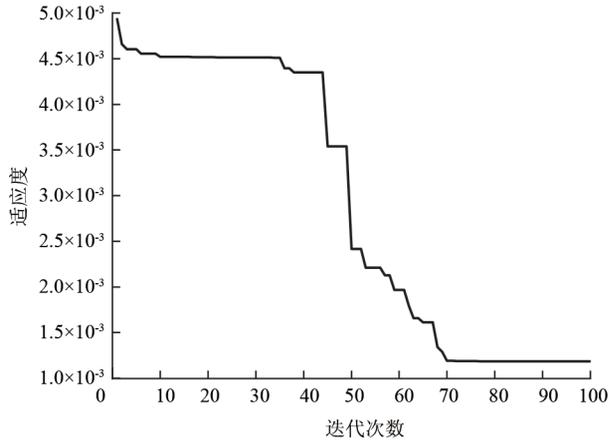
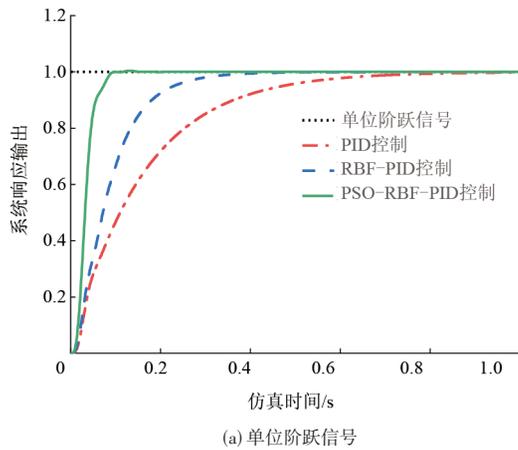
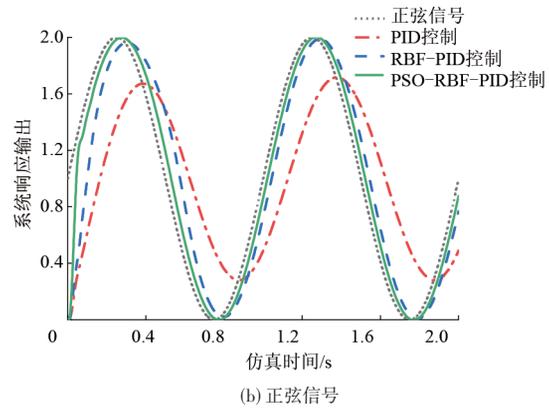


图4 PSO算法迭代过程中适应度进化曲线

Fig. 4 Fitness evolution curve in iterative process of PSO algorithm



(a) 单位阶跃信号



(b) 正弦信号

图5 控制系统响应输出曲线

Fig. 5 Output curves of control system response

表3 试验台架硬件构成

Tab. 3 Hardware composition of test bench

系统元件	技术参数	生产厂家
电液比例阀	控制电压0~10 V, 滞环小于等于5%	北京华德液压工业集团有限公司
CMF-F320-ALPS型液压马达	转速1 500~2 500 r/min, 容积效率大于等于92%	合肥皖液液压元件有限公司
液肥泵	RS-88型三缸柱塞泵, 额定功率5.5~7.0 kW, 额定流量70~88 L/min	台州市荣盛科技泵业有限公司
控制器	STM32F407ZGT6开发板	厦门博嵌电子科技有限公司
电压放大器	输入电压0~3.3 V, 输出电压0~10 V	东莞市有凡电子科技有限公司
LWGY-15型涡轮流量传感器	最大测量量程100 L/min, 输出反馈电流4~20 mA	安徽立凯自动化科技有限责任公司
电流转电压模块	输入电流4~20 mA, 输出电压0~3.3 V	深圳市维芯科技集团有限公司
S-120-12型开关电源模块	最大功率120 W, 电压输出12 V	浙江经纬科技集团有限公司

试验过程中由东方红LX1604型拖拉机驱动液压系统,用清水代替液肥作为试验对象。试验前首先对系统流量测量精度进行检验,依次向电液比例阀输入10个控制电压以调节系统输出液肥流量。待系统输出流量稳定后,记录控制器所测得的反馈流量,同时测量1 min内接料桶接取到的输出液肥体积,计算得到该时刻内系统实际输出流量。每个控制电压下重复测量3次,结果取平均值。

