

基于改进型Smith预估算法的EC值 调控系统仿真与分析*

石俊超, 郑威强, 张立萍[†], 张文杰, 李魁夺
(新疆大学 智能制造现代产业学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 为使EC值调控系统更加稳定, 响应更快, 给实际EC值调控系统提供了一种可行策略. 针对EC值调控过程和特点, 建立并描述了具有二次混肥特性的EC值调控过程的二阶数学模型, 提出一种结合模糊PID和改进型Smith预估算法对调控过程进行控制, 用MATLAB软件中的Simulink模块对PID、模糊PID和改进型Smith控制算法进行阶跃响应跟踪实验和抗干扰测试实验并进行分析. 结果表明: 1) PID控制时系统超调量为13.068%, 到达稳态的响应时间为97 s, 加入干扰后恢复稳态的时间为168 s; 2) 模糊PID控制时系统超调量为6.989%, 到达稳态的响应时间为70 s, 加入干扰后恢复稳态的时间为138 s; 3) 改进型Smith控制时系统超调量为0.505%, 到达稳态的响应时间为57 s, 加入干扰后恢复稳态的时间为104 s.

关键词: 调控系统; 改进型Smith; 二次混肥; 阶跃响应; 抗干扰

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2023.09.20.0003

中图分类号: S126; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)06-0756-08

引文格式: 石俊超, 郑威强, 张立萍, 张文杰, 李魁夺. 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.

英文引文格式: SHI Junchao, ZHENG Weiqiang, ZHANG Liping, ZHANG Wenjie, LI Kuiduo. Simulation and analysis of EC value control system based on improved Smith prediction algorithm[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(6): 756-763.

Simulation and Analysis of EC Value Control System Based on Improved Smith Prediction Algorithm

SHI Junchao, ZHENG Weiqiang, ZHANG Liping, ZHANG Wenjie, LI Kuiduo

(School of Intelligent Manufacturing and Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: In order to make the EC value control system more stable and respond faster, a feasible strategy is provided for the actual EC value control system. Based on its regulation process and characteristics, a second-order mathematical model of EC value regulation process with secondary mixed fertilizer characteristics was established and described. A combination of fuzzy PID and an improved Smith prediction algorithm was proposed to control the regulation process. The Simulink module in MATLAB software was used to perform step response tracking experiments and anti-interference test experiments on the PID, fuzzy PID and improved Smith control algorithms. The results show that: 1) In PID control, the overshoot of the system is 13.068%, the response time to reach the steady state is 97 s, and the time to restore the steady state after adding interference is 168 s. 2) Fuzzy PID control system overshoot is 6.989%, the response time to reach steady state is 70 s, the time to restore steady state after adding interference is 138 s; 3) In the improved Smith control, the overshoot of the system is 0.505%, the response time to reach the steady state is 57 s, and the time to restore the steady state after adding interference is 104 s.

Key words: control system; improved Smith; secondary mixed fertilizer; step response; anti-interference

0 引言

肥料可以改变土壤的理化性质从而改善作物生长环境, 提高作物产量^[1-2], 因此, 在农业生产中肥料得以广泛使用. 但不科学的灌溉施肥方式会造成土壤水分浪费和养分沉积^[3], 最终降低作物产量, 破坏土壤环境^[4-6].

* 收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划重点研发专项“核桃采收后加工关键技术与装备研发”(2022B02028-4).

作者简介: 石俊超(1999—), 男, 硕士生, 从事精准施肥的研究, E-mail: 372986804@qq.com.

[†] 通讯作者: 张立萍(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事智慧农业的研究, E-mail: Zhlp@xju.edu.cn.

对作物的肥料浓度进行合理调节和分配可以促进作物对肥料的吸收和提高肥料的利用率,从而减少对环境的污染.作为一种现代农业技术,水肥一体化是将水与母液混合后利用灌溉系统输送至作物根部,可实现节水节肥增产^[7-9],提高灌溉施肥效率.

