

基于ACOR-Smith-Fuzzy + PID的水肥EC值 调控模型研究

蔡先磊, 陶为戈*

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

针对水肥一体化系统中传统PID控制存在调节滞后、过冲现象, 而模糊PID参数整定主观性强、优化效果有限的问题, 设计基于ACOR-Smith-Fuzzy + PID的水肥EC值智能控制系统。该方法以Smith预估器补偿系统纯时滞, 以ACOR算法对模糊PID参数进行全局寻优, 协同实现时滞补偿与参数自适应整定。基于MATLAB/Simulink平台完成多目标EC值工况下的对比仿真, 并以GD32微控制器为核心搭建实验验证平台。结果表明: 与模糊PID相比, 所提方法调节时间缩短43.3%, 稳态误差降低50.0%, 超调量减小68.0%, 有效抑制了时滞引起的振荡现象。

关键词

水肥一体化, ACOR-Smith-Fuzzy + PID, EC值调控

Research on Water and Fertilizer EC Value Regulation Model Based on ACOR-Smith-Fuzzy + PID

Xianlei Cai, Weige Tao*

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: April 26, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Aiming at the problems of regulation lag and overshoot in the traditional PID control of the water

*通讯作者。

文章引用: 蔡先磊, 陶为戈. 基于 ACOR-Smith-Fuzzy + PID 的水肥 EC 值调控模型研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(3): 548-563. DOI: 10.12677/jsta.2026.143055

and fertilizer integrated system, as well as the strong subjectivity and limited optimization effect of the fuzzy PID parameter tuning, an intelligent control system for water and fertilizer EC values based on ACOR-Smith-Fuzzy + PID is designed. This method uses the Smith predictor to compensate for the pure time delay of the system and the ACOR algorithm to globally optimize the parameters of the fuzzy PID, thereby achieving time delay compensation and parameter adaptive tuning in a coordinated manner. The multi-objective EC value working conditions are simulated on the MATLAB/Simulink platform, and an experimental verification platform is built with the GD32 microcontroller as the core. The results show that compared with the fuzzy PID, the proposed method reduces the regulation time by 43.3%, the steady-state error by 50.0%, and the overshoot by 68.0%, effectively suppressing the oscillation phenomenon caused by time delay.

Keywords

Water and Fertilizer Integration, ACOR-Smith-Fuzzy + PID, EC Value Regulation

Copyright © 2026 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

在“藏粮于地、藏粮于技”的国家粮食安全战略背景下,我国农业面临水资源短缺、化肥过量施用、面源污染加剧的严峻挑战[1]。水肥一体化技术应运而生,作为构建在滴灌系统基础之上的现代农业核心技术,以实现节水、节肥、高产、高效为根本目标。该技术秉承“以肥调水,以水促肥”的科学理念,通过水肥耦合协同作用,为解决资源约束与产量需求矛盾提供了有效途径,并推动了农业灌溉模式的根本性变革[2]。

在智能灌溉施肥装备领域,主流的技术路线主要依托于PID反馈控制理论及相关改进算法,并通过引入物联网等新一代信息技术手段,建立起远程化、智能化的监控与管理模式。李晓晓[3]采用模糊PID控制器,设计了一种基于PLC控制的水肥一体化试验系统。通过对系统分析,在建立EC调控模型基础上运用MATLAB进行建模仿真。仿真结果显示,模糊PID控制比传统PID超调量和到达稳态时间有明显改善。李帅帅等[4]将参数自整定模糊PID控制引入Smith预估当中,缓解了滞后时间对控制系统的影响并对模型的精确性进行了补偿。崔迎港等[5]系统采用具有自适应特性的SOA算法,智能优化模糊PID控制器的量化因子、比例因子,完成对系统中各项参数的自适应调整,在一定程度上解决了传统方法参数整定困难的问题。王永涛等[6]构建了基于PSO优化FuzzyPID的营养液EC值调控模型并引入Smith预估当中,有效解决了非线性、时变性和滞后性等问题。赵泽能等[7]基于鲸鱼优化算法优化模糊PID调控本地端电动球阀开度进而精确控制水肥溶液电导率(Electrical Conductivity, EC),实现远程控制电导率至设定范围。朱德兰等[8]基于物联网技术,将自整定模糊PID控制算法引入远程开发者服务终端中,并对本地端PID和远程端模糊PID控制算法进行了对比试验验证。结果显示,目标EC越大,稳态EC越精确,但稳态时间和超调量均增大。

综上所述,模糊PID控制已成为水肥系统的主流技术,但传统智能算法在优化控制参数时存在效率低、易陷入局部最优等问题,Smith预估器虽能有效补偿时滞,但其与新型智能算法的深度融合尚处探索阶段,且多数研究局限于本地控制,难以满足现代农业规模化、智慧化的管理需求。本文利用蚁群优化重采样算法(Ant colony optimization resampling algorithm, ACOR)优化模糊PID参数,提高寻优效率;结合

Smith 预估器补偿系统时滞; 并构建基于物联网的远程监控平台, 实现水肥 EC 值的云端决策与调控。

2. 营养液浓度调控方法

2.1. 营养液浓度调控原理

营养液浓度调控本质上是一个典型的浓度控制问题, 涉及流体输送、负压吸肥、管路混合、罐体搅拌、浓度调节、酸碱平衡等多个物理环节, 表现出显著的非线性、时变性和滞后性特征。营养液浓度调控流程如图 1 所示。

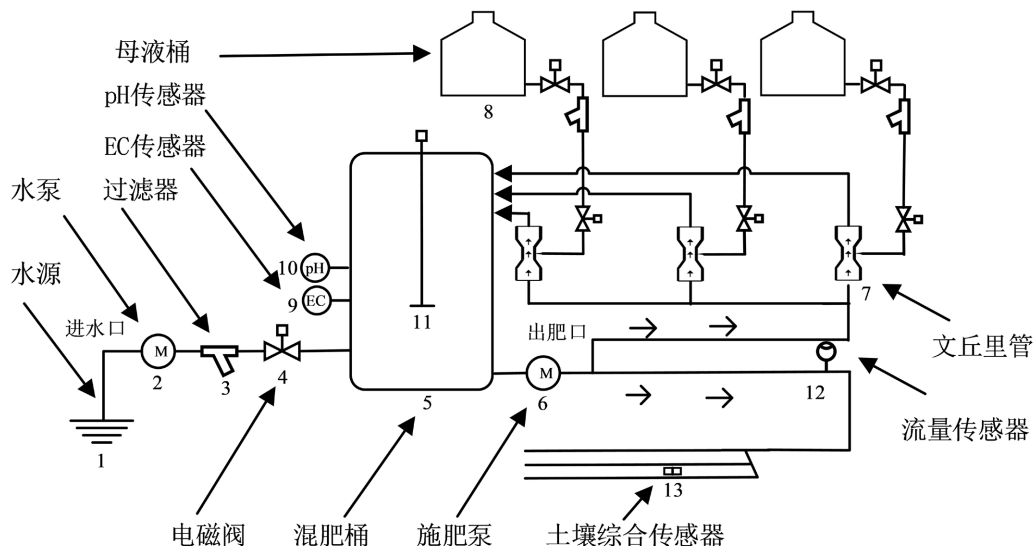


Figure 1. Schematic diagram of nutrient solution regulation process
图 1. 营养液调控流程示意图

