

水肥一体机肥液电导率远程模糊PID控制策略

朱德兰^{1,2} 阮汉铖^{1,2} 吴普特^{1,3} 李景浩^{1,2} 陆丽琼^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为检测水肥一体机肥液电导率(EC),并将其控制在合理范围内,基于物联网技术,设计了远程水肥灌溉控制系统,将自整定模糊PID控制算法引入远程开发者服务终端中,通过模糊PID控制算法调控本地端变频注肥泵的频率进而精准控制EC,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。结果表明:目标EC越大,稳态EC越精确,但稳态时间和超调量均增大;与传统本地端PID控制相比,该系统响应速度快、EC波动幅度小、稳定,当目标EC为2.5 mS/cm时,稳态时间和超调量分别达到120 s和20.8%,混肥时间和实测EC均能满足水肥控制实际需求。该研究实现了EC的远程模糊PID控制,以及灌溉施肥系统的计算机、手机微信多终端灌溉数据监测和开关量控制。

关键词: 水肥一体机; 电导率; 模糊PID控制; 物联网

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0186-06 OSID: 

Strategy on Remote Fuzzy PID Control for Fertilizer Liquid Conductivity of Water Fertilizer Integrated Machine

ZHU Delan^{1,2} RUAN Hancheng^{1,2} WU Pute^{1,3} LI Jinghao^{1,2} LU Liqiong^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northeast A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Precision control of the concentration of fertilizer is an important part of the integrated control system of water and fertilizer. It is the foundation to realize precision fertilization by detecting the electric conductivity (EC) value of fertilizer and controlling it in a reasonable range. Based on Internet of things technology, the remote control system was designed and developed, self-tuning fuzzy PID control algorithm was introduced into the equipment in the terminal, and the fuzzy PID control algorithm was used to control the local end frequency of variable frequency pump, and in turn to realize the precise control of EC value, and the local end PID and remote end fuzzy PID control algorithm were validated through the contrast test. The results showed that the larger the target EC value was, the more accurate the steady-state EC value was, but the steady-state time and overshoot were increased. Compared with the traditional local PID control, the response speed of the system was fast, the EC fluctuation range was small and stable. When the target EC value was 2.5 mS/cm, the steady-state time and overshoot reached the maximum, which were 120 s and 20.8%, respectively. The mixing time and measured EC value could meet the actual demand of water and fertilizer control. The research not only realized the remote fuzzy PID control of EC value, but also realized the irrigation data monitoring and switching control of the computer, mobile phone and WeChat multi-terminal of the irrigation and fertilization system.

Key words: water fertilizer integrated machine; EC; fuzzy PID control; Internet of things

收稿日期: 2021-01-03 修回日期: 2021-03-05
基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY01-01)、国家外国专家局“111”计划项目(B12007)和国家自然科学基金项目(52009111)
作者简介: 朱德兰(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: dlzhu@126.com
通信作者: 吴普特(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事区域农业高效用水研究,E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

0 引言

水肥一体化是一项高效节水减肥的农业灌溉新技术,该项技术在提高水资源利用效率,促进农业节本增效方面意义重大^[1-4]。在对作物进行施肥灌溉过程中,施肥浓度控制在最优控制范围内有利于作物根系的发育及土壤中矿物质的吸收^[5]。随着物联网与 5G 技术的发展应用,数字技术能极大地提升农业生产效率^[6-7]。按照作物水肥需求进行“互联网+农业”模式的精准控制是实现农业智能化的关键。

水肥灌溉系统肥液浓度调控若存在严重非线性、时变性和滞后性等问题将影响智能灌溉系统的整体运行效率^[8-9]。目前,国内外主要采用 PID 控制和模糊控制策略来实现作物智能灌溉,取得了较好的控制效果。文献[10-12]基于 PID、模糊控制对水肥流量等进行控制并仿真。李加念等^[13]基于 PWM(Pulse width modulation)以输出相应的占空比来控制吸肥电磁阀的开闭,进行灌溉液电导率(EC)的动态调控。文献[14-19]设计了基于 FPGA、无线传感网络、ZigBee 和模糊控制决策相结合的自动灌溉系统,使控制系统具有良好的控制效果。文献[20-28]根据传感器采集的溶液电导率信息或酸碱度信息,采用模糊控制策略控制混肥泵、电磁阀等进行肥液或营养液的本地端在线自动混合,实现了水肥一体化的自动控制。赵景波等^[29]针对智能水肥一体机混肥浓度非线性问题,提出了一种变域模糊控制算法,但目前只有仿真结果。综上所述,PID 控制和模糊控制在变量施肥系统中得到了研究人员的广泛关注,也取得了部分成果,但主要是针对本地端对作物施肥灌溉进行单一的控制,以模拟仿真为主,对水肥灌溉系统进行远程智能化浓度控制研究相对较少。