营养液电导率(EC值)在合适的范围内有利于作物的生长,常被用作判断营养液是否达到相关标准的关键指标^[10-11],对于作物的提质增产具有重要意义.营养液调控系统具有非线性 and 时滞性等问题^[12],若不改善将会影响系统的稳定性和响应速度. Moon等^[13]利用递归神经网络对无土培养根区营养液EC值进行预测,可实现营养液有计划的管理. Wu等^[14]用组合法(PID+模糊控制)对EC值进行控制,比PID算法控制更快、更准、更稳. Samsuri等^[15]通过调节流量注入时间调控EC值,结果显示系统的性能良好.不少研究者使用自动控制系统对营养液电导率进行调制,减少了营养物质的使用^[16-18],部分研究者通过构建并控制与EC值相关的模型从而实现了对营养液的调整^[19-22].根据以上研究可知,目前对营养液EC值的研究主要集中在两方面:控制方法和数学模型的研究.而对于控制方法的研究相对较多,其中模糊PID方法被广泛使用;对于时滞系统,Smith预估控制同样受到了研究者的广泛关注.许多学者提出将Smith预估器与一个或多个不同的控制算法相结合运用到不同的时滞模型中,使系统兼具几种算法的优点,提高稳定性和抗干扰能力^[23-28].也有学者提出对Smith预估算法进行改进,张磊等^[29]提出了一种改进型的Smith预估器的模糊控制策略,使系统鲁棒性得到明显提高.袁洪波等^[30]提出了一种基于增量式PID和增益自适应Smith预估器对EC值调控系统进行控制,该算法可快速、准确的实现营养液调控. Baskys^[31]提出用修改后的Smith算法控制响应延迟不对称的系统,通过模拟和实验,验证了所提方案的有效性和优越性.以上研究者提出的改进型Smith算法,一定程度上提高了系统的控制品质,但部分研究者所采用的被控对象模型不够明确,且改进后的算法也增加了控制过程的复杂性.

综上,针对营养液EC值调控系统的特点和实际调控的需求,本文对传统Smith算法结构进行改进,同时采用模糊PID算法与改进型Smith算法对系统进行控制,旨在缓解因系统的滞后环节产生的迟滞性并提高系统的稳定性,快速地达到所需营养液EC值.

1 调控系统结构及工作原理

调控系统设计的目的是根据作物的种类、生长需求进行精准灌溉和精量施肥,实现作物提质增收.调控系统由灌溉部分、水肥混合部分和控制中心组成.灌溉部分主要由水箱、过滤器、离心泵、止回阀等组成;水肥混合部分主要由母液罐、文丘里吸肥器、混肥桶、EC传感器、注肥泵、流量计、吸肥器进出口压力表、电磁阀等组成;控制中心主要由控制器、触摸屏组成.根据实际需求可对系统进行设置,实现自动灌溉施肥,调控系统结构如图1所示.

离心泵将过滤后的灌溉水注入混肥桶中,打开肥料母液注入通道的电磁阀,肥料母液在文丘里吸肥器的作用下通过管道注入混肥桶中,注肥泵将混肥桶中的溶液抽出,一部分流向文丘里吸肥器,一部分流向末端灌溉装置.控制中心将采集的水肥溶液信息与设定值进行比较,并对母液支路的电磁阀开度进行控制,直到调制出所期望EC值的水肥溶液.

对营养液的EC值进行调控,首先要了解其制备过程然后再进行分析.由于EC值调控过程中溶液混合和传感器采集信息时有一定的延迟,因此肥料母液和水充分混合并且达到期望值是动态过程,该过程具有一定的复杂性,如图2所示.

图2中的箭头方向为水流或营养液的流动方向,水持续不断地流向混肥桶中,注肥泵抽取混肥桶中的溶液为文丘里吸肥器提供吸肥动力,最后流向混肥桶中;肥料母液与水在文丘里吸肥器中进行第一次混合,在混肥桶中进行第二次混合,提高了水和母液的混合均匀性和水肥溶液的制备效率.