对不同控制算法下系统静态特性和动态特性进行检验。参考尿素的肥料施用量来确定液体氮肥目标施

3 台架试验

3.1 试验材料与方法

试验于2024年4月27—28日在石家庄鑫农业机械有限公司进行,试验过程所用液肥变量施肥试验台架硬件构成如表3所示。台架施肥幅宽为3 m,液肥含氮量为32%。利用Keil 5软件将不同控制算法载入到控制器中,通过按下控制板上不同的按键可实现不同控制算法之间的切换。系统实时输出流量通过流量传感器测得并反馈到控制器中,控制器通过串口通信模块将实时流量数据传输到便携式计算机,设置流量数据采集频率为10次/s。通过便携式计算机上的串口助手软件(东莞野火科技有限公司)向控制器发送目标流量信号,模拟施肥机作业过程中控制器接收到来自上位机的目标流量信号。

用量,设定尿素施肥量分别为75、150、225 kg/hm²,作业速度分别为3、5、7 km/h。在相同氮素施用量下,以低施肥量75 kg/hm²为目标,在不同作业速度下目标流量分别为12、20、28 L/min;以中施肥量150 kg/hm²为目标,在不同作业速度下目标流量分别为24、40、57 L/min;以高施肥量225 kg/hm²为目标,在不同作业速度下目标流量分别为36、60、85 L/min;静态试验中,对各个目标流量下系统稳定后实际输出流量进行测量,重复5次。动态试验中,当试验进行0、20、46、72 s时使目标流量发生突变,检验系统实时流量响应特性。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 系统流量测量精度试验

试验结果如图6所示。由图6可看出,以系统流量测量值与实测值为坐标的数据点均在1:1线附近,拟合曲线斜率为0.984,其值接近于1,两者差异很小。流量测量相对误差在4%范围内,表明控制系统具有较高的流量测量精度,可真实反映实际流量输出情况。

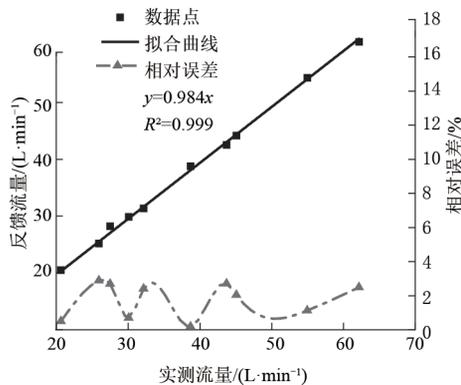


图6 控制系统流量测量值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between measured and actual values of control system flow

3.2.2 稳态特性试验

试验结果如表4所示。由表4可看出,不同目标流量下系统稳态性存在差异。在低目标流量(12~28 L/min)下,各个算法控制下系统输出流量相对误差和变异系数均较大,原因可能是在低目标流量下液压马达处于较低转速状态,此时由于液压马达内泄、系统振动和摩擦转矩变化等原因导致系统稳定性较差,但与传统PID控制和RBF-PID控制相比,PSO-RBF-PID控制下系统输出流量相对误差和变异系数则相对较低,稳态控制效果较好。在高目标流量(40~85 L/min)下,各个算法控制下系

统输出流量相对误差和变异系数差异不大。从总体上看,在不同目标流量下,传统PID、RBF-PID和PSO-RBF-PID控制下系统平均相对误差分别为1.95%、1.67%和1.23%,最大相对误差分别为5.33%、3.83%和2.50%,平均变异系数分别为3.67%、3.07%和2.77%,结果表明,PSO-RBF-PID的稳态控制效果优于传统PID和RBF-PID控制,算法具有优良的稳态性能。

3.2.3 动态特性试验

不同控制算法下系统实时输出流量如图7所示。由图7可看出,不同施肥量下各个算法的控制性能存在差异。在低施肥量下,传统PID、RBF-PID和PSO-RBF-PID控制下系统平均调节时间分别为4.86、3.36、1.73 s,最大超调量分别为9.33%、15.33%和10.16%;在中施肥量下,传统PID、RBF-PID和PSO-RBF-PID控制下平均调节时间分别为5.06、3.80、1.66 s,最大超调量为11.62%、16.54%和9.70%;在高施肥量下,传统PID、RBF-PID和PSO-RBF-PID控制下平均调节时间分别为5.10、3.86、1.70 s,最大超调量为10.63%、16.19%和8.77%。可以看出,随着目标施肥量的增加,传统PID和RBF-PID控制下系统平均调节时间均随着目标施肥量增加而有所增加,最大超调量也呈较高水平。相比之下,PSO-RBF-PID控制下系统平均调节时间和最大超调量均保持在较低水平,表明PSO-RBF-PID控制算法具有较好的非线性控制性能,能够较好地适应不同作业工况。从总体上看,在不同目标施肥量条件下,传统PID、RBF-PID和PSO-RBF-PID算法控制下系统最大调节时间分别为7.4、5.4、3.2 s,平均调节时间分别为5.16、3.80、2.19 s,平均最大超调量分别为6.39%、9.53%和5.41%。结果表明,与传统PID和RBF-PID控制相比,PSO-RBF-PID控制调节时间和最大超调量明显减小,具有更好的流量追踪动态性能。