本文基于物联网设计一个可实现计算机、手机微信多终端灌溉数据监测和开关量控制的远程水肥灌溉系统,以解决水肥灌溉系统 EC 调控非线性、时变性和滞后性等问题,实现对水肥一体化装置 EC 的远程模糊 PID 控制,通过对注肥泵变频调速改变吸肥量,动态调节灌溉液 EC,提升水肥控制精度和稳定性。

1 水肥灌溉系统

1.1 系统结构与与设计

水肥灌溉系统结构如图 1 所示,该水肥灌溉系统由供水组件、吸肥组件及控制组件 3 部分组成。供水组件主要由蓄水池、自吸离心变频泵组成,为施肥和灌溉提供水源和动力。吸肥组件主要由肥

液罐、文丘里管、变频注肥泵组成。肥液罐用来存储肥液;变频注肥泵提供动力,注肥泵驱动水流流经文丘里管喉口,产生负压,吸入肥液,将肥液注入主管混合。控制组件主要由传感单元、上位机、控制器组成。传感单元用来采集流量、压力、EC 信息,为系统软件进行水肥耦合调控提供决策数据;上位机主要包括本地端触摸屏和远程用户终端设备(手机或计算机);控制器 PLC 主要接收上位机指令,对水肥灌溉系统的开关量、变频注肥泵转速进行控制。

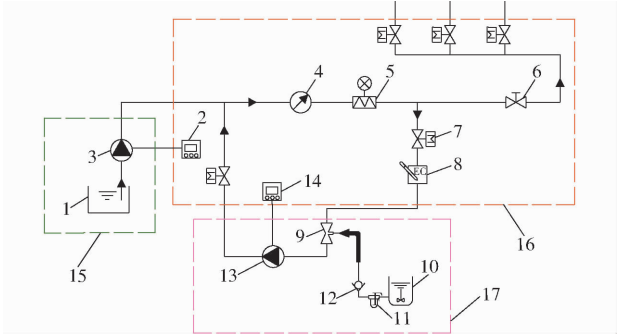


图 1 水肥灌溉系统总体结构示意图

Fig. 1 Water fertilizer irrigation system structure drawing

1. 蓄水池 2. 恒压供水系统 3. 自吸离心变频泵 4. 压力表
5. 电磁流量计 6. 手动阀门 7. 电磁阀 8. EC 传感器 9. 文丘里管 10. 肥液罐 11. 叠片过滤器 12. 单向阀 13. 变频注肥泵
14. 变频控制系统 15. 供水组件 16. 控制组件 17. 吸肥组件

1.2 肥液 EC 模型分析

肥液混合模型选择典型的一阶滞后模型。 $M(t)$ 表示文丘里管的吸肥量,由于文丘里管的吸肥量、进口流量与变频注肥泵频率有关,将其改为与频率 $f(t)$ 有关的变量,表示为 $f(t)q_w$ 、 $f(t)q_m$,根据质量守恒定理,有

$$\frac{d(V_T C(t))}{dt} = C_1 f(t) q_w + C_0 f(t) q_m - C(t) q_2 \quad (1)$$

- 式中 V_T ——混肥管道中肥液体积, L
 $C(t)$ ——混肥管道中和出水管肥液浓度, %
 C_0 ——进水管中肥液浓度, %
 C_1 ——肥液罐中肥液浓度, %
 q_w ——文丘里管最大吸肥量, L/h
 q_m ——主管进口最大流量, L/h
 q_2 ——主管出口流量, L/h
 t ——变频注肥泵工作时间, s