文丘里吸肥器作为水肥混合部分的关键部件之一,它的作用是吸取肥料母液并将水和母液进行混合,其结构简图如图3所示,主要由入口段、收缩段、喉部、扩大段、出口段组成^[32-33].

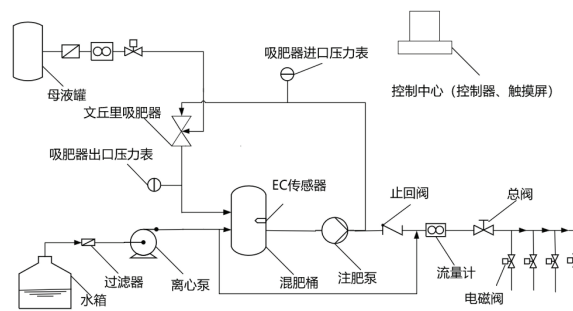


图1 调控系统结构图

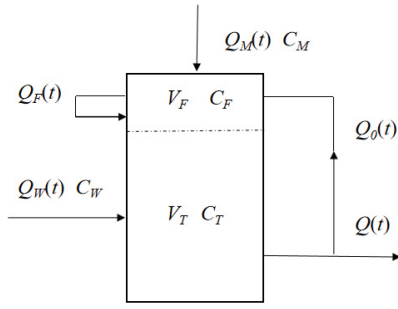


图 2 EC值调控过程

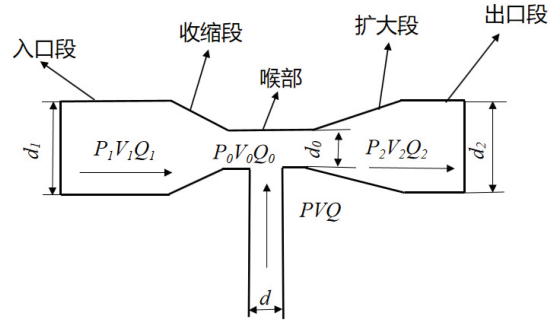


图 3 文丘里吸肥器结构简图

假设文丘里吸肥器内的液体均是不可压缩流体,不计任何压力损失,由伯努利方程和连续性方程可以得出文丘里吸肥器吸肥量的理论计算公式为^[34]:

$$Q = A \sqrt{-2g \left(h + \frac{P_0}{\gamma} \right)} \quad (1)$$

式中: Q 为吸肥量, L/s; A 为吸肥器吸肥口截面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为文丘里管中心线与母液罐的肥液面之间的距离, m; P_0 为吸肥器喉部压力, Pa; γ 为流体容重, N/m^3 。

文丘里吸肥器安装好后,其理论吸肥流量只与喉部压力有关,根据连续性方程可知,喉部压力和吸肥器吸肥时所通过的流量都与入口段的压力有关,因此需要保证入口段的压力大于一定值。

假定这两次混合过程互不影响,对两次混肥过程进行独立分析^[35]。首先是第一次混肥过程,根据物料守恒和体积守恒定律可知,达到动态平衡时可列出式(2)和式(3):

$$\frac{d[V_F(t)C_F(t+\tau)]}{dt} = Q_0(t)C_T(t) + Q_M(t)C_M - Q_F(t)C_F(t+\tau) \quad (2)$$

$$\frac{dV_F(t)}{dt} = Q_0(t) + Q_M(t) - Q_F(t) \quad (3)$$

式中: $V_F(t)$ 为文丘里吸肥器内的液体体积, 可视在混肥桶中增加的虚拟溶液体积, L; $C_F(t)$ 为文丘里吸肥器内的液体浓度, g/L; $Q_0(t)$ 为流入文丘里吸肥器的流量, L/s; $C_T(t)$ 为混肥桶内营养液的浓度, g/L; $Q_M(t)$ 为肥料母液注入流量, L/s; C_M 为肥料母液的浓度, g/L; $Q_F(t)$ 为文丘里吸肥器的流出流量, L/s; τ 为吸肥器中营养液混合的延迟时间, s。