表4 不同控制算法下流量控制误差

Tab. 4 Flow control error by different control algorithms

序号	目标流量/ (L·min ⁻¹)	PID控制			RBF-PID控制			PSO-RBF-PID控制		
		平均流量/ (L·min ⁻¹)	相对误差/ %	变异系数/ %	平均流量/ (L·min ⁻¹)	相对误差/ %	变异系数/ %	平均流量/ (L·min ⁻¹)	相对误差/ %	变异系数/ %
1	12	12.64	5.33	6.69	12.46	3.83	5.61	12.16	1.33	4.72
2	20	20.40	2.00	5.76	20.50	2.50	3.16	20.36	1.80	4.54
3	28	28.68	2.43	3.20	28.54	1.93	1.69	28.44	1.57	2.21
4	24	24.41	1.71	5.23	24.11	0.46	5.71	24.60	2.50	3.45
5	40	40.47	1.18	3.52	40.68	1.70	3.22	40.29	0.73	2.43
6	57	57.36	0.63	1.36	57.46	0.81	1.11	57.59	1.04	1.66
7	36	35.64	1.00	3.39	36.78	2.17	3.97	36.10	0.28	2.43
8	60	61.23	2.05	1.81	60.80	1.33	1.47	61.03	1.72	2.03
9	85	86.00	1.18	2.07	85.22	0.26	1.73	85.09	0.11	1.49