等式左边是混肥管道中肥液质量的微分,右边表示进水管中肥液质量与文丘里管吸收的各个母液的肥液质量之和减去出水管中肥液的质量。由于浓度与 EC 成正比关系^[30],式(1)可变为

$$\frac{d(V_T E(t))}{dt} = E_1 q_w f(t) + E_0 q_m f(t) - q_2 E(t) \quad (2)$$

式中 $E(t)$ ——混肥管道中和出水管肥液的 EC, mS/cm

E_0 ——进水管中清水的 EC, mS/cm

E_1 ——肥液罐中肥液的 EC, mS/cm

将式(2)进行拉普拉斯变换后得

$$E(s) = \frac{E_1 q_w + E_0 q_m}{V_T s + q_2} m(s)$$

(3)

由式(3)可知,控制响应特征为一阶线性系统。在实际试验中,设备工作时出口压力为 0.35 MPa,根据实测数据, $V_T = 50\text{ L}$, $q_m = 3\ 000\text{ L/h}$, $q_w = 640\text{ L/h}$, $E_1 = 10\text{ mS/cm}$, $E_0 = 0.6\text{ mS/cm}$,滞后时间为 10 s。将上述变量代入式(3)得 EC 的近似传递函数为

$$H(s) = \frac{E(s)}{m(s)} = \frac{2.74}{60s + 1} e^{-10s}$$

(4)

2 远程模糊 PID 控制系统设计

2.1 远程控制系统结构

远程控制系统由本地端、远程端两部分组成,组成结构如图 2 所示。本地端主要由三菱 FX-3u 系列 PLC、云盒(上海智能科技有限公司)、触摸屏(MT6103iP 型)、电磁阀、变频注肥泵(广东凌霄泵业有限公司,量程:0~5 m³/h)、EC 传感器(南京昊科电子有限公司,量程:0~20.0 mS/cm)等组成,云盒与 PLC 通过 RS-232 有线连接,PLC 通过 RS-485 总线与触摸屏连接;远程端主要由云端服务器、用户终端设备、开发者服务终端组成。EC 传感器通过 RS-485 总线与云盒连接,本地端通过云盒与远程端进行动态数据交换;用户终端设备主要包括用户计算机或手机微信小程序,实现对本地端设备进行远程操作控制;开发者服务终端通过 API 接口与云端服务器连接,主要对传感器数据进行存储、控制算法处理,PLC 的 DA 模块将远程控制算法输出数



图 2 远程控制系统框图

Fig. 2 Remote control system diagram

据输入,控制变频注肥泵变频调速,改变注入主管的肥液量进而实时控制水肥灌溉系统出口肥液 EC。

2.2 模糊 PID 调控方法设计

2.2.1 模糊 PID 控制器设计

模糊自整定 PID 控制器由模糊控制器和 PID 控制器两部分组成,其基本原理框图如图 3 所示。该控制器以 EC 误差 e 和误差变化率 e_c 为输入量,经过模糊化和模糊推理后得到 PID 控制器的 3 个控制参数修正量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ,实现 PID 控制器的 3 个参数 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的在线修正,最后实现控制变频注肥泵频率以调整肥液 EC。

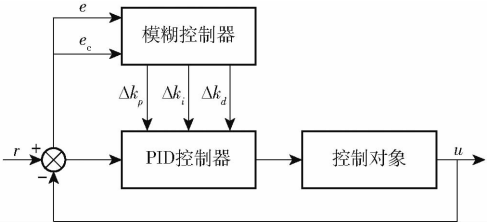


图 3 模糊自整定 PID 控制器结构框图

Fig. 3 Structure of fuzzy self-tuning PID controller

自整定 PID 3 个参数修正公式为

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases}$$

(5)

式中 k_p ——整定后比例系数
 k_i ——整定后积分系数
 k_d ——整定后微分系数
 k_{p0} ——整定前比例系数
 k_{i0} ——整定前积分系数
 k_{d0} ——整定前微分系数
 Δk_p ——比例系数修正量
 Δk_i ——积分系数修正量
 Δk_d ——微分系数修正量

2.2.2 模糊论域及隶属度函数

云端远程实时采集的 EC 与目标值的误差 e 和误差变化率 e_c 的语言变量模糊子集均取为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), Z(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}, 量化为 7 个等级,模糊论域均取为 {−3, −2, −1, 0, 1, 2, 3}, 模糊子集选用三角形隶属度函数,隶属度函数如图 4 所示。

