

基于 Fuzzy - Smith 控制器的营养液 pH 值调控系统研究

李帅帅¹ 李莉¹ 穆永航¹ 王宏康² 吴勇¹ SIGRIMIS N³

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业信息获取技术农业部重点实验室, 北京 100083; 3. 雅典农业大学农业工程系, 雅典 11855)

摘要: pH 值的控制是水肥一体化营养液循环控制系统的重要环节, 水肥控制过程中 pH 值在最优控制范围内有利于根系的发育以及多数矿物质的吸收。营养液调控过程中, 由于循环管路以及酸液的缓慢扩散, 使得 pH 值调节过程存在很大的时滞, 传统 PID 难以取得良好效果。本研究根据被控对象特点, 建立了描述该过程的数学模型, 设计开发了一套具有二次混肥特性的以 MSP430 单片机为主控的营养液 pH 值控制系统。由于参数自整定模糊 PID 不需要精确数学模型以及 Smith 预估可对纯滞后进行补偿的特点, 开发的系统将参数自整定模糊 PID 控制引入 Smith 预估当中, 既缓解了滞后时间对控制系统的影响, 又对模型的不精确性进行了补偿。为了验证该算法以及系统的有效性和优越性, 分别对 PID、Fuzzy - Smith 控制算法进行仿真测试, 同时在不同灌溉量下进行性能试验。试验结果表明, 在不同灌溉量下 Fuzzy - Smith 控制算法 pH 值的平均最大超调量为 0.83%, 营养液 pH 值从 8.0 调节为 6.0 的平均时间为 157 s, 优于常规 PID 控制的 2.55% 和 189 s。

关键词: pH 值调控; Fuzzy - Smith 控制; 二次混肥; 水肥一体化; 灌溉

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0347-06

pH Value Control System of Nutrient Solution Based on Fuzzy - Smith Controller

LI Shuaishuai¹ LI Li¹ MU Yonghang¹ WANG Hongkang² WU Yong¹ SIGRIMIS N³

(1. Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Department of Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Athens 11855, Greece)

Abstract: The control of pH value is an important part of water and fertilizer integrated nutrient solution circulation control system. In the process of water and fertilizer control, pH value in the optimal control is conducive to the development of root system and absorption of most minerals. In the process of nutrient solution regulation, due to the slow diffusion of the circulating line and acid fluid, the pH adjustment process has a large time lag, and the traditional PID is difficult to achieve good results. According to the characteristics of the controlled object, a mathematical model describing the process was established, and a pH control system with secondary mixed fertilizer was designed. Combining with the characteristics of parameter normal setting, the fuzzy PID does not need accurate mathematical model and the Smith predictor can perform the pure lag compensation, the parameter self-tuning fuzzy PID control was introduced into Smith prediction, which can overcome the influence of lag time on control system and improve the accuracy of the model. In order to verify the algorithm and the effectiveness and superiority of the system, the PID and Fuzzy - Smith control algorithm were simulated respectively, and the performance tests under different irrigation quantities were carried out. The experimental results show that the average maximum overshoot of pH value under Fuzzy - Smith control of different irrigation amounts is 0.83%. The average rise time of nutrient solution from pH value 8.0 to 6.0 is 157 s. It is better than the

收稿日期: 2017-06-25 修回日期: 2017-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201000-2016YFD0201003)和云南省汪懋华院士工作站项目(2015IC016)

作者简介: 李帅帅(1993—),男,硕士生,主要从事物联网技术在设施园艺中的应用研究,E-mail: 1191855233@qq.com

通信作者: 李莉(1978—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

conventional PID control result which is 2.55% and 189 s. The Fuzzy - Smith control algorithm proposed in this paper has good control stability and dynamic performance, and can meet the requirements of automatic control of pH value of nutrient solution.