第二次混肥过程,同理可得动态平衡时的方程:

$$\frac{d[V_T(t)C_T(t+\tau')]}{dt} = Q_W(t)C_W + Q_F(t)C_F(t) - (Q_0(t) + Q(t))C_T(t+\tau') \quad (4)$$

$$\frac{dV_T(t)}{dt} = Q_W(t) + Q_F(t) - Q_0(t) - Q(t) \quad (5)$$

式中: $V_T(t)$ 为混肥桶内营养液的体积, L; τ' 为混肥桶内营养液混合的延迟时间, s; $Q_W(t)$ 为流入混肥桶的灌溉水流量, L/s; C_W 为灌溉水的浓度, g/L; $Q(t)$ 为流向灌溉主管道的流量, L/s。假设吸肥器和混肥桶内的液体体积不变,即 $V_F(t)$ 和 $V_T(t)$ 均为常数,则联立式(2)~(5)可得式(6):

$$V_T(t) \frac{d[C_T(t+\tau')]}{dt} + Q(t)C_T(t+\tau') = Q_W(t)C_W + Q_M(t)C_M - V_F(t) \frac{d[C_F(t+\tau)]}{dt} \quad (6)$$

系统的执行机构为电磁阀,肥料母液注入流量 $Q_M(t)$ 可由与电磁阀开度相关的 $Q_{d100\%}N(t)$ 表示。 $Q_{d100\%}$ 表示电磁阀开度为100%时文丘里吸肥器的最大吸肥量, $N(t)$ 表示电磁阀的开度。由于电导率与溶液浓度成正比^[36],可由代表电导率的 E 代替代表溶液浓度的 C ,且灌溉水浓度相比于肥料母液浓度较小,可以忽略不记,则式(6)可写为:

$$V_T(t) \frac{d[E_T(t+\tau')]}{dt} + Q(t)E_T(t+\tau') = Q_{d100\%}N(t)E_M - V_F(t) \frac{d[E_F(t+\tau)]}{dt} \quad (7)$$

从而营养液调控过程的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Q_{d100\%} E_M Q_F}{V_F V_T s^2 + (V_F Q_W + V_F Q_F + V_T Q_F) s + Q Q_F} \quad (8)$$

综上, EC值调控过程具有非线性和时滞性的特点, 系统主要影响因素为灌溉主管道流量和肥料母液浓度.

2 调控方法

Smith预估控制一般应用于解决大滞后大惯性系统, 图4所示为常规Smith预估控制的结构图, 图中 $C(s)$ 表示PID控制器.

系统的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{C(s) Gr(s) e^{-\tau s}}{1 + C(s) Gm(s) + C(s) (Gr(s) e^{-\tau s} - Gm(s) e^{-\tau_0 s})} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当模型精确时, 特征方程中的纯滞后项被消除, 系统稳定性得到有效提高, 但是在实际情况下被控对象的参数具有不确定性, 并且实际被控对象模型和预估模型的误差越大, 即 $Gr(s)$ 与 $Gm(s)$ 以及 τ 与 τ_0 相差越大, Smith预估补偿效果越差. 为此提出一种改进型Smith的控制算法, 图5为其控制原理框图.

图5中 $R(s)$ 表示目标设定值; $Gc(s)$ 表示模糊控制器; $Gr(s)e^{-\tau s}$ 表示被控对象; $Y(s)$ 表示系统输出值; $Gm(s)$ 表示不含滞后环节的模块; $Gm(s)e^{-\tau_0 s}$ 表示引入的参考模型; $1 + T_d s$ 表示导前微分环节.