2.2.3 控制规则制定

模糊控制规则表是根据水肥灌溉系统中 EC 变化规律和人员经验,综合考虑水肥灌溉系统的稳定性、超调量及响应速度等因素而建立的关系表。通过分析和仿真调整,针对水肥灌溉控制系统,制定 PID 控制器 3 个参数调整量的模糊规则,以 Δk_p 为例,其控制规则如表 1 所示。

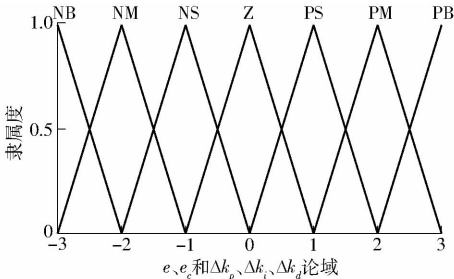


图 4 e 、 e_c 和 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的隶属度函数曲线

Fig.4 Membership function curves of e , e_c and Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d

表 1 Δk_p 的模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control rules of Δk_p

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

2.2.4 解模糊计算

在水肥灌溉控制系统中,经过模糊逻辑推理后,得到 PID 的 3 个控制参数的模糊集合,不能直接转换为精确量输出,必须经过解模糊。本研究采用重心法解模糊化,将输出量 k_p 、 k_i 、 k_d 提前清晰化,转换成相应的量化值,然后将运算结果填入模糊控制查询表中,储存在计算机系统中,以 Δk_p 的模糊控制查询为例,结果见表 2。系统运行时,通过查询表格,即可得出确定的输出量,再乘上相应的比例因子,得到相应的频率模拟量,通过 PLC 控制器 D/A 转换输出到变频器,进而控制变频注肥泵改变文丘里管吸肥量,完成其变频控制。

表 2 Δk_p 的模糊控制查询

Tab.2 Fuzzy control query of Δk_p

e_c	e						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	0	0
-2	3	3	2	2	1	0	-1
-1	0	2	2	1	0	-1	-2
0	2	2	1	0	-1	-2	-2
1	2	1	0	-1	-2	-2	-2
2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3
3	0	0	-2	-2	-2	-3	-3

3 试验验证

试验装置如图 1 所示,在西北农林科技大学旱

区节水农业研究院灌溉水力学实验大厅进行,试验中通过变频恒压供水系统(量程 0~0.5 MPa,精度 ± 0.005 MPa)提供试验所需的主管恒定水压。肥液罐中的母液为使用硝酸钾肥料配制成 EC 为 10 mS/cm 的溶液,使用 EC 传感器实时检测灌溉出口 EC,电磁流量计(EMF-5000 型)检测主管进口流量,EC 通过云盒上传至云端进行实时记录。试验操作时通过水肥灌溉系统的触摸屏或用户终端设备上设置施肥配方、阀门开闭、灌溉策略和目标 EC 等内容。

保持主管压力为 0.35 MPa,主管出口流量为 3 m³/h,采用远程模糊 PID 控制算法和本地端 PID 控制算法,采样周期定为 5 s,连续测量 300 s。设定不同 EC 进行对比试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同 EC 设定值的试验对比结果

Tab.3 Comparison results of different EC settings

控制方式	目标 EC/ (mS·cm ⁻¹)	稳态 EC/ (mS·cm ⁻¹)	EC 波动幅度/ (mS·cm ⁻¹)	稳态时 间/s	超调 量/%
远程模糊 PID 控制	1.5	1.38~1.63	0.25	100	15.4
	1.8	1.70~1.90	0.20	112	16.2
	2.0	1.93~2.10	0.17	115	17.9
本地端 PID 控制	2.5	2.47~2.52	0.05	120	20.8
	1.5	1.20~1.82	0.62	118	19.6
	1.8	1.60~2.12	0.52	127	21.9
PID 控制	2.0	1.80~2.21	0.41	135	23.5
	2.5	2.35~2.67	0.32	141	25.1

由表 3 可知,当目标 EC 越大,采用远程模糊 PID 控制或本地端 PID 控制时,EC 波动幅度越小,稳态 EC 越精确,但稳态时间和超调量均增大,即滞后性增大,稳定性增强;在同一目标 EC 时,采用远程模糊 PID 控制相较于本地端 PID 控制 EC 波动幅度小,响应快,超调量小;模糊 PID 控制策略调控水肥所需时间为 100~120 s,一般水肥一体化设备应用于日光温室生产实践中时,水肥从设备灌溉出口达到滴头的时间至少在 2 min 以上^[30]。由此可见,所开发的基于物联网的远程水肥灌溉控制系统能够满足实际施肥灌溉需求。