Key words: regulation of pH value; Fuzzy - Smith control; two-step fertilizer mixing; integration of water and fertilizers; irrigation

引言

水肥一体化技术是水、肥同步控制的一项技术,作物在吸收水分的同时吸收养分。营养液调控装备将灌溉和施肥结合起来,利用灌溉设施将作物所需的养分、水分按需供给,促进作物根系生长^[1-3]。营养液调控过程中溶液的酸碱度(pH值)在最优控制范围内有利于根系的发育以及多数矿物质的吸收^[4]。因此按照营养配方实现精确施肥的控制策略是实现智能灌溉的关键。

水肥灌溉过程中pH值调控具有严重非线性,大容器和循环管路又增加了系统的时滞性。TAN等^[5]通过基于遗传算法的IMC - PID控制策略对pH值控制系统进行了控制,取得良好控制品质。BABUSKA等^[6]利用参数自整定PI算法用于发酵pH值控制,取得了较好的控制效果。PALANCAR等^[7]使用神经网络建立pH值模型,并用预测控制算法进行控制,得到了较为满意的效果,但是建模复杂程度增加,实时性不能满足实际控制要求。模糊控制和PID控制是控制领域常用的两种控制策略^[8-12]。杨翠容等^[13]针对特定的pH值调控过程,提出了一种模糊和神经网络相结合的控制算法,但由于算法复杂,只停留在仿真阶段,难于在实际工程中实现。许锋等^[14]通过逐步非平衡点线性化获得线性化子模型,把变模型自适应预测控制应用到pH值中和过程中,以此进行状态反馈控制。总的来说,pH值控制在早期多采用PID控制,但是由于无法建立精确数学模型,以及中和点的高增益使得PID参数整定十分困难,所以传统控制方法无法达到良好控制效果。随着模糊控制理论、神经网络和人工智能等先进控制技术的发展,很多学者已在寻求先进的控制方法实现对pH值的控制,并取得了良好效果^[15-20]。

本文针对水肥一体化营养液调控装备混肥过程中营养液pH值纯滞后、非线性且参数易变的特点,提出一种Fuzzy - Smith控制算法,研究营养液pH值的调控策略。采用开发的多路复合式文丘里吸肥装置^[21-23],通过与pH值控制算法配合,期望得到稳定的营养液酸碱度。

1 营养液 pH 值控制系统

1.1 系统组成与原理

水肥一体化营养液调控装备总体结构如图1所示,该装备与灌溉网络整体构成了水肥一体循环灌溉系统。其中,营养液调控装备pH值控制系统包括主控制系统、酸桶、复合式文丘里吸肥装置、灌溉线路、三通电磁阀、pH电极以及过滤器等。

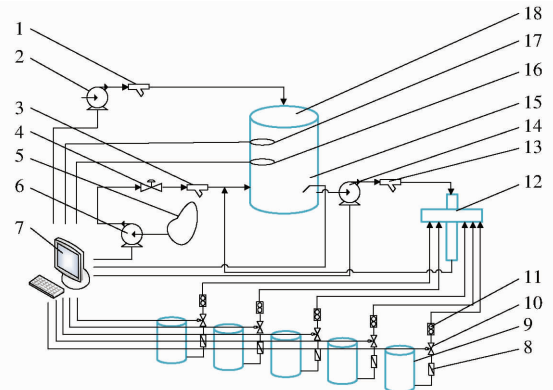


图1 水肥调控系统总体结构

Fig.1 Water and fertilizer control system

1. 回水过滤器 2. 回水泵 3. 进水过滤器 4. 隔膜阀 5. 水源
6. 进水泵 7. 核心控制系统 8. 酸液桶 9. 酸液过滤器 10. 酸液控制电磁阀 11. 流量计 12. 多路文丘里吸肥吸酸混合器
13. 灌溉过滤器 14. 灌溉泵 15. 混液罐地位液位开关 16. pH电极 17. EC电极 18. 营养液混液灌

混肥桶侧壁安装了2个用于检测溶液酸碱度的pH值传感器,高度相差10 cm的2个传感器用于有效性的相互验证以及取平均值以减少误差。pH值传感器使用上海雷磁公司生产的E - 201 - C型复合玻璃电极,该电极将参比电极与pH电极集成在一支电极中,在测量时无需再单独添加参比电极。灌溉时,抽肥泵从混肥桶抽取符合标准的营养液,一部分用于温室灌溉,另一部分为复合式文丘里吸肥器提供负压从而吸取肥液和酸液。当控制系统监测到pH值高于设定值时,将启动电磁阀吸入酸液进行调节。复合式文丘里吸肥器是根据文丘里基本原理设计的一种营养液和酸液吸取与混合的装置,实现酸液的吸取与一次混合,然后在高速水流下进入混肥桶进行二次混合,混肥桶的进水和复合式文丘里注入的营养液相互搅动,形成一定的搅拌作用,此水流搅拌二次混肥特性的存在有效加速了中和液的扩散。