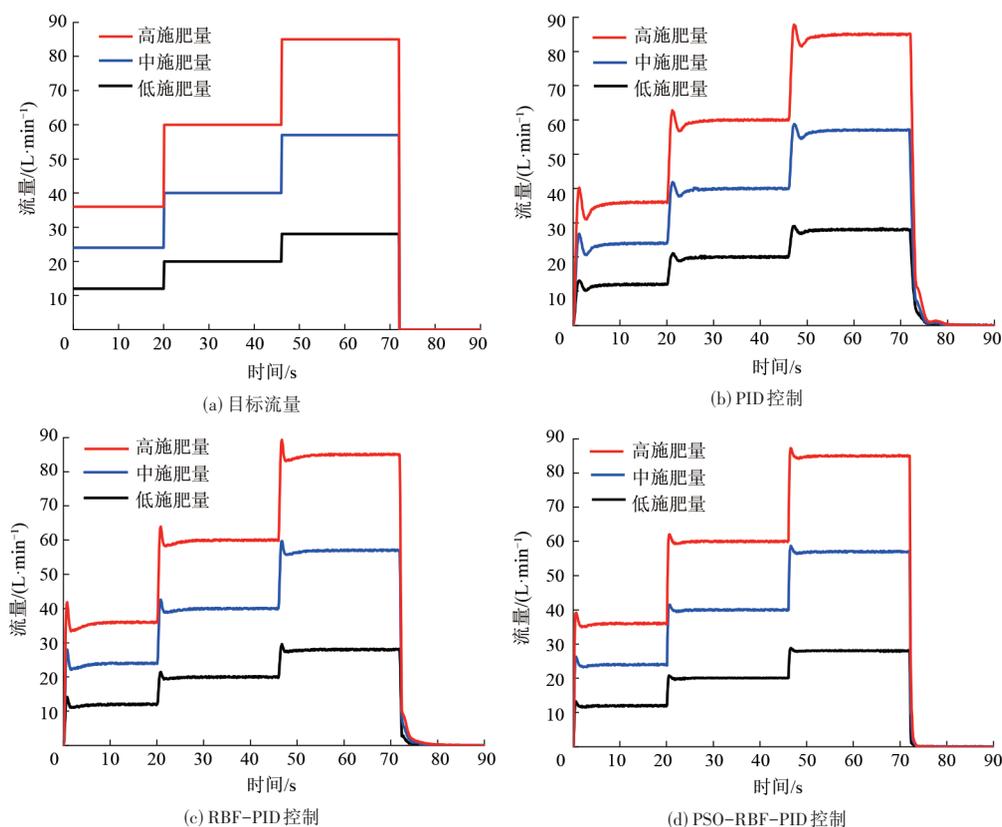


图7 流量追踪试验结果

Fig. 7 Results of flow tracking test

4 结论

(1)提出了一种PSO算法优化RBF-PID控制的液肥变量施用控制方法,通过分析液肥变量施用控制系统结构组成,建立了控制系统闭环负反馈传递函数模型,采用PSO算法对RBF神经网络参数进行迭代寻优,提高了RBF-PID算法非线性控制性能。

(2)基于Matlab/Simulink分别对传统PID控制、RBF-PID控制和PSO-RBF-PID控制下系统输出进行模拟仿真。仿真结果表明,PSO-RBF-PID控制算法下系统调

节时间最短,跟踪误差最小,验证了算法的可行性。

(3)液肥变量施肥台架试验结果表明,相比于传统PID控制和RBF-PID控制,PSO-RBF-PID控制能在低目标流量下仍具有较强的非线性控制性能,系统流量稳态最大相对误差分别减小2.83、1.33个百分点,目标流量突变时系统调节时间分别减少2.97、1.61 s,平均最大超调量分别减小0.98、4.12个百分点。所提出的PSO-RBF-PID控制算法具有较好的静态和动态特性,能够满足液肥精准变量施用要求。

参 考 文 献

- [1] 郎春玲,王金武,王金峰,等.深施型液态肥变量施肥控制系统[J].农业机械学报,2013,44(2):43-47,62.
LANG Chunling, WANG Jinwu, WANG Jinfeng, et al. Variable fertilizer control system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 43 - 47, 62. (in Chinese)
- [2] ZHOU W, AN T, WANG J, et al. Design and experiment of a targeted variable fertilization control system for deep application of liquid fertilizer[J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1687.
- [3] 田敏,白金斌,李江全.基于遗传算法的液肥变量施肥控制系统[J].农业工程学报,2021,37(17):21-30.
TIAN Min, BAI Jinbin, LI Jiangquan. Variable rate fertilization control system for liquid fertilizer based on genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 21 - 30. (in Chinese)
- [4] BAI J, TIAN M, LI J. Control system of liquid fertilizer variable-rate fertilization based on beetle antennae search algorithm [J]. Processes, 2022, 10(2): 357.
- [5] 袁全春,徐丽明,牛丛,等.果园有机肥深施机分层变量排肥控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):195-202.
YUAN Quanchun, XU Liming, NIU Cong, et al. Design and test of layered variable rate fertilizer discharge control system for organic fertilizer deep applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 195 - 202. (in Chinese)
- [6] 李翠锦,周树林,宋乐鹏.基于模糊PID的变量液体施肥控制系统[J].农机化研究,2019,41(3):244-249.