图 1 中, 水泵从水源抽取灌溉水, 经过滤器净化后由电磁阀调控流量进入文丘里管。文丘里管利用伯努利效应在喉部形成负压区, 当电磁阀开启后, 母液在压差作用下被吸入主管路。调节电磁阀 PWM 占空比可精确控制母液吸入速率, 实现水肥初级混合。稀释后的营养液流入混肥桶进行二级混合, 搅拌电机消除浓度梯度。EC 传感器和 pH 传感器实时反馈营养液状态, 控制系统根据偏差信号调节母液和酸碱液流量, 经多轮迭代使 EC 和 pH 同时稳定在设定范围内。与此同时, 埋设于种植区的土壤综合传感器持续采集土壤湿度及电导率参数, 并将数据实时上传至控制系统。控制系统依据土壤参数的动态变化, 自适应调整灌溉启停时机与单次灌溉量, 实现按需灌溉。

2.2. EC 调控模型

电导率 EC 是营养液离子浓度的综合反映指标, 其调节过程涉及母液输入、管道输送、混合扩散等多个环节。本文基于物料平衡原理建立电导率调节过程的动态数学模型, 并采用阶跃响应法辨识传递函数参数。

(1) 物料平衡方程

混肥桶内电导率 EC 值的变化取决于母液的输入与稀释液的混合过程。设混肥桶容积为 V , 母液浓度为 EC_c , 母液流量为 Q_e , 桶内当前电导率 EC_0 根据物料守恒定律, 系统的微分方程为[9]:

$$V \frac{dEC(t)}{dt} = Q_e (EC_c - EC_0) \quad (1)$$

对(1)式进行拉普拉斯变换, 可得 EC 调节过程的理想一阶传递函数。然而, 实际系统中存在文丘里管吸液过程、管道输送延迟以及混肥桶内扩散混合等因素, 导致系统呈现出带纯滞后的高阶特性。综合考虑上述因素, 采用带纯滞后的二阶模型描述 EC 调节过程[10]:

$$G_{EC}(s) = \frac{K_{EC}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} = e^{-\theta s} \quad (2)$$

式中: K_{EC} 为稳态增益, 反映母液流量对 EC 值的影响程度, 单位为(mS/cm)/(L/min);

τ_1 为主时间常数, 表征混肥桶混合过程的惯性, 单位为 s; τ_2 为副时间常数, 反映文丘里管吸液和管道输送的次要惯性环节, 单位为 s; θ 为纯滞后时间, 包括管道输送延迟和初始混合延迟, 单位为 s。

(2) EC 传递函数参数辨识

为辨识式(2)中的系统参数 K_{EC} 、 τ_1 、 τ_2 、 θ , 采用阶跃响应曲线特征参数法。该方法通过提取系统阶跃响应的关键特征点反推传递函数参数, 具有物理意义明确、计算简便的优点。基于所设计的水肥混配系统, 设定系统参数如下: 混肥桶容积 $V = 10$ L, 营养液初始 EC 值 $EC_0 = 0.5$ mS/cm。在 $t = 0$ 时刻对系统施加阶跃输入, 即文丘里管母液流量 $Q_e = 0.2$ L/min, EC 传感器以 5 s 为采样周期记录 180 s 内 EC 值的动态变化, 所得阶跃响应曲线如图 2 所示。

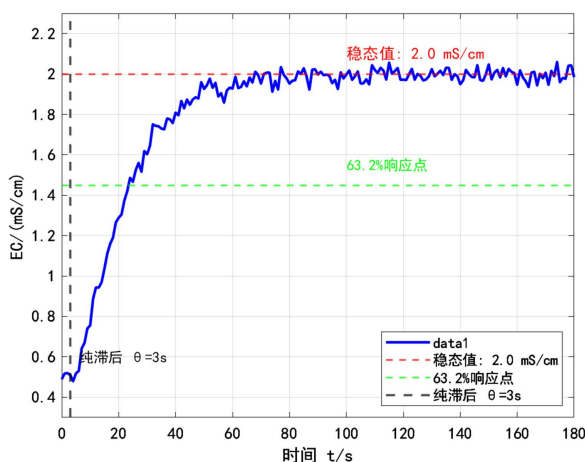


Figure 2. EC step response curve

图 2. EC 阶跃响应曲线

根据图 2 所示的阶跃响应曲线, 采用特征点法提取传递函数参数:

1) 稳态值辨识

取响应曲线末端(最后 10 个采样点)的平均值作为系统稳态 EC 值。由图 2 可知, 系统稳态 EC 值 $EC_s = 2.0$ mS/cm。

2) 纯滞后时间 θ 辨识

定义为从阶跃输入施加时刻到 EC 值开始明显变化(超过初始值 $\pm 5\%$ 变化量)的时间间隔。设定判断阈值为:

$$EC_{\text{threshold}} = EC_0 + 0.05 \times (EC_s - EC_0) = 0.5 + 0.05 \times 1.5 = 0.575 \quad (3)$$

EC 值首次超过该阈值的时刻即为纯滞后时间, 辨识得 $\theta = 3$ s。该延迟主要由管道输送和混肥桶初始扩散构成。

3) 稳态增益 K_{EC} 辨识

$$K_{EC} = \frac{(EC_s - EC_0)}{Q_e} = \frac{(2.0 - 0.5)}{0.2} = 7.5 \quad (4)$$

4) 主时间常数 τ_1 辨识

根据控制理论, 系统达到稳态值 63.2%所需时间可用于估算时间常数。计算 63.2%响应点对应的 EC 值:

$$EC_{63.2\%} = EC_0 + 0.632 \times (EC_s - EC_0) = 0.5 + 0.632 \times 1.5 = 1.448 \quad (5)$$

从曲线中读取 EC 首次达到该值的时刻为 $t_{63.2\%} = 24 \text{ s}$, 对于二阶系统, 主时间常数 τ_1 可通过特征点时间近似估算为:

$$\tau_1 \approx \frac{t_{63.2\%} - \theta}{k_{adj}} = \frac{21}{1.5} = 14 \quad (6)$$

5) 副时间常数 τ_2 辨识

映文丘里管吸液和管道输送的次要惯性。根据曲线初期斜率变化特征, 对于水肥混配系统 τ_2 通常约为 τ_1 的 1/3, 辨识得到 $\tau_2 \approx 5 \text{ s}$ 。