控制系统采用 MSP430 单片机作为主控器,并嵌入 Fuzzy-Smith 控制算法控制策略。核心控制器通过采集混肥桶中的 pH 值控制三通电磁阀的开合时间,以控制酸液吸收到混肥桶中的量,从而达到调控混肥桶中营养液 pH 值的目的。

1.2 营养液 pH 值调控建模

在营养液调控过程中,假设 pH 值调控过程是在连续搅拌混合均匀的条件下进行。营养液循环调控的模型与连续搅拌釜式反应器(CSTR)模型系统非常接近,所以选择 CSTR 系统进行仿真,系统原理图如图 2 所示。

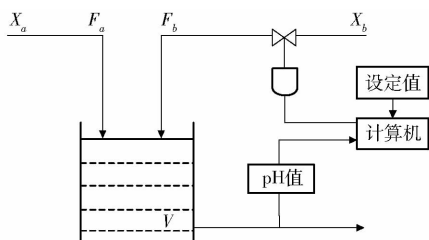


图 2 pH 值调控过程

Fig. 2 Process of pH value adjustment

从实际混肥特点分析,实际设备工作时,混肥桶中的体积 V 不变,由于整个系统处在高速流动中,故假设肥液完全均匀,酸碱溶液的动态过程可由微分方程组表示,为

$$V \frac{dX_1}{dt} = F_a X_a - F_{out} X_1 \quad (1)$$

$$V \frac{dX_2}{dt} = F_b X_b - F_{out} X_2 \quad (2)$$

其中 $F_{out} = F_a + F_b \quad (3)$

- 式中 V ——混肥桶体积 F_a ——酸液流量
- X_a ——酸液浓度 F_b ——混肥液流量
- X_b ——混肥液浓度
- X_1 ——混肥液中所包含阴离子的酸浓度
- X_2 ——混肥液中所包含阳离子的碱浓度
- F_{out} ——混肥液流出流量

实际混肥过程中 pH 值和氢离子的浓度根据电中和条件

$$C_i^2 - (X_1 - X_2) C_i - K_w = 0 \quad (4)$$

$$M = -\lg C_i \quad (5)$$

式中 C_i ——混肥液中氢离子浓度

K_w ——水的电离平衡常数

M ——溶液的 pH 值

常态下,状态量 X_1 和 X_2 不易测量,将式(1)、(2)合并得

$$V \frac{dX}{dt} = F_a X_a - F_b X_b - F_{out} X \quad (6)$$

其中 $X = X_1 - X_2$

为了使状态方程更加简化,改写式(6)为

$$F_b = \frac{1}{X_b + X} \left[-V \frac{dX}{dt} + F_a (X_a - X) \right] \quad (7)$$

合并式(4)、(6)得

$$\frac{dM}{dt} = -0.434 \frac{C_i}{C_i^2 + K_w} \frac{dX}{dt} \quad (8)$$

理想状态下,利用式(7)、(8),混肥系统中被控对象的 pH 值动态方程为

$$F_b = \frac{1}{X_b + X} \left(\frac{C_i^2 + K_w}{0.434} V \frac{dM}{dt} \right) + F_a (X_a - X) \quad (9)$$

在该简化模型中,酸液和混肥液的流速是恒定的,能够通过软件程序调节三通电磁阀的占空比来控制酸液量以达到 pH 值设定值。在实际情况下,由于水肥一体化营养液调控装备中循环管路的存在,使得 pH 值调节过程存在很大的时滞。因此,在理想模型的基础上加上时滞环节,系统的延迟环节的传递函数为 $e^{-10\tau}$,在很大程度上提高了控制精度。在 Matlab 中对上述动态方程进行仿真,可以得到 PID 控制的初始参数值。

