doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.030

基于 GOHBA - Fuzzy - PID 算法的施肥控制系统优化研究

黄友锐[1,2]　陆　森[1]　韩　涛[1]　刘权增[1]

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 淮南 232001; 2. 安徽工程大学, 芜湖 232000)

摘要: 为满足中草药种植对灌溉精准施肥控制的需求,解决传统 PID 控制存在的超调大、响应慢等问题,本文提出一种基于全局优化蜜獾算法(GOHBA)与模糊 PID 结合的优化控制策略。利用 GOHBA 调节模糊 PID 控制器关键增益参数,以提升系统响应速度与稳定性。在流量 0.5、1.0、1.5、2.0 L/min 条件下开展仿真,比较 GOHBA - Fuzzy - PID 与标准 PID、常规 Fuzzy - PID 及 HBA - Fuzzy - PID 的控制性能。结果表明:GOHBA - Fuzzy - PID 在不同流量下均展现出较小的超调量(16.7% ~26.3%)和更短或相当的稳态时间(92 ~97 s),优于其他控制器,特别当流量为 2.0 L/min 时,其超调量仅为 18.2%,显著低于传统算法。结果表明本文算法在非线性、时变的水肥一体化系统中展现出良好鲁棒性与应用潜力。

关键词: 水肥一体化; GOHBA - Fuzzy - PID 算法; 精准施肥

中图分类号: S232.3; TP273^{+}.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0320-09　　**OSID**:

Optimization of Fertilization Control System Using GOHBA - Fuzzy - PID Algorithm

HUANG Yourui[1,2]　LU Sen[1]　HAN Tao[1]　LIU Quanzeng[1]

(1. *School of Electrical and Information Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *China*
2. *Anhui Polytechnic University*, *Wuhu* 232000, *China*)

Abstract: Aiming to address the demand for precise irrigation and fertilization in Chinese herbal medicine cultivation and overcome the limitations of traditional PID controllers, such as large overshoot and slow response, an optimized control strategy that combined the global optimization honey badger algorithm (GOHBA) with a fuzzy PID controller was proposed. In the proposed approach, GOHBA was employed to tune the critical gain parameters of the fuzzy PID controller, thereby enhancing system response speed and stability. To evaluate performance, simulations were conducted under four different flow rate conditions: 0.5 L/min, 1.0 L/min, 1.5 L/min, and 2.0 L/min. The results of GOHBA - Fuzzy - PID were compared with those of standard PID, conventional Fuzzy - PID, and HBA - Fuzzy - PID controllers. Simulation outcomes demonstrated that the GOHBA - Fuzzy - PID achieved consistently smaller maximum overshoot (ranging from 16.7% to 26.3%) and shorter or comparable settling times (92 ~97 s) across all flow rates. Notably, at a flow rate of 2.0 L/min, the overshoot was reduced to only 18.2%, which was significantly lower than that obtained by traditional algorithms. These findings indicated that the proposed algorithm exhibited strong robustness and promising applicability for nonlinear and time-varying systems, thereby providing a feasible solution for precision irrigation and fertilization in Chinese herbal cultivation.

Key words: water - fertilizer integration; GOHBA - Fuzzy - PID algorithm; precision fertilization

0　引言

传统农业生产模式在处理药用植物栽培问题时,其资源利用效率与环境负荷方面表现欠佳。在高效与可持续农业目标实现过程中,精准农业技术特别是智能控制与自动化技术的融合应用正受到广

收稿日期: 2025 - 06 - 16　修回日期: 2025 - 07 - 08

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT - 2023 - 068)和安徽理工大学研究生创新基金项目(2024cx2061)

作者简介: 黄友锐(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事智能装备和智能信息处理研究,E-mail: hyr628@163.com

泛重视[1-2]。

灌溉与施肥过程的精确管理得以实现，须归功于水肥一体化技术的推广应用，该技术对草本植物产量提升与资源节约具有显著效果性。管道响应滞后、动态特性时变以及系统非线性等难题仍然存在，这些因素导致传统 PID 控制策略在精度维持和稳定保障方面面临严峻挑战[3-4]。设计具备更强适应能力与鲁棒特性的控制方法已成为学界关注的焦点性问题[5-6]。

在传统 PID 控制优化方面，元启发式算法展现出独特优势。朱凤磊等[7]采用蝙蝠算法对 BP 神经网络 PID 控制器进行参数优化，并应用于露地农业生产中的精准施肥环节，有效解决了水肥系统非线性及时变特性问题。章海亮等[8]基于麻雀搜索算法实现了模糊 PID 控制器增益参数优化，结果表明，系统 pH 值与电导率调控效果获得改善，同时超调现象减少且稳定时间缩短。将元启发式优化算法与 PID 控制器相结合，已成为当前精准施肥控制系统优化的重要研究方向。然而，现有方法在全局寻优能力和收敛速度方面仍存在一定局限，使得灌溉施肥系统在面对非线性、时变工况时，仍难以有效避免超调及振荡等问题[9]。

本文研究一种融合全局优化蜜獾算法（GOHBA）与模糊 PID 控制器的优化控制策略，以提升灌溉施肥系统在非线性、时变工况下的控制精度与响应性能。

1　水肥一体化控制系统

1.1　水肥一体化控制系统结构组成

水肥一体化系统将水和肥料混合后进行输送灌溉，从而实现肥料在土壤中的均匀分布[10-11]。如图 1 所示，系统由储肥桶、单向阀、流量传感器、蓄水池、电动泵、混液桶、电磁阀、过滤器以及终端等部件组成。工作时，开启电磁阀，电动泵将水和肥料按比例抽入到混液桶搅拌混合，再经灌溉管道输送到药田。通过流量传感器监测，若与设定值偏离，水肥一体化系统会自动调节泵流量，以维持流量稳定。

