

荔枝园智能灌溉决策系统模糊控制器设计与优化

谢家兴^{1,2} 高鹏¹ 莫昊凡¹ 余国雄^{1,3} 胡洁¹ 王卫星^{1,4}

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 广东省智慧果园科技创新中心, 广州 510642;

3. 中国移动通信集团广东有限公司, 江门 529030; 4. 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广州 510642)

摘要: 为解决荔枝园灌溉中水资源浪费严重的问题,根据现有装备条件,设计了基于无线传感器网的模糊专家决策系统,并对系统的模糊控制器进行优化以提升系统整体性能。该系统通过网关节点实时接收来自传感器节点采集的荔枝园环境信息,选择土壤实测含水率与预设土壤最佳含水率的误差及其变化率作为决策因子,得出预测灌溉值等决策结果。通过 Matlab 仿真并进行果园实地试验,分析该系统的有效性。仿真结果表明,该智能灌溉系统能结合荔枝园土壤含水率情况进行适时、适量灌溉,有效实现了经济灌溉,并且优化后的模糊灌溉系统实现了更高的暂态性能、控制精度及抗干扰性,系统响应时间更快。试验结果表明,基于模糊控制器的智能灌溉系统能有效地对荔枝园灌溉进行控制,使荔枝园土壤含水率维持在 17.8% 左右,符合荔枝树的生长环境;同时,基于优化后的模糊控制器的智能灌溉系统将荔枝园土壤含水率平均值控制在 17.6%,更接近系统预设的荔枝园土壤最佳含水率 17%,并且具有更高的控制精度、更强的抗干扰性与实用性。

关键词: 荔枝园; 智能灌溉; 模糊控制; 仿真

中图分类号: S274.2; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0026-07

Design and Optimization of Intelligent Irrigation Decision System
in Litchi Orchard Based on Fuzzy Controller

XIE Jiaying^{1,2} GAO Peng¹ MO Haofan¹ YU Guoxiong^{1,3} HU Jie¹ WANG Weixing^{1,4}

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Guangdong Modern Agricultural Science and Technology Innovation Center for Intelligent Orchard, Guangzhou 510642, China

3. China Mobile Group Guangdong Co., Ltd., Jiangmen Branch, Jiangmen 529030, China

4. Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to solve the problem about the serious waste of water resources for irrigation in litchi orchard, a fuzzy expert system was designed based on wireless sensor network according to the existing equipment conditions, and the fuzzy controller was optimized in order to improve the performance of this system. In this system, the environment information of litchi orchard was collected from sensor nodes through gateway nodes in real time. The error and changing rate of measured water content of soil and optimum moisture content of soil were selected as the decision factors and the results of forecasting irrigation values were obtained. The effectiveness of the system was analyzed by Matlab simulation and field test. Simulation results showed that this intelligent irrigation system based on the basic fuzzy controller can be combined with the timely and proper irrigation and it realized the economic irrigation effectively. And the optimized fuzzy irrigation system had better transient performance, control precision and anti-jamming, and the system response time was faster. Test results showed that the intelligent irrigation system based on the basic fuzzy controller can control the irrigation in litchi orchard effectively. It kept the soil moisture content at 17.8% in litchi orchard, which was good for the growth of litchi. The intelligent irrigation system based on the optimized fuzzy controller was able to control the average soil moisture content in litchi orchard at 17.6%, which was closer to the optimal soil moisture content of

收稿日期: 2018-02-14 修回日期: 2018-06-09

基金项目: 广西科技重点研发计划项目(桂科 AB16380286)、国家荔枝龙眼产业技术体系建设专项资金项目(CARS-32-14)、广州市科技计划项目(201605030013)、广东省自然科学基金项目(2015A030310334)和广东省科技计划项目(2017A020208049)

作者简介: 谢家兴(1979—),男,讲师,博士,主要从事农业物联网和电子信息技术研究,E-mail: xjx1998@scau.edu.cn

通信作者: 王卫星(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业物联网与无线传感器网络等研究,E-mail: weixing@scau.edu.cn

litchi orchard in the system. And it had a higher control accuracy, as well as stronger anti-interference and practicality.