2 pH 值调控方法

水肥一体化营养液调控装备 pH 值控制系统管路部分采用意大利 Sirai 公司的 D322V22C 型三通道常闭型电磁阀。混肥时电磁阀连接在复合式文丘里吸肥器的入口处,经过驱动电力传输信号并驱动电磁阀。通过调整输出脉宽从而实现对文丘里吸酸的调节。电磁阀工作频率设定为 0.5 Hz,即周期为 2 s。在营养液的调配过程中,控制系统通过控制 PWM 就可以实现对吸取酸液量的控制。

基于 Fuzzy-Smith 的控制系统原理框图如图 3 所示。图中 $R(s)$ 为系统输入, $e(t)$ 为系统输入与输出的偏差值, $\dot{e}(t)$ 为对偏差求导的偏差变化率, $U(s)$ 为模糊 PID 控制输出, $G_r(s) e^{-\tau_s}$ 为纯滞后环节。

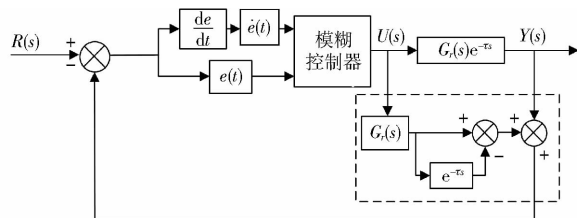


图 3 Fuzzy-Smith 预估控制系统原理图

Fig. 3 Principle diagram of Fuzzy-Smith predictive control system

在实际的混肥过程中,因为 pH 值调控过程具有强烈的非线性,除了容积延迟外,还有循环管道的纯延迟以及中和液的缓慢扩散,传统 PID 难以取得良好效果。根据被控对象特点,结合 Fuzzy 控制不

需要精确数学模型以及 Smith 预估可对纯滞后进行补偿的特点,将参数自整定模糊 PID 控制引入 Smith 预估当中,既缓解了滞后时间对控制系统的影响,又对模型的不精确性进行了补偿。

控制器主要包括 Smith 预估控制和参数自整定的模糊 PID 控制,为了能达到期望的控制效果,参数的整定是 PID 控制的关键和难点。在营养液 pH 值控制系统中,目标 pH 值与实际 pH 值之间偏差 e 的取值范围为 $[-7,7]$,误差变化率 \dot{e} 的取值范围为 $[-7,7]$ 。精确输出量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的变化范围分别为 $[-0.6, 0.6], [-0.3, 0.3], [-0.06, 0.06]$ 。将偏差 e 和偏差变化率 \dot{e} 分别模糊化得到语言变量 E 和 \dot{E} ,模糊论域均为 $[-6,6]$,其量化因子均为 $6/7$ 。为了查表方便,输出控制量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊论域均设为 $[-6,6]$,取值特征点均为 $\{-6, -4, -2, -1, 0, 2, 4, 6\}$,量化因子分别为 10、20、100。三者的模糊子集选取均取为 $\{NB, NM, NS, ZE, PM, PS, PB\}$ 。在调控工作过程中能够调节的占空比范围为 $[-20\%, 20\%]$,此范围即两次占空比之间的相对值。例如,当 E 为负大时,表明 pH 值的检测值小于设定值,并且偏离已经很大,此时,若 \dot{E} 也为负大,则偏离速度更快,为了扭转 pH 值的变化,则输出占空比为 -20% ,即在上个周期的基础上减小 20% 。

在编写控制策略的过程中,系统初始状态的 pH 值为 8,每隔 2 s 检测一次 pH 值,输入参数 e 为目标 pH 值与实测 pH 值的差值。同时,电磁阀实际输出占空比的合理范围值为 $[0, 100\%]$ 。当占空比大于 100% 时,赋值为 1;当占空比小于 0 时,赋值为 0。根据专家知识和实际操作经验,建立模糊控制规则表,如表 1~3 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy rules of ΔK_p

\dot{e}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	PO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NS	NM	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB

通过解模糊的方法,控制器采用加权平均值法,计算出输出变量的精确值。根据控制器的输入量 (e, \dot{e}) 在线查询各个参数的修正值,代入 PID 的参数中计算完成在线校正。基于 Fuzzy-Smith 控制器

的营养液 pH 值算法流程图如图 4 所示。

表 2 ΔK_i 模糊控制规则
Tab.2 Fuzzy rules of ΔK_i

\dot{e}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	NS	NM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PS	PB	PB

表 3 ΔK_d 模糊控制规则
Tab.3 Fuzzy rules of ΔK_d

\dot{e}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	NS	NM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PS	PB	PB

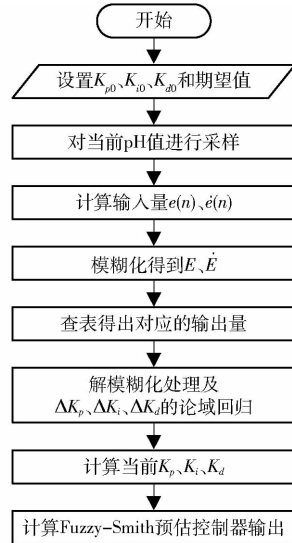


图 4 基于 Fuzzy-Smith 控制的 pH 值调控算法流程图
Fig.4 Flow chart of pH control algorithm based on Fuzzy-Smith control

3 试验

3.1 水肥一体化营养液 pH 值调控模型仿真试验

为了验证普通 PID 和营养液 pH 值的 Fuzzy-Smith 调控算法,利用 Matlab 对上述 pH 值的简化模型进行了阶跃响应的跟踪试验以及增加确定干扰信号的鲁棒性试验。检测实际灌溉水 pH 值为 8.0,设定目标值为 6.0, PID 控制的初始参数取值 $K_{p0} = 10$,

$K_{d0} = 2, K_{a0} = 0.15$, 所有 PID 参数均通过相关试验进行了优化。2 种控制算法的仿真结果如图 5 所示。

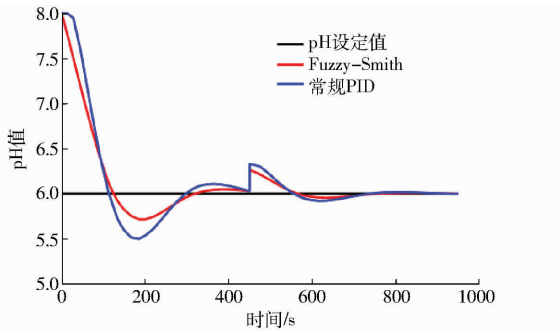


图 5 Fuzzy - Smith 和 PID 控制仿真结果

Fig. 5 Simulation chart of Fuzzy - Smith and PID control

由图 5 可以看出, 2 种控制方法均能使系统达到 pH 值的设定值 6.0, 但 Fuzzy - Smith 控制器的波动性相对于常规 PID 明显更小; 由于容积延迟、循环管道的纯延迟以及中和液的缓慢扩散, 没有增加 Smith 预估控制的常规 PID, 从 10 s 以后才开始进行调节。在 450 s 时, 给 2 种控制器增加确定性的扰动信号, 可以看出 Fuzzy - Smith 明显优于常规 PID 的抗干扰能力。仿真对比结果体现了该营养液 pH 值调控的 Fuzzy - Smith 算法具有明显的优越性。

3.2 试验验证

为了验证 Fuzzy - Smith 控制算法的有效性, 在水肥一体化营养液调控装备上进行了 pH 值控制效果的验证试验。试验中保持水肥一体化营养液调控装备混肥桶的体积稳定在约 100 L。灌溉泵使用粤华牌 GZA(S)65 - 50 - 160/4.0 型不锈钢离心水泵, 水泵流量为 $12.52 \text{ m}^3/\text{h}$ 。进水连接带压力水源, 使用便携式 pH 传感器实测 pH 值为 8.0。调节酸液使用稀盐酸, 配成浓度为 0.2 mol/L 的溶液。该装备采用上海雷磁公司生产的 E - 201 - C 型复合玻璃电极用于检测营养液实时 pH 值, 精度为 0.01。控制系统采用基于 MSP430 的嵌入式控制器控制 pH 值, 通过单片机 I/O 口采集 pH 值, 灌溉流量和 pH 值的实时检测数据通过 RS485 总线传输到计算机进行记录。最终通过输出相应的占空比驱动相应的电磁阀实现营养液酸碱度的调控。