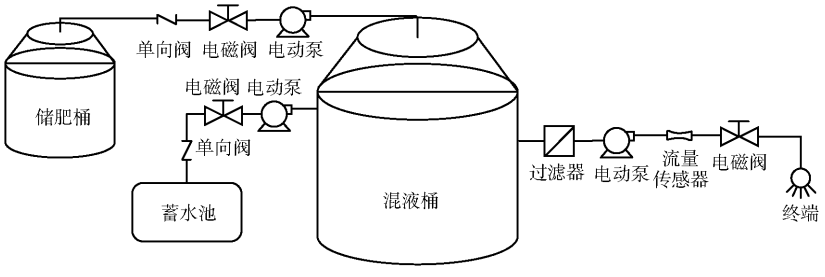


图 1　中草药水肥一体化控制系统结构组成

Fig. 1　Structural diagram of integrated water－fertilizer system for medicinal herbs

1.2　水肥一体化控制系统模型建立

考虑到中草药施肥特性和系统复杂性，可使用一阶惯性和延迟环节的传递函数描述精准施肥控制数学模型[12]，即

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

式中　K——增益系数

τ——延迟时间

T——时间常数

s——复频率

设定施肥流量目标值为开环系统输入信号，采样时间间隔为 1 s，收集流量数据。利用最小二乘法在 Matlab 中进行分析，最终确定系统增益系数 K 为 1，延迟时间 τ 为 5 s，时间常数 T 为 3.7 s。

2　基于 GOHBA 算法优化的模糊 PID 控制器设计

2.1　PID 控制器设计

图 2 为 PID 控制器结构组成[13-14]。

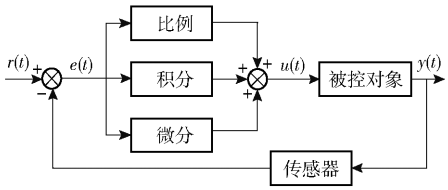


图 2　PID 控制器结构图

Fig. 2　Structure of PID controller

由图 2 可知，根据设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 之间的偏差 $e(t)$ 生成控制量 $u(t)$，并作用于被控对象，以消除偏差。控制量 $u(t)$ 表达式为

$$u(t)=K_p\left(e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t+T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right) \tag{2}$$

式中　K_p——比例系数

T_i——积分时间常数

T_d——微分时间常数

水肥一体化精准施肥控制系统中偏差 $e(t)$ 需通过采样获取。因此，需对式(2)进行离散化处理。假设采样周期为某一固定值，经过 k 次采样后，离散化处理可得到位置式 PID 离散算法，即

$$u(k)=K_p e_k+K_i\sum_{j=0}^{k}e_j+K_d(e_k-e_{k-1}) \quad (3)$$

式中 K_i——积分系数 K_d——微分系数

e_j——第 j 个采样时刻误差

e_k——第 k 个采样时刻输入偏差

考虑到水肥一体化精准施肥系统具有非线性与时变特性,采用增量式 PID 控制结构以提升其在数字采样环境下的适应性。并对连续时间信号 t 进行离散化处理。假设 k 为当前采样时刻,根据式(3)可以递推得 $u(k-1)$,通过 $u(k)$减去 $u(k-1)$得到 $\Delta u(k)$为

$$\Delta u(k)=K_p(e_k-e_{k-1})+K_i e_k+K_d(e_k-2e_{k-1}+e_{k-2}) \quad (4)$$

因此控制量 $u(k)$可表示为

$$u(k)=u(k-1)+\Delta u(k) \quad (5)$$

水肥一体化精准施肥系统核心设计之一为 PID 控制器的 K_p、T_i、T_d 参数整定,针对本文数学模型采用科恩-库恩设计方法[15]进行初步整定,整定公式为

$$\begin{cases}K_p=\dfrac{1}{K}\left[1.35\left(\dfrac{\tau}{T}\right)^{-1}+0.27\right]\\ T_i=T\left[2.5\dfrac{\tau}{T}+0.5\left(\dfrac{\tau}{T}\right)^2\Big/\left(1+0.6\dfrac{\tau}{T}\right)\right]\\ T_d=T\left[0.37\dfrac{\tau}{T}\Big/\left(1+0.2\dfrac{\tau}{T}\right)\right]\end{cases} \quad (6)$$

将式(1)数学模型相应的参数值代入式(6),计算得 $K_p=1.269$、$T_i=8.769$、$T_d=1.456$,可得 $K_i=K_p/T_i=0.145$,$K_d=K_pT_d=1.848$。

PID 控制在线性系统中应用广泛,但调节器输出 $u(k)$与过去所有偏差信号相关,需累积偏差 $e(i)$,导致计算量大。此外,计算机故障可能导致 $u(k)$产生较大振荡,不仅给控制带来困难,在某些情况下还可能导致严重事故。所以,PID 控制在控制系统应用中并不常见[16]。