- LI Cuijin, ZHOU Shulin, SONG Lepeng. Particle swarm optimization of adaptive fuzzy PID control for valve cylinder position[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 244 - 249. (in Chinese)
- [7] 汪成文, 尚耀星, 焦宗夏, 等. 阀控电液位置伺服系统非线性鲁棒控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1736 - 1740. WANG Chengwen, SHANG Yaoxing, JIAO Zongxia, et al. Nonlinear robust control of valve controlled electro-hydraulic position servo system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1736 - 1740. (in Chinese)
- [8] 苗中华, 李振华, 王旭永, 等. 中空液压马达系统建模与摩擦动态补偿算法研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 314 - 320. MIAO Zhonghua, LI Zhenhua, WANG Xuyong, et al. Modeling and friction dynamic compensation for ultra-large-diametered hollow hydraulic motor servo system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 314 - 320. (in Chinese)
- [9] 陈远玲, 覃良昊, 陈承宗, 等. 双液压马达驱动的甘蔗根切器刀盘转速同步控制方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 59 - 68.
- [10] 梁春英, 吕鹏, 纪建伟, 等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统PID参数优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 89 - 93, 88.
- LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 89 - 93, 88. (in Chinese)
- [11] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络PID的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 356 - 366. ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356 - 366. (in Chinese)
- [12] 谭顿, 陶建峰, 王旭永. 基于改进粒子群算法的双液压马达同步控制策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 254 - 261. TAN Dun, TAO Jianfeng, WANG Xuyong. synchronous control strategy of dual hydraulic motors based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 254 - 261. (in Chinese)
- [13] LU K, FENG G, DING B. Robust H-infinity tracking control for a valve-controlled hydraulic motor system with uncertain parameters in the complex load environment[J]. Sensors, 2023, 23: 9092.
- [14] ZHU C, ZHANG H, WANG W, et al. Compound control on constant synchronous output of double pump-double valve-controlled motor system[J]. Processes, 2022, 10: 528.
- [15] 陈德海, 任永昌, 黄艳国, 等. 基于改进PSO-RBF算法的纯电动汽车剩余里程实时预测[J]. 汽车工程, 2018, 40(7): 764 - 769. CHEN Dehai, REN Yongchang, HUANG Yanguo, et al. Real time prediction for remaining mileage of battery electric vehicle based on modified PSO-RBF algorithm[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(7): 764 - 769. (in Chinese)
- [16] 唐志勇, 马福源, 裴忠才. 四旋翼的改进PSO-RBF神经网络自适应滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(7): 1563 - 1572. TANG Zhiyong, MA Fuyuan, PEI Zhongcai. Improved PSO-RBF neural network adaptive sliding mode control for quadrotor systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(7): 1563 - 1572. (in Chinese)
- [17] 杨国来, 王洪泽, 郭龙, 等. 阀控液马达动态特性控制的仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(1): 27 - 30. YANG Guolai, WANG Haoze, GUO Long, et al. Simulation research on dynamic characteristic control of hydraulic valve-controlled motor[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(1): 27 - 30. (in Chinese)
- [18] 姚兵, 张策, 王中义, 等. 基于PID控制的精量播种仿真实验对比研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2023, 37(6): 46 - 51. YAO Bing, ZHANG Ce, WANG Zhongyi, et al. Comparative study of precision seeding simulation experiment based on PID control[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 37(6): 46 - 51. (in Chinese)
- [19] 呼云龙, 孙萌, 梁春英, 等. 基于RBF的电液变量施肥控制系统PID参数整定[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 14 - 18. HU Yunlong, SUN Meng, LIANG Chunying, et al. PID parameter setting of electro-hydraulic variable rate fertilization system based on RBF[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 14 - 18. (in Chinese)
- [20] 屈毅, 宁铎, 赖展翅, 等. 温室温度控制系统的神经网络PID控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 307 - 311. QU Yi, NING Duo, LAI Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature[J]. Transactions of the CSAE 2011, 27(2): 307 - 311. (in Chinese)
- [21] MA D, SONG M, YU P, et al. Research of RBF-PID control in maglev system[J]. Symmetry, 2020, 12(11): 1780.
- [22] 李和言, 陈宝瑞, 马彪, 等. 高速覆带车辆静液传动模糊自适应PID同步控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 16 - 19, 45.
- [23] 何海军, 蒙西, 汤健, 等. 基于ET-RBF-PID的城市固废焚烧过程炉膛温度控制方法[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2262 - 2273. HE Haijun, MENG Xi, TANG Jian, et al. ET-RBF-PID-based control method for furnace temperature of municipal waste incineration process[J]. Control Theory and Technology, 2022, 39(12): 2262 - 2273. (in Chinese)
- [24] 谢再秘, 贾宝柱, 王骥, 等. 基于ICS优化RBF的水库水质三维预测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 306 - 314. XIE Zaimi, JIA Baozhu, WANG Ji, et al. Reservoir water quality three-dimensional prediction method based on ICS optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 306 - 314. (in Chinese)
- [25] ZHANG H, YUAN X. An improved particle swarm algorithm to optimize PID neural network for pressure control strategy of managed pressure drilling[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32: 1581 - 1592.
- [26] GUEDRIA N B. Improved accelerated PSO algorithm for mechanical engineering optimization problems[J]. Applied Soft Computing, 2016, 40: 455 - 467.
- [27] 刘尚波, 丹泽升, 廉保旺, 等. 干涉式闭环光纤陀螺仪的PSO-PID控制优化方法[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 250 - 261.
- [28] YANG H, LIU J. An adaptive RBF neural network control method for a class of nonlinear systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(2): 457 - 462.