试验初始时混肥桶中仅为清水, 设定目标 pH 值为 6.0, 分别在灌溉量 Q 为 3、6、9 m^3/h 对常规 PID 和 Fuzzy - Smith 下进行对比试验, 得到的控制效果如图 6、7 所示。

由图 6、7 可以看出, 不同灌溉量对 pH 值的控制效果有明显影响, 主要表现在系统稳定时的稳态误差、系统稳定时间和最大超调量上。系统达到稳定的判定指标为控制目标稳定在设定目标值 ± 0.1 内。系统控制稳定时间随着灌溉量的增大而减小,

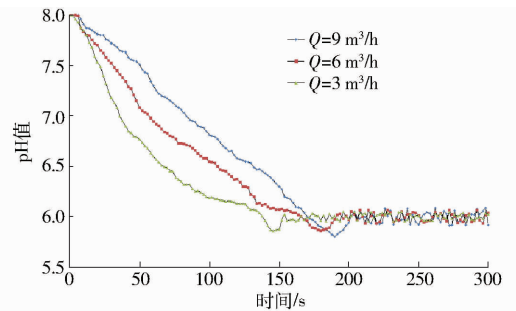


图 6 常规 PID 控制下不同灌溉量的调控结果

Fig. 6 Results of different irrigation amounts under conventional PID control

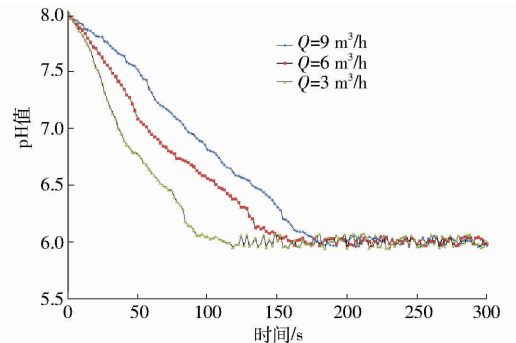


图 7 Fuzzy - Smith 控制下不同灌溉量的调控结果

Fig. 7 Results of different irrigation amount under Fuzzy - Smith control

系统的超调量随着灌溉量的增大而减小。两种算法下 pH 值调控效果受灌溉流量影响明显, 灌溉量越大系统的稳定时间和最大超调量都会明显减小, 常规 PID 控制下由于没有引入 Smith 控制, 系统存在 10 s 左右的时滞。图 6、7 中数据的定量分析结果如表 4、5 所示。

表 4 Fuzzy - Smith 控制下不同灌溉量的影响
Tab. 4 Effect of different irrigation flow under Fuzzy - Smith control

灌溉量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	稳态误差/ ($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	稳定时间/ s	最大超调量/ %
3	0.10	179	0.92
6	0.08	160	0.80
9	0.07	133	0.77
平均值	0.08	157	0.83

表 5 常规 PID 控制下不同灌溉量的影响
Tab. 5 Effect of different irrigation flow under PID control

灌溉量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	稳态误差/ ($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	稳定时间/ s	最大超调量/ %
3	0.34	210	3.25
6	0.28	198	2.40
9	0.22	160	2.00
平均值	0.28	189	2.55

由表 4 可以看出, 随着灌溉量的增大, 系统的稳定时间从 179 s 下降到 133 s, 3 种灌溉量取平均值

为 157 s;系统的最大超调量从 0.92% 下降到 0.77%。

由表 5 可以看出,随着灌溉量的增大,系统的稳定时间从 210 s 下降到 160 s,3 种灌溉量取平均值为 189 s;系统的最大超调量从 3.25% 下降到 2.00%。造成此结果的原因是灌溉量增大后,混肥桶内酸液进量保持不变,混肥桶内体积不变,所以进水量增大导致 pH 值下降变慢,从而引起系统超调量降低并减小系统震荡,同时系统调节时间增长。