2.2 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制策略是在模糊逻辑基础上集成 PID 控制原理而构建的一种混合型控制方法[17-18]。通过利用模糊化手段,对 PID 控制器参数进行自适应调节使得控制器能够更好地适应不同的控制对象和需求,强化系统动态稳定特性及鲁棒控制性能。其工作原理如图 3 所示。

模糊 PID 控制的关键在于融合模糊逻辑与 PID 控制,将输入变量(偏差 e 和偏差变化率 e_c)模糊化动态调节 PID 参数,从而适应不断变化的系统控制需求。通过调整 K_p 提升系统响应速度,减小稳态误差;调整 K_i 可消除稳态误差;调整 K_d 改变系统动态特性。

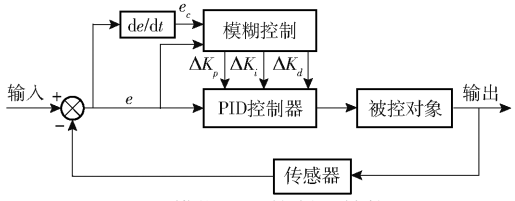


图 3 模糊 PID 控制器结构图

Fig. 3 Structure of fuzzy PID controller

在模糊 PID 控制器设计中,引入 PID 控制理念,并将控制精度作为关键指标[19]。将输入偏差(e)和偏差变化率(e_c)分为 7 个模糊集合,分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)和 PB(正大)。同时,输出的 PID 参数增量(ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d)也划分为 7 个模糊集合,因此,模糊子集可表示为:e、e_c、ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d = {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。模糊控制规则依据专家经验构建,K_p、K_i、K_d 控制策略如表 1~3 所示。

表 1 ΔK_p 自整定规则

Tab. 1 Self-setting rules of ΔK_p

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NM	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NS	PM	PS	PS	ZO	PS	PM	PM
ZO	PM	PS	PS	ZO	PS	PS	PM
PS	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
PM	PB	PB	PM	PM	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB

表 2 ΔK_i 自整定规则

Tab. 2 Self-setting rules of ΔK_i

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB
NM	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB
NS	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
ZO	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
PS	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
PM	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NB	NB	NB

模糊控制器有 2 个输入量:流量偏差 e 与偏差变化量 e_c,通过模糊推理机制,可得 PID 控制参数动态修正值 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d,在线对 K_p、K_i 和 K_d 参数进行修正。修正规则为

$$K_p=K_{p0}+\Delta K_p \quad (7)$$

$$K_i=K_{i0}+\Delta K_i \quad (8)$$

$$K_d=K_{d0}+\Delta K_d \quad (9)$$

表 3　ΔK_d 自整定规则

Tab. 3　Self-setting rules of ΔK_d

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NM	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
NS	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
ZO	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PM	PB	PM	PS	PS	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB

式中　K_{p0}、K_{i0}、K_{d0}——修正前 PID 特征参数初始值

对于偏差 e、偏差变化率 e_c 以及 3 个 PID 特征参数修正增量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 模糊论域均为[－6，6]。

2.3　基于 GOHBA 优化 Fuzzy－PID 控制器设计

2.3.1　HBA 算法优化原理

文献[20]提出了蜜獾算法(HBA)，该算法通过模拟蜜獾在寻找食物过程的行为特征，有效实现全局最优解搜索，且具备简单结构和良好全局搜索能力。

初始化阶段，先确定蜜獾数量，即种群规模 N，并为每只蜜獾分配随机初始位置。位置 x_i 计算式为

$$x_i = lb_i + r_1(ub_i - lb_i) \tag{10}$$

式中　r_1——0～1 之间的随机数

lb_i、ub_i——搜索域下界和上界

猎物气味强度 I_i 由猎物浓度和距离共同决定，其计算式为

$$I_i = r_2 \frac{(x_i - x_{i+1})^2}{4\pi(x_{\text{prey}} - x_i)^2} \tag{11}$$

式中　r_2——0～1 之间的随机数

x_{prey}——算法中最优个体位置

x_{i+1}——迭代过程中下一个候选位置

当蜜獾与猎物的距离变近，吸引力变强。

密度因子(α)调控算法时变随机化，以实现从全局勘探到局部开采阶段的平稳切换。计算式为

$$\alpha = 2\exp\frac{-t}{t_{\max}} \tag{12}$$

式中　t——当前迭代次数

$t_{\max}$——最大迭代次数

为避免陷入局部最优区域，HBA 算法位置更新过程(x_{new})由“挖掘阶段”和“蜂蜜阶段”构成。

在挖掘阶段，蜜獾行为模式模拟为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F\beta I x_{\text{prey}} + Fr_3\alpha d_i \left|\cos(2\pi r_4)(1-\cos(2\pi r_5))\right| \tag{13}$$

蜜獾受导蜜鸟引导而接近蜂巢行为机制模拟为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + Fr_7\alpha d_i \tag{14}$$

HBA 算法更新过程设置 1 个参数 $F \in \{-1, 1\}$ 为搜索方向标志，不仅保持较高搜索效率，同时也提升对整个空间进行全面探索的可能性 x_{prey} 即是猎物位置，即全局最佳位置。$\beta \geqslant 1$(默认为 6)是蜜獾获取食物能力。d_i 为猎物与第 i 只蜜獾之间距离。r_3、r_4、r_5 和 r_7 为 0～1 之间的 4 个随机数。定向标注 F 用于调整方向由 E_q 确定：如果 r_6 小于等于 0.5 则 $F=1$，反之则 $F=-1$。此外，在挖掘阶段，蜜獾遇到的某些干扰因素，可能促使其发现更佳的猎物位置。