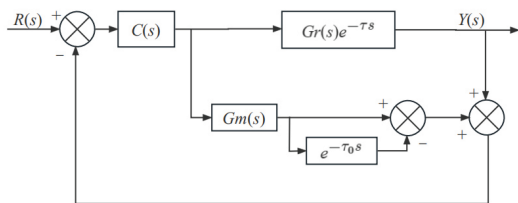


图4 常规Smith预估控制结构图

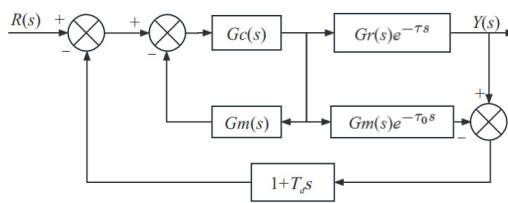


图5 改进型Smith控制原理框图

系统的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{Gc(s) Gr(s) e^{-\tau s}}{1 + Gc(s) Gm(s) + Gc(s) (1 + T_d s) (Gr(s) e^{-\tau s} - Gm(s) e^{-\tau_0 s})} \quad (10)$$

当被控对象模型与引入的参考模型完全匹配时, 即 $Gr(s) = Gm(s)$ 、 $\tau = \tau_0$ 时, 系统的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{Gc(s) Gr(s) e^{-\tau s}}{1 + Gc(s) Gm(s)} \quad (11)$$

此时系统等效为理想的Smith预估补偿系统.

当 $s \rightarrow 0$ 时, $e^{T_d s} \rightarrow 1 + T_d s$, 则特征方程可写为:

$$D(s) = Gc(s) (Gr(s) e^{(T_d - \tau)s} - Gm(s) e^{(T_d - \tau_0)s}) + Gc(s) Gm(s) + 1 \quad (12)$$

由式(12)可知, 导前微分环节的引入可以缓解闭环系统的迟滞性, 起到预估补偿的作用, 并且当 T_d 取值合适时可以大大缩减时滞时间.

系统控制方式包括Smith预估控制和模糊PID控制, 模糊控制不要求有精确的被控对象模型, 因为其可以通过模糊规则对模型进行清晰的控制^[37], 具有较强的鲁棒性. 为了达到期望的调控效果, 对于模糊PID控制而言, 进行PID参数整定是关键. 模糊控制器的维数越高, 系统性能越好, 但三维模糊控制器的控制规则较复杂并且成本较大, 考虑到性能与经济性, 因此系统采用二维模糊控制器, 其在性能方面优于一维模糊控制器, 满足系统控制要求. 模糊PID控制器由模糊控制器和PID控制器组成, 其基本原理框图如图6所示.

模糊PID控制参数的整定公式为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别是整定后比例、积分、微分系数; K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 分别是整定前比例、积分、微分系数.

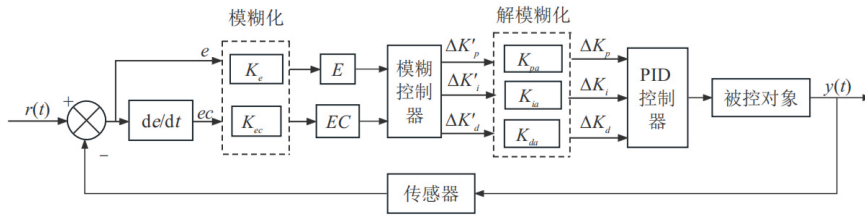


图6 模糊PID控制原理框图

3 仿真与分析

二维模糊控制中采用2个输入量^[38]：浓度偏差 e （目标EC值与实际EC值的偏差）和浓度偏差变化率 ec ；3个输出量：比例系数变化值 ΔK_p 、积分系数变化值 ΔK_i 和微分系数变化值 ΔK_d 。输入量和输出量均用7个模糊子集{NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、ZO（零）、PS（正小）、PM（正中）、PB（正大）}进行描述，模糊论域均设为{-3,-2,-1,0,1,2,3}。2个输入量经模糊化处理分别得到语言变量 E 和 EC ，其中 e 的基本论域设定为[-0.3,0.3]， ec 的基本论域设定为[-0.15,0.15]，量化因子分别为10和20； ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的基本论域分别设定为[-1.5,1.5]、[-0.02,0.02]、[-1.5,1.5]，比例因子分别为0.5、1/150、0.5。在Simulink模块中使用工具箱对PID参数进行调节后得到 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 分别为1.5、0.085、-10。