Key words: litchi orchard; intelligent irrigation; fuzzy control; simulation

0 引言

我国荔枝种植总面积 60 万 hm^2 , 占世界荔枝总面积的 75%; 荔枝总产量 190.66 万 t, 占世界荔枝总产量的 47.78%, 占世界生产总值的 57.75% 以上, 目前仍呈增大趋势^[1-2]。荔枝园主要采用的传统漫灌技术对水资源造成较大浪费^[3-7]。同时, 荔枝园所处环境复杂, 受光照、土壤湿度、空气湿度、降雨等条件影响, 由人为主观意识产生的判断有较大不确定性及误差, 易造成较大经济以及资源浪费。因此, 开发一种荔枝园智能控制系统对荔枝园进行现代化管理, 以最大化节约资源, 势在必行。

目前, 郭正琴等^[8]设计了基于模糊控制的智能灌溉控制系统, 杨翠翠^[9]设计了基于无线网络的环境监测与智能控制灌溉系统, 张晓光等^[10]设计了节水灌溉的模糊系统, 高玉芹^[11]设计了基于 ZigBee 和模糊控制决策的自动灌溉系统。以上系统仅设计了基本模糊控制器, 而基本模糊控制器稳态性能低, 存在稳态误差等。基于此, 本文设计基于模糊控制技术的荔枝园智能灌溉决策系统, 对基本模糊控制器进行优化, 提升其控制精确度与稳定性, 对所接收数据进行更好的决策和控制。

1 智能灌溉模糊控制软件设计

模糊专家决策系统接收传感器节点采集的土壤含水率数据, 根据专家系统的模糊规则实时推理出灌溉量, 进行灌溉。

对荔枝园灌溉环境分析可得, 用于荔枝智能灌溉的模糊专家系统为多维的模糊控制专家系统, 根据灌溉过程中的人为经验, 将专家的经验、知识库抽象化为模糊控制中的模糊规则, 选择不确定性推理的确定性模型作为本专家系统的推理机, 该模型简单实用, 已被应用到一些实用的专家系统之中^[7]。模糊专家决策系统的模糊控制流程图如图 1 所示。

荔枝园中的环境信息包括温度、空气湿度、光照度和土壤含水率等, 影响荔枝生长的关键因素是土壤含水率。在实际灌溉中, 通常根据土壤含水率来决定荔枝是否需要灌溉。

荔枝在不同生长周期里所需的土壤最佳含水率均有所不同, 所以本系统在确定荔枝的生长周期后, 选用该周期土壤最佳含水率与土壤实测含水率的差 E , 及其误差变化率 E_c 为 2 个输入变量, 土壤需水量

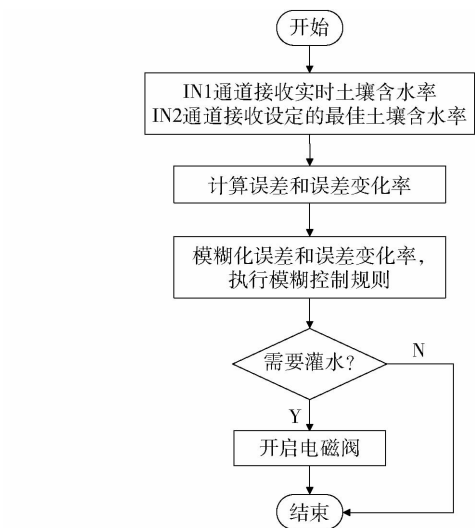


图 1 模糊控制流程图
Fig. 1 Flow chart of fuzzy control

U 作为其输出量, 后将 E 和 E_c 输入模糊控制器进行模糊化控制, 通过模糊决策产生灌溉指令来控制灌溉执行机构, 实现灌溉。其中, 模块 K_1 、 K_2 、 K_3 起调幅作用, 确保系统的稳定性, 其总体结构如图 2 所示。

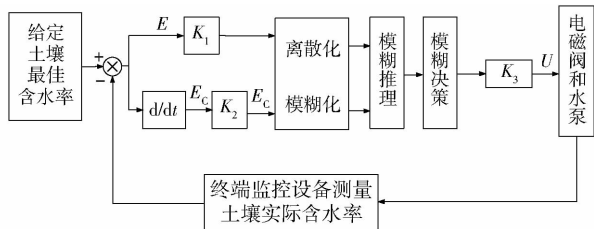


图 2 荔枝园智能灌溉系统总体结构图
Fig. 2 Overall structure diagram of intelligent irrigation system in litchi orchard