2.3.2　HBA 算法改进

虽然蜜獾算法具有结构简单、全局搜索能力强等优点，但在复杂问题中易陷入局部最优，且计算复杂度较高。基于 GOHBA(Global optimization HBA)算法[21]通过引入 Tent 序列初始化种群、引入新的密度因子以及引入黄金正弦策略，算法搜索能力得到显著提升。通过改进，算法不仅能有效规避局部最优问题，还能获得更迅速的收敛特征和更高的稳定性能。

为了解决蜜獾算法(HBA)中初始种群质量较差的问题，全局优化蜜獾算法(GOHBA)引入种群初始化的 Tent 混沌映射[22]。Tent 映射随机性与混沌遍历特性被 GOHBA 算法用来生成初始种群，确保种群分布的均匀性。增强了种群多样性和品质，并最终提升了算法优化能力。Tent 映射结构为

$$x_{n+1} = \begin{cases} \dfrac{x_n}{a} & (0 \leqslant x_n \leqslant a) \\ \dfrac{1-x_n}{1-a} & (a < x_n \leqslant 1) \end{cases} \tag{15}$$

其中，$0 < a < 1$；一般 a 取 0.5。

针对 HBA 算法中，密度因子 α 近似于线性递减的方式易使算法陷入局部最优解，难以摆脱，从而影响算法收敛精度。GOHBA 算法引入基于正弦函数密度因子[23]，有利于在全局范围内搜索最优值，即

$$\alpha = 1 + \sin(\pi/2 + \pi^* iter_c / iter_{\max}) \tag{16}$$

黄金正弦策略(Golden sine strategy)[24]在 HBA 算法搜索空间逐渐变窄时发挥作用，并在可能达到最优解区域进行搜索。该策略提升 HBA 算法优化效率，并减小其陷入局部最优解的风险。黄金正弦策略利用黄金分割的分布优势和正弦函数的随机特征，动态调节搜索步长以增加种群多样性，实现全局与局部搜索协调，从而提升算法在复杂非线性环境中的鲁棒性与适应性。GOHBA 算法流程图如图 4 所示。

针对模糊 PID 控制器存在的依赖经验规则、实时性和适应性较差以及可移植性低等问题，提出了

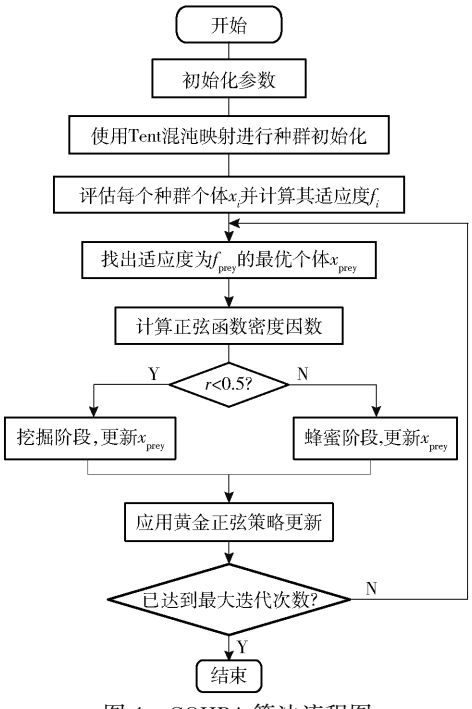


图 4 GOHBA 算法流程图

Fig. 4 GOHBA algorithm flowchart

一种新的控制方法。利用 GOHBA 算法快速收敛性和强大的局部最优回避能力,对模糊 PID 控制器权值进行了优化。如图 5 所示,该方法将 GOHBA 与模糊 PID 控制相结合,改善模糊 PID 性能,提高其在复杂条件下的控制效果。

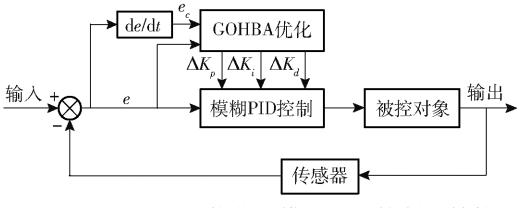


图 5 基于 GOHBA 优化的模糊 PID 控制器结构图

Fig. 5 Structure diagram of fuzzy neural network PID controller based on GOHBA optimization

GOHBA -模糊 PID 控制过程如下:

(1)GOHBA 算法初始化采用 Tent 混沌映射方式初始化种群个体,设定优化参数 K、K_p、K_i、K_d,对个体的适应度进行计算,随后确定初期的最佳解决方案;其中,k_1、k_2、k_3 为比例因子,在种群中,每个个体表示一个比例因子的解。

(2)个体应用于模糊 PID 控制器进行仿真测试计算偏差 e 和偏差变化量 e_c,使用模糊推理获得 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d。计算调整后 PID 参数

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + k_1 \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + k_2 \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + k_3 \Delta K_d \end{cases} \tag{17}$$