根据理论知识和实际操作经验，使用以下模糊控制语句，如：“If E is NB and EC is NB then ΔK_p is PB, ΔK_i is NB, ΔK_d is PS”等在Rule Editor模块中建立49条模糊规则。输出的参数会得到控制信号以控制电磁阀，从而实现母液流量的调节。使用MATLAB软件中的FIS模块创建一个二维模糊控制器，如图7所示。

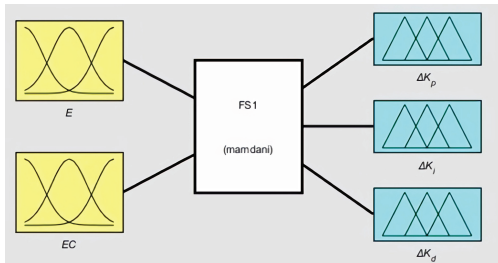


图7 模糊控制器属性图

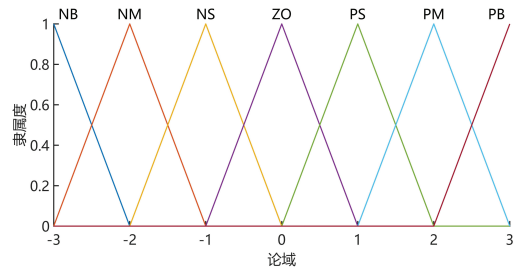


图8 隶属度函数图

对输入量和输出量的模糊论域、模糊子集、解模糊法进行设置，并对隶属度函数进行创建与选择，由于三角形隶属度函数具有计算效率高、适用应强的优点^[39]，因此文章中的5个变量均采用三角形隶属度函数，如图8所示。

在调控系统中，经过模糊推理后，会得到输出量的模糊集合，这些集合不能直接转换为精确量进行输出，需要进行解模糊化处理。由于重心法解模糊化精度较高^[40]，因此利用重心去模糊化，将输出量转换成相应的量化值后再将运算结果输入到模糊控制查询表中。模糊规则曲面图如图9所示。

利用MATLAB对上述营养液调控模型进行仿真实验，将本文改进型的算法与PID算法、模糊PID控制算法进行阶跃响应实验。本文以60 L混肥桶（工作有效容积为55 L，其中 $V_T=50$ L、 $V_F=5$ L）为例，设定灌溉水流量 Q_W 为2.1 L/s，主管道流量 Q 为2.15 L/s，文丘里吸肥器的流出流量 Q_F 为1 L/s，文丘里吸肥器的最大吸肥量 $Q_{d100\%}$ 为0.2 L/s，肥料母液电导率值 E_M 为5 mS/cm，系统滞后时间为5 s。将上述变量代入式(8)可得营养液调控的近似传递函数为：

$$G(s) = \frac{E_T(s)}{N(s)} = \frac{0.47}{116.28s^2 + 30.47s + 1} e^{-5s} \quad (14)$$

在Simulink模块中搭建PID、模糊PID和改进型Smith算法的EC值调控模型，系统模型图如图10所示。

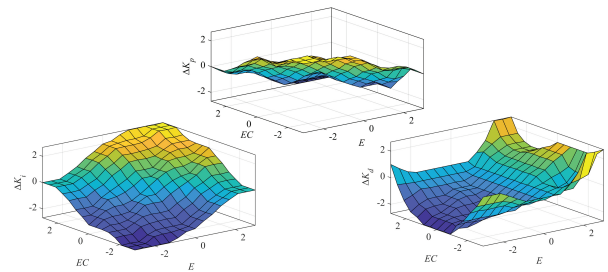


图9 模糊规则曲面图

果表明,改进型Smith控制系统相比PID和模糊PID系统控制更加稳定、响应更为迅速、整体控制更好,可为实际EC值调控系统提供一种可行策略。

参考文献:

- [1] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 155-166.
- [2] XIAO L G, DING M L, WEI C, et al. The impacts of conservation agriculture on water use and crop production on the Loess Plateau: From know-what to know-why[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7449.
- [3] LI J L, CHEN P, SUN X H, et al. Effects of fertigation strategies on water and nitrogen distribution under water storage pit irrigation for orchards[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(1): 165-171.
- [4] DUBOS B, SNOECK D, FLORI A. Excessive use of fertilizer can increase leaching processes and modify soil reserves in two ecuadorian oil palm plantations[J]. *Experimental Agriculture*, 2017, 53(2): 255-268.
- [5] AJENG A A, ABDULLAH R, MALEK M A, et al. The effects of biofertilizers on growth, soil fertility, and nutrients uptake of oil palm (*Elaeis guineensis*) under greenhouse conditions[J]. *Processes*, 2020, 8(12): 1681.
- [6] HU X Y, CHEN X. Optimisation of fertiliser dissolution under differential pressure tank during fertigation[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 206(1): 79-93.
- [7] ZHANG M Z, LI Y, LIU J F, et al. Changes of soil water and heat transport and yield of tomato (*Solanum lycopersicum*) in greenhouses with micro-sprinkler irrigation under plastic film[J]. *Agronomy*, 2022, 12(3): 664.
- [8] WANG H D, LI J, CHENG M H, et al. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 243: 357-366.
- [9] XUE X Y, XU X F, ZHANG Z L, et al. Variable rate liquid fertilizer applicator for deep-fertilization in precision farming based on ZigBee technology[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(30): 43-50.
- [10] JEON E, CHOI S, YEO K H, et al. Development of electrical conductivity measurement technology for key plant physiological information using microneedle sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(8): 085009.
- [11] MOYA C, OYANEDEL E, VERDUGO G, et al. Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato[J]. *HortScience*, 2017, 52(6): 868-872.
- [12] JIANG Y, ZHAO J B, DUAN J, et al. Automatic control system of water and fertilizer based on fuzzy control algorithm and simulation[C]//2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (IT-NEC). Chengdu: IEEE, 2017: 1671-1674.
- [13] MOON T, AHN T I, SON J E. Forecasting root-zone electrical conductivity of nutrient solutions in closed-loop soilless cultures via a recurrent neural network using environmental and cultivation information[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 859.
- [14] WU Y, LI L, LI S S, et al. Optimal control algorithm of fertigation system in greenhouse based on EC model[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(3): 118-125.
- [15] SAMSURI S F M, AHMAD R, HUSSEIN M. Development of nutrient solution mixing process on time-based drip fertigation system[C]//2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation. Kota Kinabalu, Malaysia: IEEE, 2010: 615-619.
- [16] STEIDLE NETO A J, ZOLNIER S, DE CARVALHO LOPES D. Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 103: 17-25.
- [17] DOMINGUES D S, TAKAHASHI H W, CAMARA C A P, et al. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 84: 53-61.
- [18] ZAMORA-IZQUIERDO M A, SANTA J, MARTÍNEZ J A, et al. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 177: 4-17.
- [19] MOREIRA BARRADAS J M, DIDA B, MATULA S, et al. A model to formulate nutritive solutions for fertigation with customized electrical conductivity and nutrient ratios[J]. *Irrigation Science*, 2018, 36(3): 133-142.
- [20] BAN B, LEE M, RYU D. ODE network model for nonlinear and complex agricultural nutrient solution system[C]//2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju Island, Korea (South): IEEE, 2019: 996-1001.
- [21] WANG X Z, FANG W Q, ZHAO Z F. Establishment of a model and system for secondary fertilization of nutrient solution and residual liquid[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 1851.