4 结论

(1)在文丘里吸肥器的基础上,利用物联网技术搭建了一个远程水肥灌溉系统,实现了水肥灌溉系统的计算机、手机微信多终端灌溉数据监测和开关量控制,在远程开发终端使用控制策略实现对水肥灌溉系统 EC 的实时变频调控。

(2)在确定的使用环境下,简化了水肥装置混肥的数学过程,建立了操作性强的一阶滞后线性系

统模型,为水肥 EC 调控策略提供理论依据。

(3)根据水肥 EC 调控的滞后和不稳定性,调控系统采用远程模糊 PID 控制策略。通过设定不同目标值与本地端 PID 控制对比试验发现,目标 EC 越

大,稳态 EC 越精确,但稳态时间和超调量均增大;在同一目标 EC 时,采用远程模糊 PID 控制相较于本地端 PID 控制其波动幅度小,响应快,超调量小,能够满足实际施肥灌溉需求。

参 考 文 献

[1] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019,1(1):1-7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7. (in Chinese)

[2] 马静楠. 推进水肥一体化的前景[J]. 江西农业, 2019(14):25.
MA Jingnan. The prospect of promoting the integration of water and fertilizer[J]. Jiangxi Agriculture, 2019(14):25. (in Chinese)

[3] 马富裕, 刘扬, 崔静, 等. 水肥一体化研究进展[J]. 新疆农业科学, 2019,56(1):183-192.
MA Fuyu, LIU Yang, CUI Jing, et al. Research progress on integration of water and fertilizer[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019,56(1):183-192. (in Chinese)

[4] 彭发智, 张俊杰, 焦海涛, 等. 水肥一体智能化高效精准灌溉的发展趋势[J]. 河北农机, 2017(10):23.
PENG Fazhi, ZHANG Junjie, JIAO Haitao, et al. Development trend of intelligent, efficient and precise irrigation integrating water and fertilizer[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2017(10):23. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 于莲花, 高清芬. 物联网技术在智慧农业中的应用研究[J]. 南方农机, 2020,51(22):54-55.
YU Lianhua, GAO Qingfen. Application research of Internet of things technology in intelligent agriculture [J]. Southern Agricultural Machinery, 2020,51(22):54-55. (in Chinese)

[7] 宋九林, 刘翠玲. 设施蔬菜物联网水肥一体化微喷技术的应用[J]. 河南农业, 2020(31):18-19.
SONG Jiulin, LIU Cuiling. Application of integrated micro-injection technology of water and fertilizer in the Internet of things of facility vegetables[J]. Henan Agriculture, 2020(31):18-19. (in Chinese)

[8] 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):250-255.
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):250-255. (in Chinese)

[9] 白银, 邓忠. 基于三菱 PLC 的流量 PID 过程控制系统的设计[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2018,33(3):26-28.
BAI Yin, DENG Zhong. The design of the flow PID process control system based on PLC[J]. Journal of Jiujiang University (Natural Sciences), 2018,33(3):26-28. (in Chinese)

[10] 於沈刚, 马明舟, 岳雪峰, 等. 模糊 PID 智能灌溉控制器的设计及 MATLAB 仿真[J]. 节水灌溉, 2018(5):92-95.
YU Shen'gang, MA Mingzhou, YUE Xuefeng, et al. Design and MATLAB simulation of intelligent irrigation controller based on fuzzy PID algorithm[J]. Water Saving Irrigation, 2018(5):92-95. (in Chinese)

[11] 张志强, 张文爱, 王秀, 等. 盆栽作物自动灌溉装置设计与试验研究——基于 PLC[J]. 农机化研究, 2014,36(10): 112-114.
ZHANG Zhiqiang, ZHANG Wenai, WANG Xiu, et al. Design and experiment of potted plants automatic irrigation system—based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(10):112-114. (in Chinese)

[12] 王顺杰, 王润田. 在线自适应模糊 PID 控制器的设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2012(8):975-978.
WANG Shunjie, WANG Runtian. Design and simulation of self-adaptive fuzzy-PID controller[J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2012(8):975-978. (in Chinese)

[13] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013,29(16):22-30.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 22-30. (in Chinese)

[14] 张瀚中, 曹江涛, 邵鹏飞, 等. 基于 WSNs 的温室大棚智能灌溉控制系统设计[J]. 控制工程, 2019,26(1):108-113.
ZHANG Hanzhong, CAO Jiangtao, SHAO Pengfei, et al. Research on WSNs-based intelligent water saving irrigation control system for greenhouse[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1):108-113. (in Chinese)

[15] GOAP A, SHARMA D, SHUKLA A K, et al. An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,155(2):41-49.