综上, 利用 MATLAB System Identification 工具箱对实验数据进行二阶加纯滞后模型拟合, 得到 EC 调节过程传递函数为:

$$G_{EC}(s) = \frac{7.5}{(15s+1)(5s+1)} e^{-3s} \quad (7)$$

(3) 模型验证

将辨识所得传递函数代入 MATLAB 进行仿真, 与实验数据对比验证模型准确性。采用拟合优度 R^2 和均方根误差 RMSE 作为评价指标, 验证结果如图 3 所示。

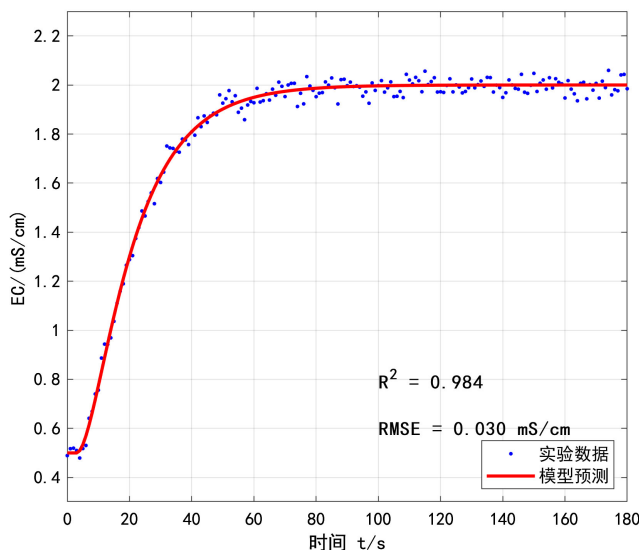


Figure 3. Validation of the EC transfer function model
图 3. EC 传递函数模型验证

3. 控制器设计

考虑到 EC 值与 pH 值的调控执行机构相互独立, 且 pH 变化在常规工况下相对有限, 本文将研究重

点聚焦于 EC 值的精准调控, pH 调节作为独立辅助回路不在本文讨论范围内。

营养液 EC 值调控具有非线性、强耦合和大时滞特性。经典 PID 和模糊 PID 算法因适应性强、鲁棒性好而广泛应用于水肥一体化系统。本文分别介绍经典 PID 和模糊 PID 控制算法的基本原理及其在营养液调节系统中的应用。

3.1. PID 与模糊 PID

PID 控制器由比例(Proportional)、积分(Integral)、微分(Derivative)三个环节组成, 是工业控制中应用最广泛的控制算法。比例环节快速响应当前偏差, 减小系统稳态误差; 积分环节消除系统累积误差, 提高控制精度; 微分环节预测偏差变化趋势, 改善系统动态特性。其结构如图 4 所示[11]。

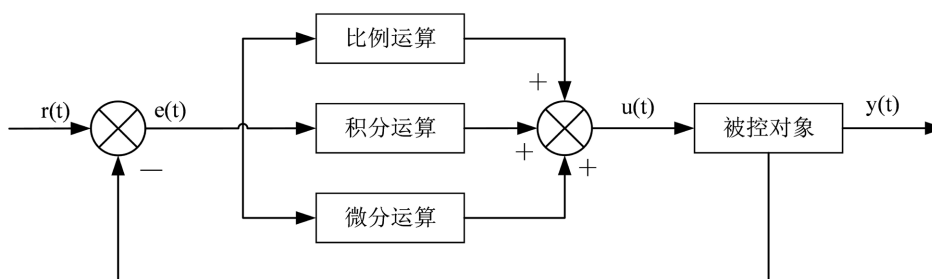


Figure 4. PID control structure diagram

图 4. PID 控制结构图

PID 控制器的时域表达式为[12]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(x) dx + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

式中: $u(t)$ 为控制器输出; $e(t)$ 为偏差信号; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。

PID 控制器的传递函数形式为:

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

式中: K_p 为比例增益; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数;

由于经典 PID 控制器参数固定, 难以适应营养液 EC 系统的非线性、时变性特性, 控制品质欠佳。模糊 PID 算法在 PID 基础上引入模糊推理机制, 通过在线自适应调整控制参数, 有效提升了系统的鲁棒性和控制精度。

模糊 PID 控制器将设定值与实测值的偏差 e 及偏差变化率 ec 作为输入, 经量化因子 K_e 、 K_{ec} 调整后输入至模糊推理模块。经模糊规则匹配与推理计算得出 PID 参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 再经比例因子 K_1 、 K_2 、 K_3 解模糊后与 PID 初始值叠加, 完成参数的实时整定, 整定过程可用式(10)表示[13]:

$$\begin{cases} K_p = K_1 \cdot \Delta K_p + K_{p0} \\ K_i = K_2 \cdot \Delta K_i + K_{i0} \\ K_d = K_3 \cdot \Delta K_d + K_{d0} \end{cases} \quad (10)$$

模糊 PID 控制器的性能取决于隶属度函数、模糊论域、模糊规则、量化因子和比例因子等结构参数的合理设定。本文基于 MATLAB 的 Fuzzy Logic Designer 工具箱进行模糊控制器设计, 并设计了基于 EC 回路的模糊 PID 控制器。模糊 PID 控制结构图如图 5 所示[14]。

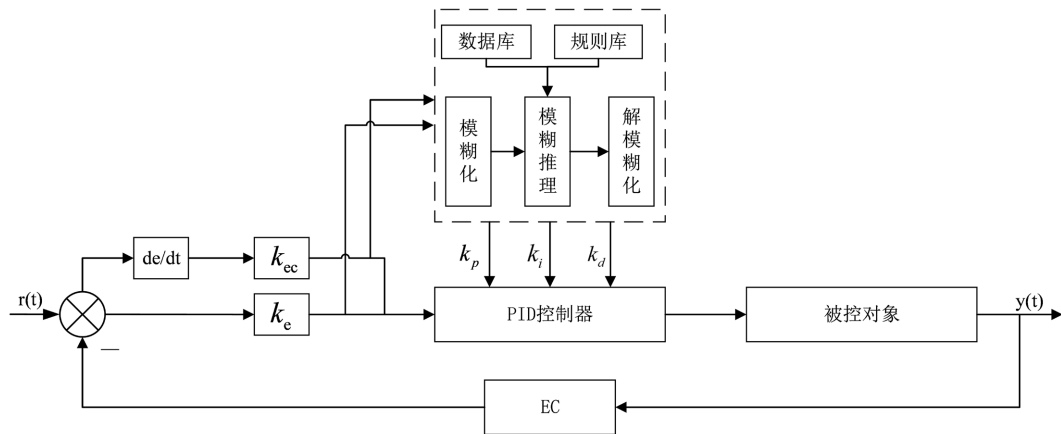


Figure 5. Structure diagram of fuzzy PID control
图 5. 模糊 PID 控制结构图

(1) EC 值模糊 PID 控制设计

植物对营养液电导率 EC 值的需求因品种和生育期而异, 一般而言, 蔬菜和果树等经济作物的适宜 EC 值范围为 1.5~3.0 mS/cm [15]。考虑到实际应用中 EC 值的波动范围, 本文将模糊论域设定为[-3, 3], 基本论域设定为[-1, 1]。根据模糊化原理, 偏差 e 和偏差变化率 ec 的量化因子计算公式为:

$$K_e = K_{ec} = \frac{3}{1} = 3 \tag{11}$$

隶属度函数是模糊控制系统实现模糊化映射的数学基础, 其作用在于量化输入变量在各模糊语言集合中的归属程度。经多组对比实验验证, 当偏差处于边界区域[-3, -2]和[2, 3]时, 采用梯形隶属度函数以增强边界响应的稳定性; 当偏差处于中心区域[-2, 2]时, 采用三角形隶属度函数以保证控制灵敏度。基于 Mamdani 模糊推理机制构建的 EC 值模糊 PID 控制器结构如图 6 所示。

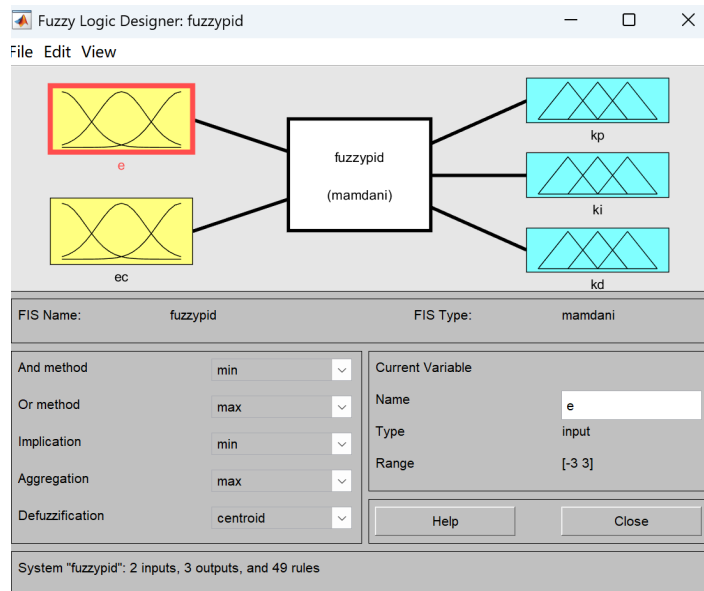


Figure 6. Structure diagram of EC value fuzzy PID controller
图 6. EC 值模糊 PID 控制器结构图

在 EC 模糊控制子集的构建过程中, 本研究针对各输入输出参数在其论域范围内划分了 7 级模糊等级, 采用的模糊语言变量包括: NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。EC 模糊控制规则如表 1 所示[16]。

Table 1. EC fuzzy control rule table
表 1. EC 模糊控制规则表

$K_p/K_i/K_d$	$\Delta E/\Delta t$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/NB	PM/ZO/PS	PB/PM/NM	PM/NM/NB	PB/PM/NM	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO
NM	PB/NB/NB	PM/ZO/ZO	PB/PB/PS	PS/NS/NM	PB/PM/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PB/NB/NB	PM/ZO/ZO	PB/PB/PS	ZO/NS/NM	PB/PB/NM	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
E	ZO	PB/NB/NB	PS/NB/NS	PB/PB/ZO	ZO/ZO/NS	PB/PB/ZO	NS/PM/NS
	PS	PB/NB/NB	PS/ZO/ZO	PB/PB/PM	NM/ZO/NS	PB/PB/NM	PM/PM/PS
	PM	PB/NB/NB	NB/ZO/PB	PB/PB/ZO	ZO/PS/ZO	PB/PB/NB	NM/PS/NM
	PB	PB/NB/NB	ZO/ZO/PM	PB/PB/NB	NS/PS/PM	PB/PB/NB	NB/PS/NB

基于上述设计原则, 本文构建了包含 49 条规则的模糊控制规则表。EC 模糊规则界面如图 7 所示。

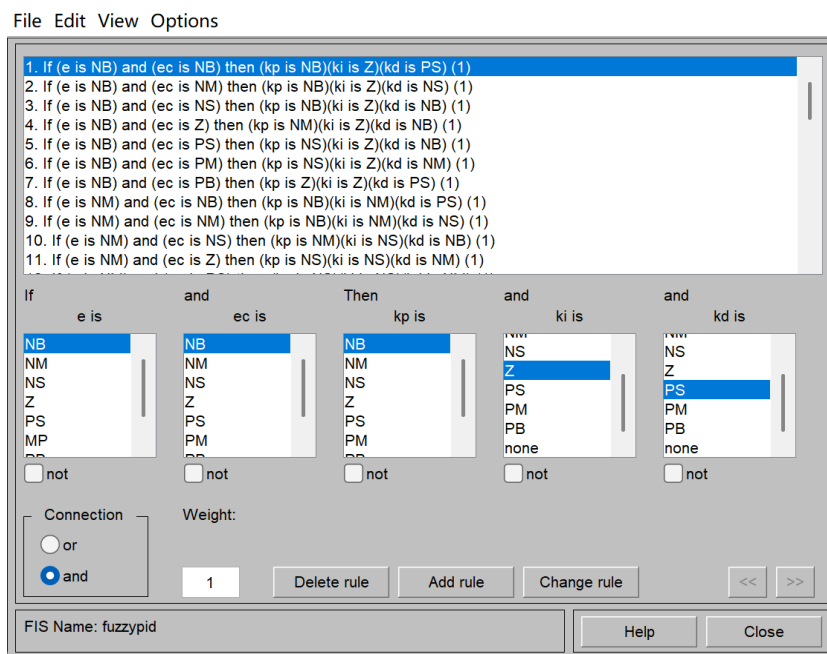


Figure 7. Structure diagram of fuzzy PID controller for EC value
图 7. EC 值模糊 PID 控制器结构图

3.2. 模糊 PID 算法参数优化

蚁群连续优化算法是一种将离散蚁群算法扩展至连续域的智能优化方法, 由 Socha 和 Dorigo 于 2008 年提出。ACOR 通过构建解档案和高斯概率分布模型, 实现了连续空间的高效寻优。

ACOR 算法的主要步骤如下[17]:

(1) 初始化解档案, 随机生成 k 个解向量及其适应度值, 并按适应度从优到劣排序:

$$S = \{(X_1, f_1), (X_2, f_2), \dots, (X_k, f_k)\} \quad (12)$$

其中, $X_l = (x_{l1}, x_{l2}, x_{l3}, \dots, x_{ld})$ 为第 l 个解向量, $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_k$, 排名越靠前表示解的质量越好。