在 Simulink 仿真,计算适应度(ITAE 指数 + 超调量 σ)以获得当前最佳适应度,与此同时,更新纪录最优个体位置

$$F = \int_0^{\infty} t|e(t)|\mathrm{d}t + \sigma \tag{19}$$

(3)GOHBA 优化,利用黄金正弦策略提升全局搜索能力,对种群位置进行更新。计算适应度,并更新最优解位置。

(4)以达到设定的最大迭代次数(100 次)作为终止条件,最优解通过解码过程获得。图 6 为初始设定值所对应的适应度函数变化轨迹。

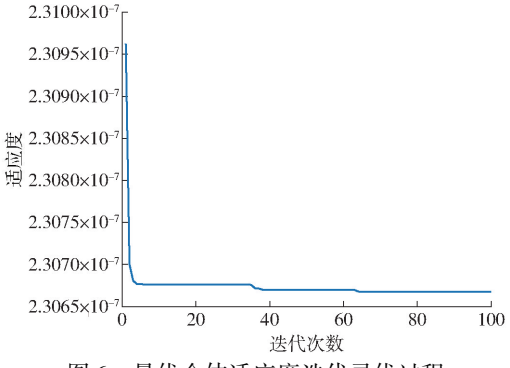


图 6 最优个体适应度迭代寻优过程

Fig. 6 Optimal individual adaptation value iterative optimization search process diagram

(5)输出优化结果通过描绘收敛曲线,以分析优化过程中适应度的变动情况;生成参数变化趋势图,分析 PID 参数的调整效果。

3 仿真

在 Simulink 中构建 PID、模糊 PID 和 GOHBA - Fuzzy - PID 控制器仿真模型完成 GOHBA - Fuzzy - PID 算法策略性能验证(图 7)。根据中草药实际灌溉流量(0 ~ 2 L/min),算法需能够有效适应该区间内的任意流量设定需求[25],因此,选取 0.5、1、1.5、2 L/min作为目标流量进行仿真。仿真结果如图 8 和表 4 所示。

3.1 仿真结果与分析

由图 8a 可知,当流量为 0.5 L/min 时,GOHBA - Fuzzy - PID 控制器展现出优异的响应性能,其最大超调量仅为 21.7%,且稳态时间相对较短为 87 s。相比之下,PID 控制器超调量为 31.7%,稳态时间为 89 s。而 Fuzzy - PID 控制器性能则相对较差,超调量高达 35.8%,稳态时间更是长达 90 s。

由图 8b 可知,当流量为 1.0 L/min 时,GOHBA - Fuzzy - PID 控制器的响应几乎接近理想状态,其最大超调量进一步降低至 15%,稳态时间也相对较短,仅为 95 s。此时,PID 控制器超调量为 25%,稳态时间为 100 s。Fuzzy - PID 控制器性能不佳,超调量高达 34%,稳态时间长达 110 s。