2 智能灌溉模糊控制器设计

2.1 理论基础

模糊控制器是以模糊集合理论和模糊推理为基础, 模拟人的思维方式, 能总结丰富的操作经验, 从而用自然语言表述控制策略或者通过大量实际操作归纳总结出多个控制规则, 并用计算机实现自动控制^[12-14]。模糊控制是一种非线性控制方法, 无需建立精确的数学模型, 鲁棒性强, 非常适合时变以及滞后系统的控制^[15]。

2.2 模糊控制器设计

2.2.1 模糊语言变量设计

根据荔枝园灌溉专家经验及周边环境对荔枝灌溉的影响, 确定控制量为土壤湿度、降雨量、空气湿

度等,由于土壤含水率可以反映土壤中水分的含量,而水分是作物生长不可或缺的因素之一,因而土壤含水率可以作为判断作物缺水与否的最佳条件^[16-17]。本文选用给定土壤最佳含水率与土壤实测含水率的差 E 及其误差变化率 E_c 为两个输入变量。

为了提高控制精度,设置多个语言变量。其中误差 E 和输出变量 U 的模糊语言值设定为 9 个,即 {NB(负大),NM(负中),NS(负小),NW(负微),ZO(零),PW(正微),PS(正小),PM(正中),PB(正大)}, E_c 的模糊语言值设定为 7 个,即 {NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大)}。 E 的基本论域为 $\{-15,15\}$,模糊论域 D 为 $\{-6,-4,-2,0,2,4,6\}$, E_c 的基本论域为 $\{-10,10\}$,模糊论域 X 为 $\{-6,-4,-2,0,2,4,6\}$, U 的基本论域为 $\{-15,15\}$,模糊论域 Y 为 $\{-10,-7.5,-5,-2.5,0,2.5,5,7.5,10\}$ 。表 1 是用 Matlab 软件模糊控制工具箱设计的模糊控制规则表。

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Rules of fuzzy control

E_c	E								
	NB	NM	NS	NW	ZO	PW	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NW	NS	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NS	NS	ZO	NW	NS	ZO	PW
NS	NB	NM	NW	NW	ZO	ZO	ZO	PW	PS
ZO	NM	NS	NW	ZO	ZO	ZO	PW	PS	PM
PS	NS	NW	ZO	ZO	ZO	PW	PW	PM	PB
PM	NW	ZO	PW	PW	ZO	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PS	PW	PM	PM	PB	PB

误差的量化因子 K_e 、误差变化率的量化因子 K_{ec} 和控制量的比例因子 K_u 的计算公式为

$$K_e = \frac{n_1}{|e_{\max}|} \tag{1}$$

$$K_{ec} = \frac{n_2}{|e_{\max}|} \tag{2}$$

$$K_u = \frac{|u_{\max}|}{m} \tag{3}$$

式中 $n_1、n_2、m$ ——误差 E 、误差变化率 E_c 、输出变量 U 的模糊论域最大值

$e_{\max}、e_{c\max}、u_{\max}$ ——误差 E 、误差变化率 E_c 和输出变量 U 的基本论域最大值

计算结果为 $K_e=0.4,K_{ec}=0.6,K_u=1.5$ 。

选择隶属函数时,因三角形隶属函数有简化计算、易于实现的特性,模糊语言变量模糊化的隶属函数类型选择以简单的三角形为主。在误差变量 E 中还增用了梯形。三角形、梯形隶属函数的解析表

达式为

$$f(x,a,b,c) = \begin{cases} 0 & (x \leq a) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a < x < b) \\ \frac{c-x}{c-b} & (b \leq x < c) \\ 0 & (x \geq c) \end{cases} \tag{4}$$

$$f(x,a,b,c,d) = \begin{cases} 0 & (x \leq a) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a < x < b) \\ 1 & (b \leq x \leq c) \\ \frac{d-x}{d-c} & (c < x < d) \\ 0 & (x \geq d) \end{cases} \tag{5}$$