(2) 计算档案中每个解的权重:

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}\right), l=1, 2, \dots, k \quad (13)$$

其中, q 为收敛速度参数, 通常取 0.01~1 之间的值, q 越小收敛越快。

(3) 归一化权重, 计算每个解被选中的概率:

$$p_l = \frac{\omega_l}{\sum_{m=1}^k \omega_m} \quad (14)$$

(4) 生成 m 只蚂蚁的新解。对于每只蚂蚁的第 d 维, 按照概率分布选择档案中的一个解, 并从高斯分布中采样生成新解:

$$x_{new,d} \sim N(\mu_d, \sigma_d^2) \quad (15)$$

其中, 均值 $\mu_d = x_{ld}$, 标准差为:

$$\sigma_d = \xi \cdot \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k |x_{nd} - x_{ld}| \quad (16)$$

其中, ξ 为局部搜索参数, 通常取 0.85。

(5) 计算所有新解的适应度值, 将新解与档案中的解合并排序, 保留前 k 个最优解更新档案。

(6) 判断是否达到最大迭代次数, 如果是, 则输出档案中的最优解及其适应度值, 算法结束; 如果否, 则返回步骤(2)继续迭代。

在本文中, 档案大小 $k=30$, 蚂蚁数量 $m=30$, 收敛速度参数 $q=0.1$, 局部搜索参数 $\xi=0.85$, 最大迭代次数为 100 次。

此外, ACOR 算法在优化模糊 PID 参数时, 需要定义明确的性能指标(目标函数)以评价控制效果。本研究采用时间加权绝对误差积分(ITAE)准则作为优化目标函数, 其数学表达式为[6]:

$$J = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (17)$$

式中: $e(t)$ 为系统偏差信号, t 为时间变量。选用 ITAE 准则的合理性在于:

1) 通过时间加权因子 t 的引入, 该准则对系统响应后期的持续偏差施加更大惩罚, 有利于缩短调节时间并抑制稳态振荡;

2) 相较于 ISE (积分平方误差)和 IAE (积分绝对误差)准则, ITAE 准则在兼顾快速性与平稳性方面表现更优, 能够有效避免参数优化过程中出现大超调或长尾振荡现象;

3) ITAE 准则的最优解对应的闭环系统阶跃响应具有单调衰减特性, 与水肥 EC 值调控对平稳过渡的工程需求高度契合。ACOR 算法以最小化 J 值为优化目标, 在连续参数空间中搜索模糊 PID 控制器的量化因子与比例因子的最优组合。

3.3. Smith 预估器时滞补偿

在配肥控制系统中, 由于物料输送管路长度、传感器响应、数据处理等环节存在时间延迟, 系统呈

现纯滞后特性。纯滞后会降低控制系统的稳定裕度, 导致响应速度变慢、超调增大, 严重时甚至引起系统振荡。为改善滞后对控制性能的不利影响, 本文引入 Smith 预估器进行滞后补偿。

Smith 预估器是一种经典的纯滞后补偿策略, 通过在控制回路中引入滞后预估模型, 提前预测被控对象的输出响应, 从而有效消除滞后对控制性能的不利影响。Smith 预估器的结构框图如图 8 所示[18]。

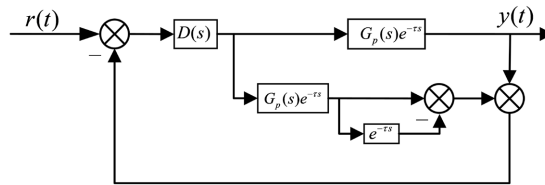


Figure 8. Basic principle diagram of multi-channel thermal flow method
图 8. 纯滞后补偿控制等效结构图

补偿前的纯滞后系统闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{D(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)e^{-\tau s}} e^{-\tau s} \quad (18)$$

补偿后, $e^{-\tau s}$ 项在闭环回路之外, 不再影响系统的稳定性, 从而有效改善控制性能。

3.4. 改进的模糊 PID 算法

本文将智能优化算法与 Smith 预估器相结合, 构建改进的模糊 PID 控制器。改进后的控制系统采用智能优化、模糊自适应、时滞补偿的三层递进结构。改进的模糊 PID 控制器结构如图 9 所示。

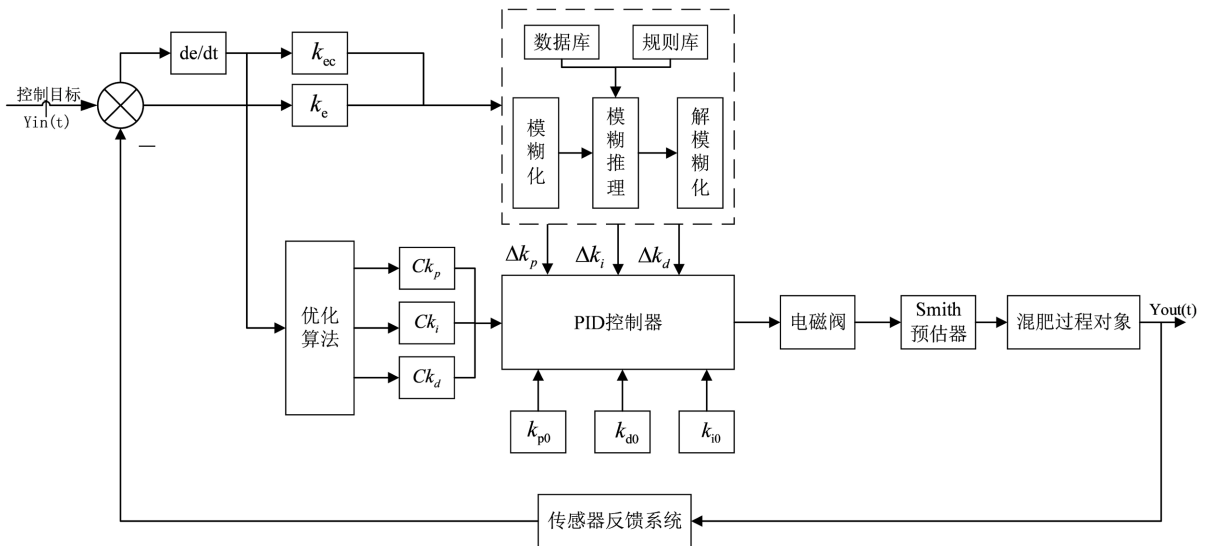


Figure 9. Equivalent structure diagram of pure delay compensation control
图 9. 改进的模糊 PID 控制器结构图