由图 8c 可知,当流量为 1.5 L/min 时,GOHBA -

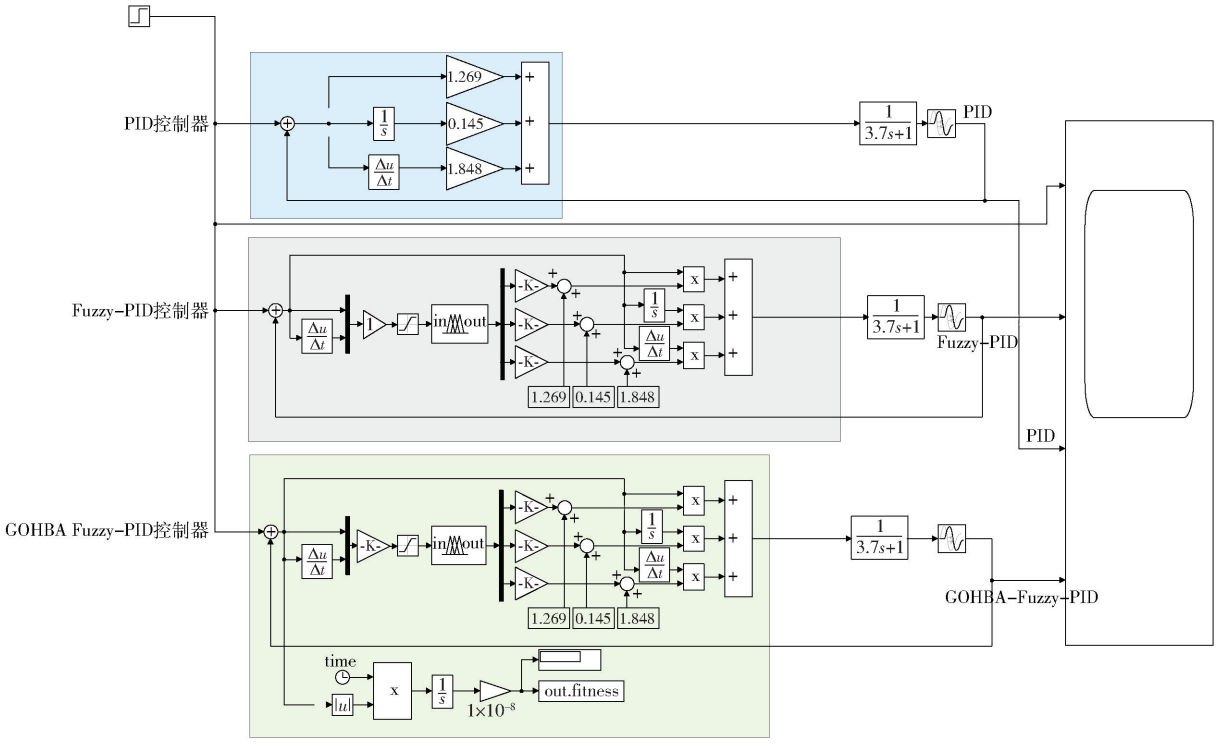


图 7　Simulink 控制系统模型

Fig. 7　Simulink control system model diagram

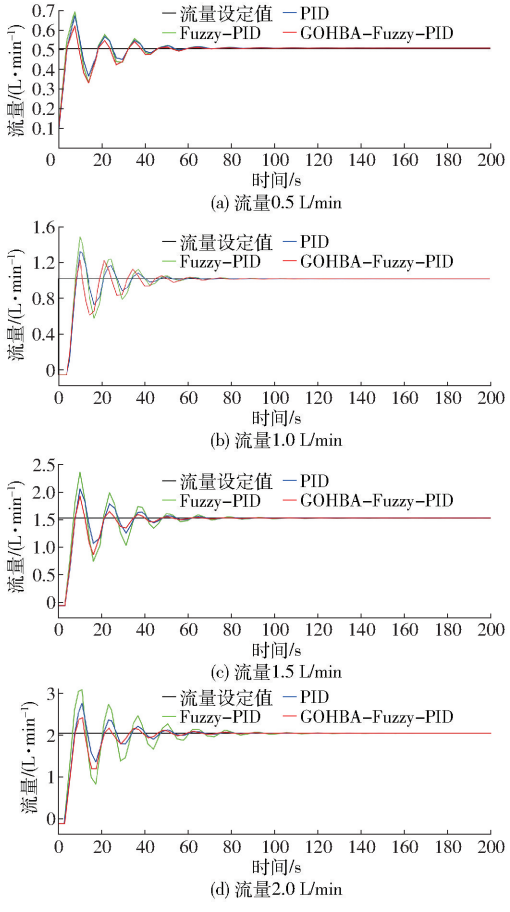


图 8　不同流量下 3 种控制器仿真结果

Fig. 8　Simulation results of three controllers at four set flow rates

Fuzzy－PID 控制器最大超调量为 26.3%，稳态时间为 92 s。而 PID 控制器超调量为 33.8%，稳态时间为 90 s。Fuzzy－PID 控制器性能最差，超调量高达 51.6%，稳态时间长达 104 s。

由图 8d 可知，当流量为 2.0 L/min 时，所有控制器性能均有所下降。GOHBA－Fuzzy－PID 控制器仍表现最佳，但其最大超调量为 18%，稳态时间为 100 s。PID 控制器超调量增大至 35%，稳态时间仍为 100 s。Fuzzy－PID 控制器超调量高达 49%，稳态时间为 120 s。

由表 4 可知，在测试工况下（0.5、1.0、1.5、2.0 L/min），GOHBA－Fuzzy－PID 控制器抑制超调

表 4　3 种控制器不同流量性能指标

Tab. 4　Three controller performance indicators when flow rate was set

控制器	设定流量/(L·min⁻¹)	最大超调量/%	稳态时间/s
PID	0.5	31.7	89
	1.0	25.0	100
	1.5	33.8	90
	2.0	35.0	100
Fuzzy－PID	0.5	35.8	90
	1.0	34.0	110
	1.5	51.6	104
	2.0	49.0	120
GOHBA－Fuzzy－PID	0.5	21.7	87
	1.0	15.0	95
	1.5	26.3	92
	2.0	18.0	100

性能始终保持最优,其响应速度存在波动。PID 控制器性能居中,且其超调和稳定时间也受设定流量影响。Fuzzy－PID 控制器性能最差,超调大、振荡剧烈、稳定慢,表明参数优化对控制器(尤其是模糊控制器)性能起决定性作用。结果显示,该被控系统对于工作点(设定流量)的变化较为敏感,控制难度随流量设定值增加而增大。

3.2 与改进控制器对比

为进一步验证 GOHBA－Fuzzy－PID 控制器性能,引入未经改进的蜜獾算法(HBA)优化 Fuzzy－PID 的控制器,通过在 Simulink 构建仿真模型(PID 模块、Fuzzy－PID 模块、GOHBA－Fuzzy－PID 模块、HBA－Fuzzy－PID 模块)进一步验证 GOHBA－Fuzzy－PID 控制器性能。根据中草药实际灌溉需求,选取 0.5、1.0、1.5、2.0 L/min 作为目标流量进行仿真,结果如图 9 和表 5 所示。