从试验结果中还可以看出,Fuzzy - Smith 控制下系统的平均最大超调量为 0.83% (约 157 s),优于常规 PID 控制的 2.55% (约 189 s)。这表明 Fuzzy - Smith 控制算法能够满足水肥灌溉过程中对

于营养液 pH 值的精量控制,具有更小的超调量和稳定时间,以及更强的抗干扰能力。

4 结 论

(1) Fuzzy - Smith 控制器的调节时间较短、超调量较小、稳态特性与动态响应特性均较好。

(2) 在不同灌溉量下 Fuzzy - Smith 控制下 pH 值的平均最大超调量为 0.83%,营养液 pH 值从 8.0 到 6.0 的上升时间为 157 s,优于常规 PID 控制的 2.55% (约 189 s)。

(3) 试验表明 Fuzzy - Smith 控制算法控制稳定性及动态性能良好,可以很好地满足营养液 pH 值自动控制的要求,应用于实际灌溉。

参 考 文 献

- 魏永霞,何双红,魏永华. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 98 - 102.
WEI Yongxia, HE Shuanghong, WEI Yonghua. Influence of water fertilizer coupling on rice yield and compensation under the condition of water control irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5):98 - 102. (in Chinese)
- 袁洪波,王海华,庞树杰,等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21):159 - 165.
YUAN Hongbo, WANG Haihua, PANG Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21):159 - 165. (in Chinese)
- 周博,周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(1):211 - 216.
ZHOU Bo, ZHOU Jianbin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(1):211 - 216. (in Chinese)
- 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17):3594 - 3603.
SONG Mengya, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Effects of mixtures of different organic materials on soil nutrient content and soil biochemical characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17):3594 - 3603. (in Chinese)
- TAN W W, LU F, LOH A P, et al. Modeling and control of a pilot pH plant using genetic algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(4):485 - 494.
- BABUSKA R, OOSTERHOFF J, OUDSHOORN A, et al. Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002, 15(1):3 - 15.
- PALANCAR M C, AND J M A, TORRECILLA J S. pH-control system based on artificial neural networks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37(7):2729 - 2740.
- 赵笑笑. 基于模糊理论与常规 PID 控制的模糊 PID 控制方法研究[J]. 山东电力技术, 2009(6):54 - 56.
ZHAO Xiaoxiao. Research on fuzzy PID control method combined fuzzy theory and conventional PID control[J]. Shandong Electric Power, 2009(6):54 - 56. (in Chinese)
- 杨世勇,徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11):21 - 25.
YANG Shiyong, XU Guolin. Comparison and composite of fuzzy control and PID control[J]. Techniques of Automation and Applications, 2011, 30(11):21 - 25. (in Chinese)
- 王立舒,侯涛,姜森. 基于改进多目标进化算法的温室环境优化控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):131 - 137.
WANG Lishu, HOU Tao, JIANG Miao. Improved multi-objective evolutionary algorithm for optimization control in greenhouse environment[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):131 - 137. (in Chinese)
- 孙玉波,高秀华,周富家,等. 大型载重车辆电液多轴转向执行机构的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5):100 - 104.
SUN Yubo, GAO Xiuhua, ZHOU Fujia, et al. Fuzzy - PID control of the executive mechanism of electro-hydraulic multi-axle steering system for large heavy truck[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5):100 - 104. (in Chinese)
- 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)