由图 9 可知, 系统首先通过误差计算环节获取设定目标值与反馈信号的偏差 e 及其变化率 ec , 这两个信号经量化因子 K_e 、 K_{ec} 调整后输入至模糊控制器。模糊控制器根据数据库中存储的隶属度函数与控制规则库进行模糊推理, 输出 PID 三个参数的调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 再经比例因子 K_1 、 K_2 、 K_3 解模糊后输出给 PID 控制器。在与 PID 初始值 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 相加后, 完成对 K_p 、 K_i 、 K_d 的实时整定

并输出控制信号 $u(t)$ 。EC 回路通过 PWM 电磁阀调节文丘里混肥器的母液吸入流量。为补偿配肥系统固有的大时滞特性, 控制回路中嵌入 Smith 预估器, 通过预测模型提前进行补偿调节。最终控制信号驱动电动阀作用于被控对象, 输出 $Y_{out}(t)$ 经传感器反馈形成闭环控制。

4. 营养液浓度调控模型仿真结果与分析

4.1. 仿真模型参数设置

使用 MATLAB 2022b/Simulink 建立控制器仿真模型如图 10 所示。该模型采用对比验证结构, 分为上下两部分: 上部分为 PID 和模糊 PID 对照组, 下部分为经 ACOR 算法优化的 Smith-Fuzzy + PID 实验组。

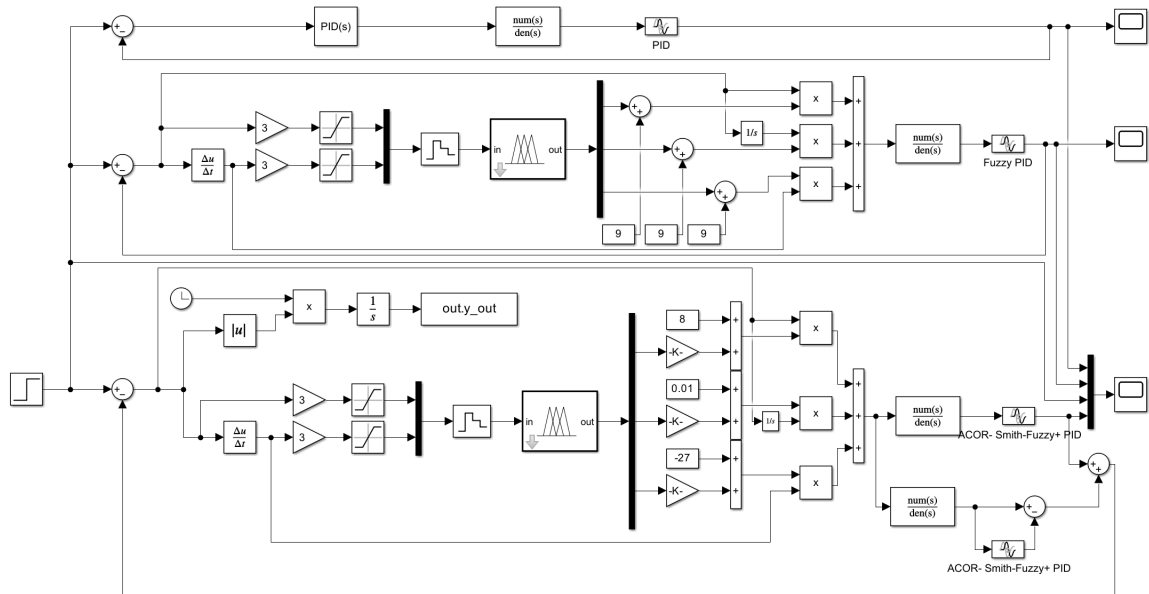


Figure 10. Simulink simulation model
图 10. Simulink 仿真模型

4.2. EC 调控模型仿真结果与分析

建立 MATLAB 主程序和目标函数程序, 通过与 Simulink 控制器模型的联合仿真, 实现对模糊 PID 控制器量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_1 、 K_2 、 K_3 的智能优化。比例因子迭代曲线如图 11 所示。

由图 11 可知, ACOR 算法的参数演化曲线呈现持续优化的全局搜索特征。参数 K_1 、 K_2 、 K_3 在整个迭代过程中保持稳定下降趋势, 前 30 次迭代呈现近似线性下降, 无任何振荡现象。 K_1 从 4.0 缓慢但稳定地降至 3.05, K_2 从 0.56 降至 0.38, K_3 从 8.2 降至 6.0。前 30 次迭代完成初步优化(降幅约 22%~25%), 但算法并未停止搜索, 而是持续优化至 62 次迭代才达到全局最优。最终参数值为: $K_1 = 2.48$, $K_2 = 0.32$, $K_3 = 4.58$ 。

将优化 PID 参数植入 Smith 预估补偿系统, 与传统 PID、模糊 PID 对比仿真分析, 结果见图 12 所示。

由图 12 可知, 相同目标 EC 值条件下, ACOR-Smith-Fuzzy + PID 控制的系统稳定时间约为 45 秒, 超调量较小, 且在 100 秒处施加 20%外部干扰后, 系统能迅速恢复并重新稳定, 抗扰动能力最强, EC 值稳定在 2.4~2.6 mS/cm 之间; 而模糊 PID 控制的系统稳定时间约为 65 秒, 超调量有所增大, 受到 20%干

扰后出现一定波动但仍能较快恢复, EC 值稳定在 2.3~2.6 mS/cm 之间; 相比之下, 传统 PID 控制的稳定时间约为 130 秒, 超调量最大, 受扰后响应迟缓、恢复时间最长, EC 值稳定在 2.3~2.7 mS/cm 之间, 且存在较大波动。