其中 $a、b、c、d$ 均为确定形态的重要参数,且 $a \leq b \leq c \leq d$ 。

具体隶属函数分布如图 3~5 所示。

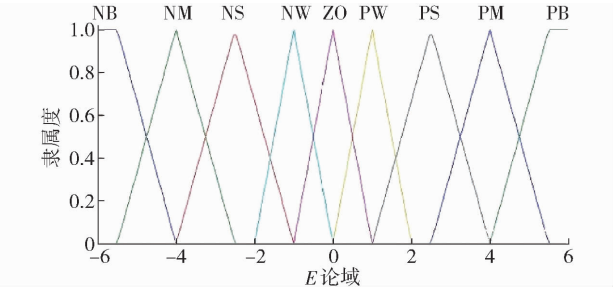


图 3 误差变量 E 的隶属函数

Fig.3 Membership function of fuzzy variables E error

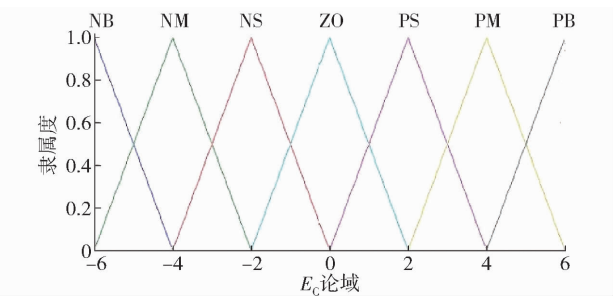


图 4 误差变化率 E_c 的隶属函数

Fig.4 Error rate membership function of fuzzy variables E_c

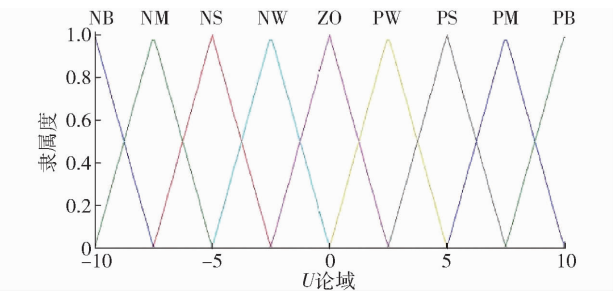


图 5 输出变量 U 的隶属函数

Fig.5 Output membership function of fuzzy variables U

2.2.2 模糊规则设计

根据灌溉经验与实测数据,制定出模糊推理规

则,规则采用 IF-THEN 语句,例如,if (E is A) and (E_c is B),then(U is C)。其中, A 、 B 、 C 分别是误差 E 、误差变化率 E_c 和控制量 U 论域在 X 、 Y 、 Z 方向上的模糊集。模糊控制表的设计原则为:当误差较大时,控制量的变化应尽量减少误差;当误差较小时,在消除误差外,需要同时考虑系统的稳定性,避免系统产生超调,甚至震荡,确保其稳定性^[18]。其详细规则如表 1 所示。

2.2.3 反模糊化

反模糊化是将根据模糊规则决策后的模糊量转换为清晰量的过程,反模糊化的方法有面积重心法、面积平分法、最大隶属度法。其中,面积重心法直观合理,计算数据精确,故本文采用面积重心法进行反模糊化。面积重心法即求出模糊集合隶属函数曲线和横坐标包围区域面积的中心,选该点对应的横坐标 U_{cen} 作为该模糊集合的代表值。若论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, u_j 处的隶属度为 $A(u_j)$,则 U_{cen} 的计算公式为

$$U_{cen} = \frac{\sum_{j=1}^n u_j A(u_j)}{\sum_{j=1}^n A(u_j)}$$

(6)

2.2.4 模糊控制器的输出

运用 Matlab 软件的 Simulink 工具箱对模糊控制进行仿真。根据建立的模糊库,可以得到如图 6 所示的模糊规则曲面图。从图 6 可以看出输入、输出变量的关系,土壤含水率低,所需灌溉量增加,而土壤含水率较高,则所需灌溉量相应减少。