[16] 孙裔鑫, 梁春英, 王熙. 基于模糊 PID 的变量施用颗粒肥控制算法的研究[J]. 安徽农业科学, 2011,39(12):7435-7436.
SUN Yixin, LIANG Chunying, WANG Xi. Research on variable particle fertilizer application control algorithm based on fuzzy PID[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011,39(12):7435-7436. (in Chinese)

[17] XIANG X. Design of fuzzy drip irrigation control system based on ZigBee wireless sensor network[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011:495-501.

- [18] 杨青杰. 基于模糊控制的 PLC 施肥灌溉控制技术的研究[D]. 北京：中国农业大学, 2005.
YANG Qingjie. Study on PLC fertilization and irrigation control technology based on fuzzy control[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [19] 许景辉, 王雷, 谭小强, 等. 基于 SOA 优化 PID 控制参数的智能灌溉控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 261 – 267.
XU Jinghui, WANG Lei, TAN Xiaoqiang, et al. Application of PID control based on SOA optimization in intelligent irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 261 – 267. (in Chinese)
- [20] 么丽丽. 基于 PLC 和 MB + 的灌溉施肥模糊控制系统的设计[D]. 太原：太原理工大学, 2012.
MO Lili. Design of fuzzy control system for irrigation fertilization based on PLC and MB + [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [21] 周亮亮, 柯建宏. 基于模糊控制的温室灌溉施肥控制系统[J]. 浙江农业科学, 2012, 53(12): 1648 – 1652.
ZHOU Liangliang, KE Jianhong. Fertilizer control system for greenhouse irrigation based on fuzzy control[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2012, 53(12): 1648 – 1652. (in Chinese)
- [22] 雷永富. 水肥耦合灌溉控制系统研究[D]. 武汉：华中农业大学, 2006.
LEI Yongfu. Research on water-fertilizer coupled irrigation control system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [23] 张琼. 基于嵌入式的灌溉施肥系统的研究[D]. 合肥：中国科学技术大学, 2009.
ZHANG Qiong. Research on embedded irrigation fertilization system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [24] 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(增刊): 347 – 352.
LI Shuaishuai, LI Li, MU Yonghang, et al. pH value control system of nutrient solution based on Fuzzy – Smith controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 347 – 352. (in Chinese)
- [25] 牛寅, 张侃谕. 轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程变论域模糊控制[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 45 – 52.
NIU Yin, ZHANG Kanyu. Variable universe fuzzy control of water-fertilizer mixing process in fertigation system under rotational irrigation situation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 45 – 52. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 赵学观, 王秀, 何亚凯, 等. 基于光谱信息的玉米变量追肥控制系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 37 – 44.
ZHAO Xueguan, WANG Xiu, HE Yakai, et al. Optimal design and experiment of variable topdressing control system for corn based on spectral information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 37 – 44. (in Chinese)
- [28] 张继成, 严士超, 纪文义, 等. 基于增量式 PID 算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 99 – 106.
ZHANG Jicheng, YAN Shichao, JI Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 99 – 106. (in Chinese)
- [29] 赵景波, 张文彬, 朱敬旭辉, 等. 智能混肥控制系统水肥浓度控制策略研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 236 – 242.
ZHAO Jingbo, ZHANG Wenbin, ZHU Jingxuhui, et al. Study on water and fertilizer concentration control strategy of intelligent mixed fertilizer control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 236 – 242. (in Chinese)
- [30] 王海华, 付强, 孟繁佳, 等. 模糊与 PI 分段调控肥液 EC 的优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 110 – 116.
WANG Haihua, FU Qiang, MENG Fanjia, et al. Optimal design and experiment of fertilizer EC regulation based on subsection control algorithm of fuzzy and PI[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 110 – 116. (in Chinese)