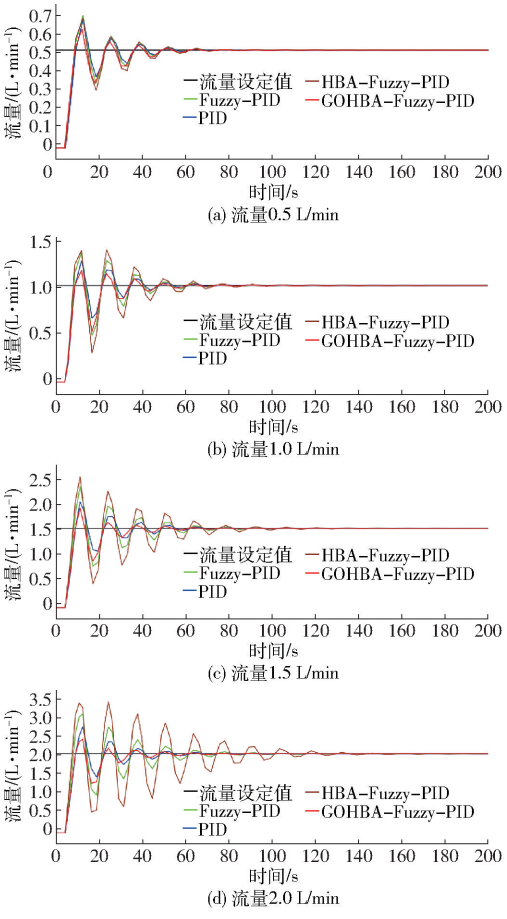


图 9 不同流量下 4 个控制器仿真结果

Fig. 9 Simulation results of four controllers at four set flow rates

由图 9a 可知,当流量为 0.5 L/min 时,GOHBA－Fuzzy－PID 控制器最大超调量最小,仅为 21.6%,稳态时间为 92 s。相比之下,PID 控制器超调量为 31.6%,稳态时间为 92 s。Fuzzy－PID 控制器性能最差,超调量高达 36%,稳态时间需要 93 s。而 HBA－Fuzzy－PID 控制器表现稍差,超调量为 31.6%,稳态时间为 94 s。

表 5 4 种控制器不同流量的性能指标

Tab. 5 Four controller performance indicators when flow rate was set

控制器	设定流量/(L·min⁻¹)	最大超调量/%	稳态时间/s
PID	0.5	31.6	92
	1.0	25.8	97
	1.5	34.3	87
	2.0	34.5	94
Fuzzy－PID	0.5	36.0	93
	1.0	35.0	98
	1.5	52.5	112
	2.0	50.7	116
HBA－Fuzzy－PID	0.5	31.6	94
	1.0	36.7	124
	1.5	64.6	136
	2.0	64.9	167
GOHBA－Fuzzy－PID	0.5	21.6	92
	1.0	16.7	96
	1.5	26.3	97
	2.0	18.2	94

由图 9b 可知,当流量为 1.0 L/min 时,GOHBA－Fuzzy－PID 控制器响应近乎理想,其最大超调量最小,为 16.7%,稳态时间相对较短,为 96 s。PID 控制器超调量为 25.8%,稳态时间为 97 s。Fuzzy－PID 控制器性能较差,超调量高达 35%,稳态时间需要 98 s。而 HBA－Fuzzy－PID 控制器表现最差,超调量为 36.7%,稳态时间为 124 s。

由图 9c 可知,当流量为 1.5 L/min 时,GOHBA－Fuzzy－PID 控制器效果明显优于其他控制器,其最大超调量为 26.3%,稳态时间相对较短,为 97 s。PID 控制器超调量为 34.3%,稳态时间为 87 s。Fuzzy－PID 控制器性能较差,超调量高达 52.5%,稳态时间需要 112 s。而 HBA－Fuzzy－PID 控制器表现最差,超调量为 64.6%,稳态时间为 136 s。

由图 9d 可知,当流量为 2.0 L/min 时,GOHBA－Fuzzy－PID 控制器最大超调量为 18.2%,稳态时间为 94 s。PID 控制器超调量为 34.5%,稳态时间为 94 s。Fuzzy－PID 控制器性能较差,超调量高达 50.7%,稳态时间需要 116 s。而 HBA－Fuzzy－PID 控制器表现最差,超调量为 64.9%,稳态时间最长,为 167 s。

由表 5 可知,PID 控制器表现较为稳定,其最大超调量为 25.8% ~34.5%,稳态时间为 87 ~97 s。然而,Fuzzy－PID 控制器在高流量下超调量和稳态时间显著增加,当流量为 1.5、2.0 L/min 时,超调量

分别达到 52.5% 和 50.7%，稳态时间也明显延长。HBA－Fuzzy－PID 控制性能进一步下降，尤其当流量为 2.0 L/min 时，超调量高达 64.9%，稳态时间长达 167 s。相比之下，GOHBA－Fuzzy－PID 控制在所有流量下均表现出更优性能，其最大超调量为 16.7% ~ 26.3%，稳态时间为 92 ~97 s，显示出更强的稳定性以及快速响应能力。

4　结论

（1）提出了一种 GOHBA－Fuzzy－PID 控制算法。采用 GOHBA 算法对模糊 PID 的量化因子进行优化调整。通过评估适应度函数极值确定模糊 PID 控制器最优量化因子，提高了系统稳定性和控制准确性。

（2）仿真结果表明，GOHBA－Fuzzy－PID 控制器性能显著提升，在流量设定区间内，展现了更优的动态特性，尤其在超调量和稳态时间等关键指标上，相较于基于 HBA 算法优化的模糊 PID 控制器，表现更为优异。因此，GOHBA－Fuzzy－PID 控制器能够更精准地满足中草药施肥过程中的控制需求。

参　考　文　献

[1] 朱德兰，阮汉铖，吴普特，等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报，2022，53(1)：186－191.
ZHU Delan，RUAN Hancheng，WU Pute，et al. Trategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(1)：186－191.（in Chinese）

[2] 刘永华，沈明霞，蒋小平，等. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报，2015，46(11)：76－81.
LIU Yonghua，SHEN Mingxia，JIANG Xiaoping，et al. Structure optimization of suction device and performance test of integrated water and fertilizer fertigation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(11)：76－81.（in Chinese）