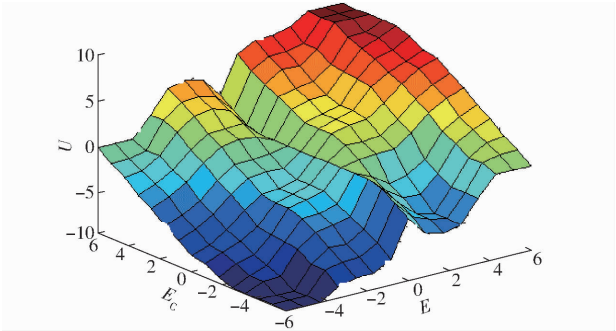


图 6 输入、输出变量关系曲面图

Fig. 6 Input-output variable relation surface graph

3 仿真与试验

3.1 仿真模型

假定由执行机构和被控对象组成的灌溉系统广义对象的数学模型为典型二阶环节^[19],其数学表达式为

$$G(s) = \frac{20}{1.6s^2 + 4.4s + 1}$$

(7)

利用 Matlab 中的 Simulink 工具箱,构建二维模糊控制系统仿真模型,如图 7 所示。

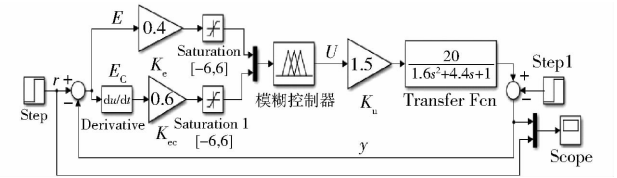


图 7 二维模糊控制系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of basic fuzzy control system

下面对模糊控制和 PID 控制的控制性能进行分析比较。对同样的被控系统,建立 PID 控制,对于该二阶系统,根据多次试验得整定 PID 控制的参数 $K_p = 0.284$, $K_i = 0.03$, $K_d = 0.626$,设置阶跃信号产生时间为 1 s。具体的 PID 控制器系统仿真图如图 8 所示。在 PID 控制和模糊控制系统中分别在 40 s 时以幅值 0.3 V 的阶跃信号作为干扰信号,仿真时间改为 60 s,仿真结果如图 9 所示。

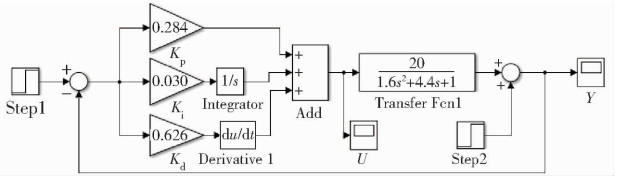


图 8 PID 控制器系统仿真图

Fig. 8 PID controller system simulation diagram

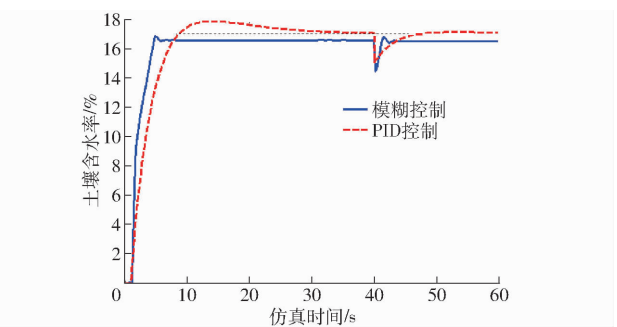


图 9 PID 与模糊控制仿真比较

Fig. 9 Comparison of PID and fuzzy control simulation

在 40 s 处加入干扰信号可比较两种控制器的抗干扰性,由仿真结果可得出仿真数据,如表 2 所示。

表 2 模糊控制器与 PID 控制器性能指标
Tab.2 Performance index between fuzzy controller and PID controller

参数	模糊控制器	PID 控制器
超调量/%	1.65	2.80
超调时间/s	4.6	10.1
上升时间/s	4.3	9.8
稳态误差	0.55	0.28

由表 2 可得,模糊控制器和 PID 控制器都可以实现对被控系统的控制。PID 控制超调量大,调节

时间长,动态性能差,但控制精度较高,模糊控制则相反,动态性能好,基本没有超调,受到干扰后在更短的时间将信号调整到正常值,即具有更强的抗干扰性。但存在模糊化而引起的稳态误差,总体性能较 PID 控制器更适应本系统。

3.2 果园试验

为验证该系统的有效性,本文选取华南农业大学园艺学院荔枝园进行实地试验,试验现场采集数据的传感器节点如图 10 所示。



图 10 传感器节点
Fig. 10 Sensor node

在荔枝园内的 2 个区域进行系统智能灌溉性能测试,其中一个区域(A 区)部署一个传感器节点和一个电磁阀节点,传感器节点和电磁阀节点采用相同的 PCB 板,区别为传感器节点外接土壤含水率传感器,电磁阀节点外接双稳态脉冲电磁阀模块,实物图如图 11 所示。