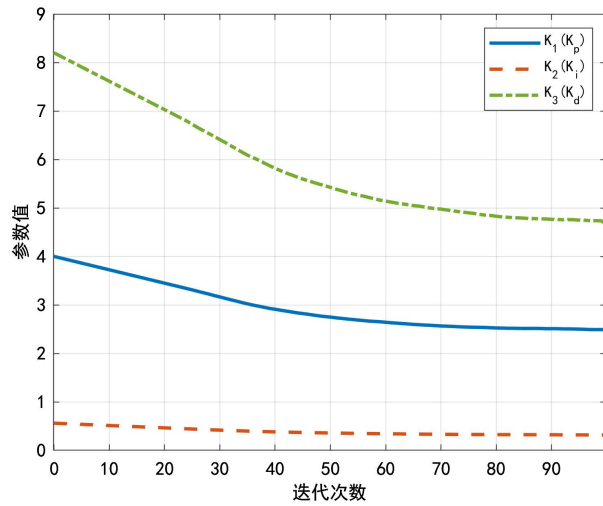


Figure 11. Scale factor iteration curve
图 11. 比例因子迭代曲线

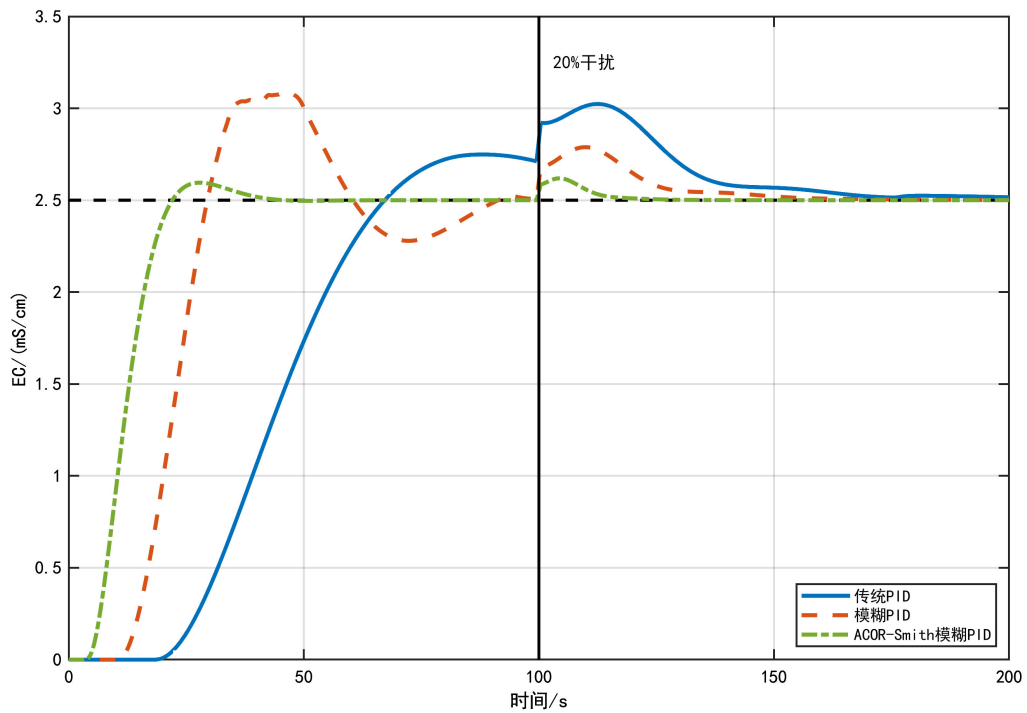


Figure 12. Comparison of simulation results
图 12. 仿真结果对比

4.3. 系统测试

(1) 测试平台搭建

测试平台采用 GD32F470IIH6 核心板作为主控单元。核心板通过扩展接口与各功能模块连接：RS485 接口连接 EC 传感器、pH 传感器和土壤综合传感器；PWM 输出接口通过 BTS7960 驱动模块连接直流水泵；串口连接 ESP8266 WiFi 模块实现远程通信。执行机构采用卡默尔 KLP40 直流水泵与 SSQ-250 文丘里管组合，用于 EC 调节(吸取母液)。传感器采集的 EC 值、pH 值数据经滤波处理后送入控制算法模块，计算得到的控制量转换为 PWM 信号驱动相应水泵。水肥控制试验平台实物如图 13 所示。



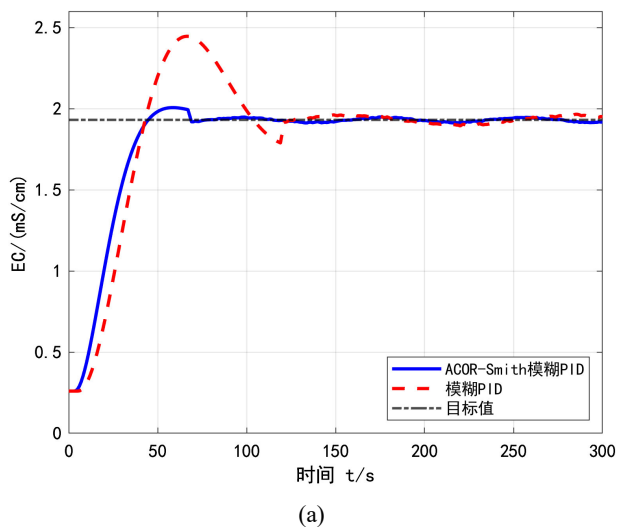
Figure 13. Water and fertilizer control test Platform
图 13. 水肥控制试验平台

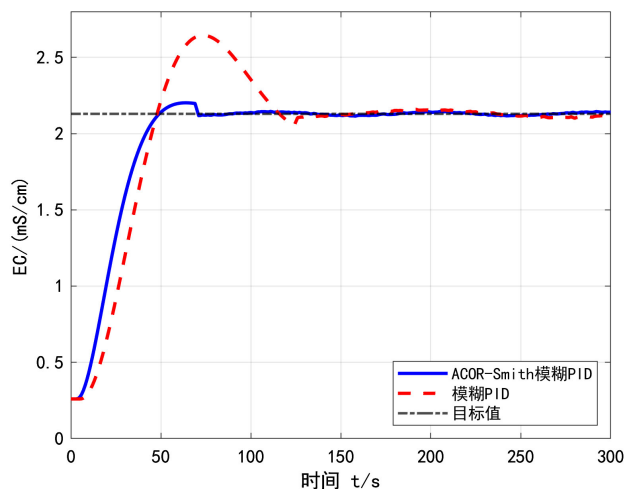
(2) 测试条件与方案

测试中开启一路混肥通道，采用氮磷钾比例为 15:15:15 的全水溶复合肥作为母液，其电导率为 20 mS/cm；取用电导率为 0.26 mS/cm 的灌溉水进行混肥。分别使用模糊 PID 算法和 ACOR-Smith-Fuzzy + PID 算法对营养液中的 EC 值进行调控，验证改进算法的有效性。

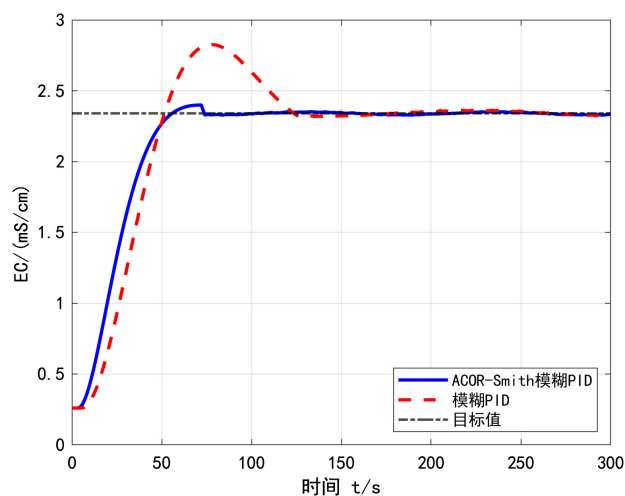
(3) EC 调控测试

将目标 EC 值分别设定为 1.93 mS/cm、2.13 mS/cm、2.34 mS/cm，两种控制算法的实验对比结果如图 14 所示，实验相关数据如表 2~4 所示。