- [22] CARMASSI G, INCROCCI L, MAGGINI R, et al. Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(3): 431-445.
- [23] CHEN G D, LIU D J, MU Y X, et al. A novel Smith predictive linear active disturbance rejection control strategy for the first-order time-delay inertial system[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 5560123.
- [24] FELIU-BATLLE V, RIVAS-PEREZ R. Control of the temperature in a petroleum refinery heating furnace based on a robust modified Smith predictor[J]. *ISA Transactions*, 2021, 112: 251-270.
- [25] PEREIRA R D O, TORRICO B C, DO NASCIMENTO J N, et al. Smith predictor-based feedforward controller for measurable disturbances[J]. *Control Engineering Practice*, 2023, 133: 105439.
- [26] JESUS I S, BARBOSA R S. Smith-fuzzy fractional control of systems with time delay[J]. *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 78: 54-63.
- [27] 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. LI S S, LI L, MU Y H, et al. Research on pH control system of nutrient solution based on fuzzy-Smith controller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(S1): 347-352+393. (in Chinese)
- [28] 刘斌,谢煜,孙艺哲,等. 基于Smith预估模糊控制的温室灌溉决策系统设计[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(8): 149-153. LIU B, XIE Y, SUN Y Z, et al. Design of greenhouse irrigation decision system based on Smith predictive fuzzy control[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(8): 149-153. (in Chinese)
- [29] 张磊,王思明. 改进Smith预估时延补偿的模糊网络控制系统研究[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(1): 126-130. ZHANG L, WANG S M. Research on fuzzy networked control systems with improved smith predictor delay compensation[J]. *Modern Electronic Technology*, 2020, 43(1): 126-130. (in Chinese)
- [30] 袁洪波,李莉,王俊衡,等. 温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 27-32. YUAN H B, LI L, WANG J H, et al. Design and test of nutrient solution control equipment for greenhouse water and fertilizer integration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 27-32. (in Chinese)
- [31] BASKYS A. Switched-delay Smith predictor for the control of plants with response-delay asymmetry[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 258.
- [32] LI H, LI H, HUANG X Q, et al. Numerical and experimental study on the internal flow of the venturi injector[J]. *Processes*, 2020, 8(1): 64.
- [33] CHANDRAMOHAN P, BALAMURUGAN P, DINESH S. Effect of fluid flow diversion and venturi size on drip irrigation fertilizer feeding system[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, 65: 250-256.
- [34] 王永涛,刘坚,李家春,等. 并联四文丘里管施肥器“旁路吸肥”模式性能分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(9): 959-965. WANG Y T, LIU J, LI J C, et al. Performance analysis of “bypass fertilizer suction” mode of parallel four-venturi tube fertilizer applicator[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(9): 959-965. (in Chinese)
- [35] 李莉,王俊衡,孟繁佳,等. 基于二次混合机构的营养液调控模型与PID算法实现[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 100-106. LI L, WANG J H, MENG F J, et al. Nutrient solution regulation model based on secondary mixing mechanism and PID algorithm implementation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 100-106. (in Chinese)
- [36] NIRLAULA T P, SHAH R, KUMAR D, et al. Influence of solvent permittivity and divalent salt on micellization behavior of sodium dodecyl sulfate: Conductivity measurements and simulation study[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 349: 118186.
- [37] PRECUP R E, HELLENDORRN H. A survey on industrial applications of fuzzy control[J]. *Computers in Industry*, 2011, 62(3): 213-226.
- [38] JIN X, CHEN K K, ZHAO Y, et al. Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller[J]. *Measurement*, 2020, 164: 108023.
- [39] GERAMI SERESHT N, FAYEK A R. Computational method for fuzzy arithmetic operations on triangular fuzzy numbers by extension principle[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2019, 106: 172-193.
- [40] SAIN D, MOHAN B M. A simple approach to mathematical modelling of integer order and fractional order fuzzy PID controllers using one-dimensional input space and their experimental realization[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(7): 3726-3756.