图 11 PBC 板、传感器和电磁阀模块实物图
Fig. 11 Sensor and solenoid valve nodes

传感器节点每隔 30 min 监测一次土壤含水率,并智能控制电磁阀对荔枝树的灌溉。另一个区域(B 区)部署一个传感器节点,用来监测该区域的土壤含水率,但不灌溉。其中土壤含水率 17% 为荔枝树生长最佳环境。2016 年 4 月 7—24 日土壤含水率如表 3 所示。

由表 3 可知,在试验期内,A 区通过智能灌溉方法,使得该区的土壤含水率平均值为 17.85%,均高于荔枝生长的最佳土壤含水率的下限(15.55%),达到预期灌溉效果^[20-21],并且高于 B 区土壤含水率平均值 7.75%。A 区每次灌溉时,其土壤含水率均会迅速上升,然后缓慢下降,说明系统根据模糊规则及时调节土壤湿度,有较强实时性,反应速度快,较好地满足了荔枝生长的需要。

3.3 模糊控制器优化仿真

Simulink 仿真的本质是利用某种求解器对系统

表 3 土壤含水率

Tab. 3 Soil moisture content data %		
日期	A 区	B 区
4 月 7 日	18.5	18.1
4 月 8 日	16.5	16.5
4 月 9 日	15.8	14.2
4 月 10 日	22.9	11.6
4 月 11 日	18.5	8.2
4 月 12 日	15.6	7.1
4 月 13 日	19.5	8.4
4 月 14 日	16.2	6.3
4 月 15 日	15.7	5.2
4 月 16 日	20.3	4.1
4 月 17 日	17.4	3.2
4 月 18 日	15.8	3.5
4 月 19 日	21.9	3.4
4 月 20 日	17.1	2.9
4 月 21 日	16.1	3.5
4 月 22 日	20.1	4.2
4 月 23 日	18.2	3.2
4 月 24 日	15.6	3.8

状态方程进行求解。S 函数能够接收来自 Simulink 求解器的相关信息,并对求解器发出的命令作出适当的响应,这种交互作用类似于 Simulink 系统模块与求解器的交互作用。Simulink 设计了固定格式的 S 函数接口,通过 S 函数可将系统的数学方程表达式与方框图表达形式联系起来^[22-25]。显然,S 函数是整个 Simulink 动态系统的核心。

在多次仿真中,可得出误差较大时,选择较小的 K_e 和 K_{ec} ,减小误差分辨率,而选择较大的 K_u ,加快系统响应;随着误差变小, K_e 和 K_{ec} 逐渐增大,而 K_u 逐渐减小。

仿真时,将 S 函数模块填入该文件,与 Simulink 工具箱中特定工具组成 S 函数模块,如图 12 所示。

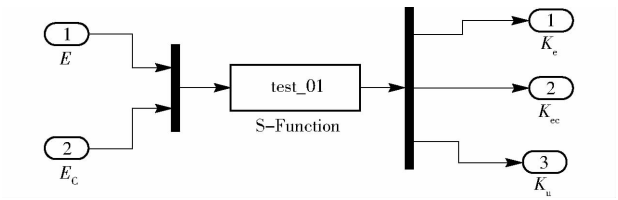


图 12 S 函数模块
Fig. 12 S function module

将该模块与模糊控制器对接,组成优化后的模糊控制器及参数自调整模糊控制系统,如图 13 所示。其工作流程与上文所述的模糊控制器相似,其不同点为该模糊控制器通过 S 函数实现了量化因子和比例因子自调整,提高了模糊控制器性能,使其决策更精确。

对上文的模糊控制器和用 S-函数优化的模糊控制器进行以同样的阶跃信号为输入,并分别在

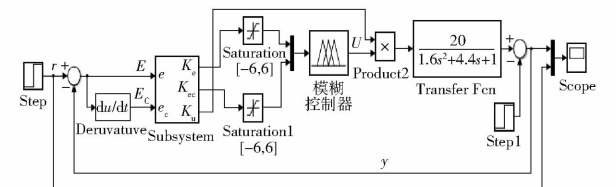


图 13 参数自调整模糊控制系统仿真图

Fig. 13 Parameter self-tuning fuzzy control system simulation diagram

20 s 时以幅值为 0.3 V 的阶跃信号作为干扰信号，进行仿真，对两种模糊控制器的控制性能进行比较，如两种模糊控制器进行控制时的超调量、超调时间、上升时间、稳态误差和抗干扰性。比较结果如图 14 所示。