(b)



(c)

Figure 14. Mixed fertilizer control under different target EC values. (a) Target value 1.93 mS/cm; (b) Target value 2.13 mS/cm; (c) Target value 2.34 mS/cm

图 14. 不同目标 EC 值下混肥控制实验。(a) 目标值 1.93 mS/cm; (b) 目标值 2.13 mS/cm; (c) 目标值 2.34 mS/cm

Table 2. Experimental data at EC target value of 1.93 mS/cm

表 2. EC 目标值 1.93 mS/cm 的实验数据

模型	稳态时间	稳态误差	超调量
ACOR-Smith-Fuzzy + PID	68.5 s	±0.04 mS/cm	6.8%
模糊 PID	122.3 s	±0.07 mS/cm	24.2%

Table 3. Experimental data at EC target value of 2.13 mS/cm

表 3. EC 目标值 2.13 mS/cm 的实验数据

模型	稳态时间	稳态误差	超调量
ACOR-Smith-Fuzzy + PID	70.2 s	±0.05 mS/cm	5.3%
模糊 PID	125.6 s	±0.09 mS/cm	17.5%

Table 4. Experimental data at EC target value of 2.34 mS/cm
表 4. EC 目标值 2.34 mS/cm 的实验数据

模型	稳态时间	稳态误差	超调量
ACOR-Smith-Fuzzy + PID	72.8 s	±0.04 mS/cm	4.1%
模糊 PID	128.5 s	±0.08 mS/cm	12.8%

由图 14 和表 2~4 可知, 在目标值设定为 2.34 mS/cm 时, ACOR-Smith-Fuzzy + PID 相对于模糊 PID 调节时间下降了 43.3%, 稳态误差缩小了 50.0%, 超调量降低 68.0%。在其他两组对照实验中, ACOR-Smith-Fuzzy + PID 算法在所有目标 EC 值的调节上同样明显优于模糊 PID 算法, 说明设计的配肥控制模型可以较好地满足不同营养液 EC 浓度的制备需求。

5. 结论

本文针对水肥一体化系统中营养液 EC 值控制存在的非线性、时变性和大时滞等问题, 设计了基于 ACOR 优化模糊 PID 的控制策略, 通过远程控制水肥系统对水肥浓度 EC 值进行调控, 实现了营养液 EC 值的精准调控, 具有一定的实用价值。

(1) 建立了二次混肥系统的混肥过程数学模型, 在考虑输运时滞的基础上设计了一种基于 ACOR-Smith-Fuzzy + PID 的控制策略。其中, ACOR 用于优化模糊 PID 参数与隶属度/规则, Smith 预估器用于时滞补偿, 构成面向水肥 EC 值的复合控制框架。

(2) 在 MATLAB/Simulink 平台开展对比仿真。结果表明: 所提方法能有效抑制时滞引起的超调与振荡, 系统响应更快、稳态精度更高。ACOR-Smith-Fuzzy + PID 相对于模糊 PID 调节时间下降了 43.3%, 稳态误差缩小了 50.0%, 超调量降低 68.0%。

(3) 基于 GD32 微控制器搭建 EC 值调控测试平台, 完成 LCD 监控界面与移动端远程控制的软硬件实现。实验运行稳定, 能够将溶液 EC 精确维持在设定范围内, 验证了该策略的工程可行性与可靠性。

(4) 本文目前主要聚焦于 EC 值的单变量控制, 在高浓度配肥或多组分混合等复杂工况下, EC 与 pH 之间的耦合效应值得进一步关注。后续研究将在此基础上构建 EC-pH 双变量协同控制模型, 引入多变量解耦或多目标优化方法, 以满足精准农业对营养液全参数管控的更高需求。

基金项目

江苏理工学院研究生实践创新计划。项目名称: 冷链车冷藏多温区监控系统研究; 项目编号: XSJXC24_61。

参考文献

- [1] 宋生辉. 坚持藏粮于地藏粮于技强化粮食和重要农产品稳定供给[J]. 中国粮食经济, 2024(2): 9-11.
- [2] 杨发展, 卞东超, 李维华, 等. 智能水肥一体化技术与装备的研究现状与发展趋势[J]. 农业科学, 2020, 10(7): 419-425.
- [3] 李晓晓, 宋健, 魏文庆. 基于模糊 PID 控制的水肥一体化实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(9): 108-111.
- [4] 李帅帅, 李莉, 穆永航, 等. 基于 Fuzzy-Smith 控制器的营养液 pH 值调控系统研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 347-352+393.
- [5] 崔迎港, 徐晓辉, 宋涛, 等. 基于 SOA 优化模糊 PID 的水肥控制系统研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 60-67.
- [6] 王永涛, 刘坚, 李家春, 等. 基于 Smith PSO-Fuzzy PID 的营养液 EC 值调控模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2022,

- 41(11): 37-44.
- [7] 赵泽能, 许敏界, 华珊, 等. 基于 WOA 优化模糊 PID 的设施智能水肥系统设计与实现[J]. 节水灌溉, 2023(9): 64-70.
- [8] 朱德兰, 阮汉钺, 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.
- [9] 王璐, 王应彪. 基于模糊 PID 控制的水肥一体化设备的设计[J]. 农机使用与维修, 2023(4): 4-7.
- [10] 王雪鹏. 基于物联网的水肥一体化系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2024.
- [11] 夏文豪, 程慧, 杜鳌, 等. 基于模糊 PID 控制的水肥一体化研究[J]. 塔里木大学学报, 2024, 36(1): 67-74.
- [12] 闫齐凯, 王浩磊, 刘洋, 等. 农业机械智能水肥一体化控制系统设计研究[J]. 粮油与饲料科技, 2025(4): 177-179.
- [13] 兆庆, 金辉, 李文磊, 等. 智能水肥一体化控制技术的设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 233-238.
- [14] 张瑜, 刘玉红, 扎西顿珠, 等. 不同营养液浓度对水培生菜生长的影响[J]. 西藏农业科技, 2020, 42(1): 54-56.
- [15] 熊钦, 肖丽萍, 蔡金平, 等. 基于物联网的果园药设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 73-81.
- [16] 张熙, 吴轲, 钟启濠. 改进蚁群算法的电网无功补偿装置落点优选[J]. 信息技术, 2026(2): 187-191+197.
- [17] 丁筱玲, 王克林, 李军台, 等. 基于 BAS-Smith-Fuzzy PID 的物联网水肥控制系统研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 240-247.
- [18] 石俊超, 郑威强, 张立萍, 等. 基于改进型 Smith 预估算法的 EC 值调控系统仿真与分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(6): 756-763.