- 3664 - 3671.
YANG D C, ZHAO X Y, XU Z X, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13):3664 - 3671. (in Chinese)
- 23 BARKATULLAH J, HANKE T. Goldstrike 1: cointerra's first-generation cryptocurrency mining processor for bitcoin [J]. IEEE Micro, 2015, 35(2):68 - 76.
- 24 张苑. 区块链技术对我国金融业发展的影响研究[J]. 国际金融, 2016(5):41 - 45.
- 25 郭彬, 于飞, 陈劲. 区块链技术与信任世界的构建[J]. 企业管理, 2016(11):110 - 113.
- 26 TEWARI H, NUALLAIN E O. Netcoin: a traceable P2P electronic cash system [C]. IEEE International Conference on Web Services. IEEE Computer Society, 2015:472 - 478.
- 27 陈一稀. 区块链技术的“不可能三角”及需要注意的问题研究[J]. 浙江金融, 2016(2):17 - 20.
CHEN Y X. Research on the “impossible trinity” of block chain technology and the problems should pay attention to [J]. Zhejiang Finance, 2016(2):17 - 20. (in Chinese)
- 28 王永利. 区块链,下一代互联网金融革新新技术[J]. 博鳌观察, 2016(2):112 - 114.
- 29 杨琪, 龚南宁. 我国大数据交易的主要问题及建议[J]. 大数据, 2015, 1(2):38 - 48.
YANG Q, GONG N N. Reflections on big data exchange of China [J]. Big Data Research, 2015, 1(2):38 - 48. (in Chinese)
- 30 缪锦春. 区块链技术的研析及其在商业银行领域的应用建议[J]. 邵阳学院学报:社会科学版, 2017, 16(3):37 - 44.
MIAO J C. A research of block chain technology and its application in commercial banks [J]. Journal of Shaoyang University: Social Science, 2017, 16(3):37 - 44. (in Chinese)
- 31 SOMPOLINSKY Y, ZOHAR A. Secure high-rate transaction processing in bitcoin [J]. 2015, 8975:507 - 527.
-

(上接第 352 页)

- 13 杨翠容, 庞全, 张玉清. 智能 pH 控制及在化工过程控制中的应用[J]. 自动化仪表, 1999, 20(8):34 - 36.
YANG Cuirong, PANG Quan, ZHANG Yuqing. Intelligent pH control and its application in process control of chemical industry [J]. Process Automation Instrumentation, 1999, 20(8):34 - 36. (in Chinese)
- 14 许锋, 张艺, 罗雄麟, 等. 化工过程强非线性系统的变模型自适应预测控制[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(6):32 - 35.
XU Feng, ZHANG Yi, LUO Xionglin, et al. Varying model based adaptive predictive control of highly nonlinear process in chemical process [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2004, 31(6):32 - 35. (in Chinese)
- 15 AI-ADWAN I, KHAWALDAH M A, ASAD S, et al. Design of an adaptive fuzzy-based control system using genetic algorithm over a pH titration process [J]. Adwan, 2013, 40(6):57 - 65.
- 16 AI-JARRAH M. Design of multiregional supervisory fuzzy PID control of pH reactors [J]. Journal of Control Science & Engineering, 2015(2):41 - 45.
- 17 GHEE N T, KUMARESAN S, FAN L C. Fuzzy PID controller to control the pH neutralization process [C] // Research and Development, 2002. SCORed 2002. Student Conference on IEEE, 2002:330 - 334.
- 18 何献忠, 刘颖慧, 彭华夏, 等. 基于 MCGS 组态软件和神经网络自适应 PID 的 pH 过程控制[J]. 电气自动化, 2009, 31(2):40 - 42.
HE Xianzhong, LIU Yinghui, PENG Huasha, et al. The pH process control based on MCGS and neural network adaptive PID [J]. Electrical Automation, 2009, 31(2):40 - 42. (in Chinese)
- 19 LI N, LI S, XI Y. Modeling pH neutralization processes using fuzzy satisfactory clustering [C] // The IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 2001:308 - 311.
- 20 李林欢, 苏宏业, 张晓宇, 等. 新型模糊预测 PID 控制在 pH 中和过程中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30(3):33 - 35.
LI Linhuan, SU Hongye, ZHANG Xiaoyu, et al. Novel fuzzy predictive PID control for pH neutralization process [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2003, 30(3):33 - 35. (in Chinese)
- 21 穆永航, 李莉, 孟繁佳, 等. 复合式吸肥装置结构设计及性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):280 - 284.
MU Yonghang, LI Li, MENG Fanjia, et al. Design and performance test of combined fertilizer absorption device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):280 - 284. (in Chinese)
- 22 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)
- 23 韩启彪, 黄兴法, 刘洪禄, 等. 6 种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):113 - 117.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six venturi injectors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):113 - 117. (in Chinese)