[3] 范锦杰，张立新，娄晓康，等. 滴灌棉田施肥系统水肥 EC 值控制策略研究[J]. 节水灌溉，2021(4)：1－5.
FAN Jinjie，ZHANG Lixin，LOU Xiaokang，et al. Study on control strategy of water and fertilizer EC value in drip irrigation cotton field fertilization system[J]. Water Saving Irrigation，2021(4)：1－5.（in Chinese）

[4] 王庆华，周晶，侯俊才. 基于变论域模糊 PID 的水肥控制策略研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(11)：144－154.
WANG Qinghua，ZHOU Jing，HOU Juncai. Irrigation and fertilizer control strategy based on variable domain fuzzy PID[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)，2023，51(11)：144－154.（In Chinese）

[5] 刘炳铄，兰鹏，魏珉，等. 轻简水肥一体化系统设计与实现[J]. 节水灌溉，2021(2)：75－79.
LIU Bingshuo，LAN Peng，WEI Min，et al. Design and implementation of a simple water and fertilizer integration system[J]. Water Saving Irrigation，2021(2)：75－79.（In Chinese）

[6] LI Yang，ZHAO Ji，JI Shijun. Thermal positioning error modeling of machine tools using a bat algorithm-based back propagation neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，97(5)：2575－2586.

[7] 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(1)：135－143，171.
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(1)：135－143，171.（in Chinese）

[8] 章海亮，聂训，黄招娣. 基于麻雀搜索算法优化的模糊 PID 控制方法研究[J]. 中国农机化学报，2024，45(4)：141－148.
ZHANG Hailiang，NIE Xun，HUANG Zhaodi. Research on fuzzy PID control method based on sparrow search algorithm optimization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(4)：141－148.（in Chinese）

[9] 李建军，许燕，张冠，等. 基于 BP 神经网络预测和模糊控制的灌溉控制器设计[J]. 机械设计与研究，2015，31(5)：150－154.
LI Jianjun，XU Yan，ZHANG Guan，et al. Optimizational design of irrigation controller based on BP neural network prediction and fuzzy control[J]. Machine Design & Research，2015，31(5)：150－154.（in Chinese）

[10] 孔令英，余欣. 新疆节水灌溉与农业绿色治理协调发展研究[J]. 石河子大学学报(哲学社会科学版)，2022，36(4)：32－39.
KONG Lingying，YU Xin. Research on the collaborative development of agriculturl green governance and water-saving irrigation in Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University(Philosophy and Social Sciences)，2022，36(4)：32－39.（in Chinese）

[11] 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）

[12] MENG Zihao，ZHANG Lixin，WANG Huan，et al. Research and design of precision fertilizer application control system based on PSO－BP－PID algorithm[J]. Agriculture，2022，12(9)：1395.

[13] 黄金龙，秦小元，沈博渊，等. 基于神经网络和智能优化算法的水电机组自适应 PID 控制[J]. 中国农村水利水电，2022(9)：195－200，208.

HUANG Jinlong, QIN Xiaoyuan, SHEN Boyuan, et al. Adaptive PID control of hydropower unit based on neural network and intelligent optimization algorithms[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(9): 195 - 200, 208. (in Chinese)

[14] 叶政. PID 控制器参数整定方法研究及其应用[D]. 北京:北京邮电大学,2016.
YE Zheng. Research on PID controller parameter tuning method and its application[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in chinese)

[15] COHEN G H, COON G A. Theoretical consideration of retarded control[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1953, 75(5): 827 - 834.

[16] 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 - 64,94.
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, 94. (in Chinese)

[17] 张长龙,李文春,马蓉,等. 基于模糊 PID 自动转向控制系统的研究[J]. 农机化研究,2016,38(11):162 - 165,176.
ZHANG Changlong, LI Wenchun, MA Rong, et al. Automatic steering control system research on fuzzy PID[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 162 - 165, 176. (in Chinese)

[18] 李擎,李家春,熊贤沙,等. 主路式水肥一体机施肥系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(2):68 - 74.
LI Qing, LI Jiachun, XIONG Xiansha, et al. Design and experiment of main road water and fertilizer system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(2): 68 - 74. (in Chinese)

[19] 刘杰,李允公,刘宇,等. 智能控制与 MATLAB 实用技术[M]. 北京:科学出版社,2017.

[20] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey Badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192: 84 - 110.

[21] HUANG Yourui, LU Sen, LIU Quanzeng, et al. GOHBA: improved honey badger algorithm for global optimization[J]. Biomimetics, 2025, 10(2): 92.

[22] 尹萍,谈果戈,宋伟,等. 基于混沌映射的改进金枪鱼群优化算法对比研究[J]. 计算机科学,2024,51(增刊 1):273 - 282.
YIN Ping, TAN Guoge, SONG Wei, et al. Comparative study on improved tuna swarm optimization algorithm based on chaotic mapping[J]. Computer Science, 2024, 51(Supp. 1): 273 - 282. (in Chinese)

[23] HUANG Yourui, LIU Quanzeng, SONG Hongping, et al. CMGWO: grey wolf optimizer for fusion cell-like P systems[J]. Heliyon, 2024, 10(14): e34496.

[24] 赵沛雯,张达敏,张琳娜,等. 融合黄金正弦算法和纵横交叉策略的秃鹰搜索算法[J]. 计算机应用,2023,43(1):192 - 201.
ZHAO Peiwen, ZHANG Damin, ZHANG Linna, et al. Bald eagle search optimization algorithm with golden sine algorithm and crisscross strategy[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(1): 192 - 201. (in Chinese)

[25] 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)