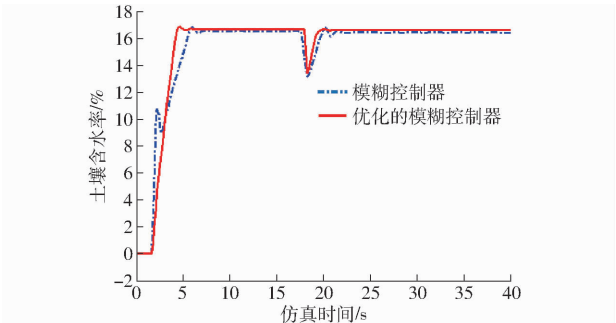


图 14 模糊控制器与优化后的模糊控制器性能比较

Fig. 14 Performance comparison between general and parameter self-tuning fuzzy controller

由仿真结果得到经 S 函数优化后的参数自调整模糊控制器的暂态性能指标，如表 4 所示。

表 4 模糊控制器与 S 函数优化的参数自调整模糊控制器性能指标

Tab. 4 Performance index between fuzzy controller and parameter self-tuning fuzzy controller of S function optimization

参数	模糊控制器	优化的模糊控制器
超调量/%	1.65	0.20
超调时间/s	4.60	3.15
上升时间/s	4.30	3.12
稳态误差	0.55	0.37

由表 4 可知，用 S 函数优化的模糊控制器具有较好的暂态性能，如超调量基本趋近于零；较短的超调时间和上升时间；该模糊控制器具有更小的稳态误差；受到干扰后在更短时间内将信号调整到正常值，即具有更强的抗干扰性。

综上所述，用 S 函数优化的参数自调整模糊控制器的控制精度更高，能提升灌溉模块控制系统的控制性能。

3.4 优化模糊控制灌溉系统田间试验

在试验场地 C 另加一组试验，该试验场地器材布置、场地环境、土壤环境均与 3.2 节所述的场地 A、B 试验环境相同，进行另外一组智能灌溉控制与监测试验，验证利用 S 函数优化的模糊控制灌溉系统的性能。其监测结果如表 5 所示。

表 5 A、C 区土壤含水率比较

Tab. 5 Comparison of soil moisture content data

%		
日期	A 区	C 区
4 月 7 日	18.5	18.1
4 月 8 日	16.5	16.5
4 月 9 日	15.8	15.8
4 月 10 日	22.9	21.1
4 月 11 日	18.5	17.7
4 月 12 日	15.6	15.4
4 月 13 日	19.5	19.7
4 月 14 日	16.2	16.5
4 月 15 日	15.7	15.8
4 月 16 日	20.3	19.8
4 月 17 日	17.4	18.0
4 月 18 日	15.8	16.0
4 月 19 日	21.9	20.4
4 月 20 日	17.1	16.9
4 月 21 日	16.1	15.9
4 月 22 日	20.1	19.9
4 月 23 日	18.2	17.9
4 月 24 日	15.6	15.5

由表 5 可知，C 区采用优化后的模糊控制灌溉系统的智能灌溉方式，土壤含水率的平均值为 17.6%，相比优化前模糊控制灌溉系统的灌溉结果，优化后的模糊控制灌溉系统具有更强的稳定性、抗干扰性以及更高的控制精度，并且，在试验中发现，采用优化后的模糊控制灌溉系统，接收到土壤含水率数据之后能更快地调节土壤含水率使土壤含水率接近土壤最佳含水率并趋于稳定，其性能有了明显提高。

4 结束语

经过计算机模拟、实际测试表明，基于模糊控制器的智能灌溉系统对荔枝园灌溉进行了有效控制，使荔枝园土壤含水率维持在 17.8% 左右，符合荔枝树的生长环境；同时，基于优化后的模糊控制器的智能灌溉系统将荔枝园土壤含水率平均值控制在 17.6%，更接近系统预设荔枝园土壤最佳含水率 17%。试验证实该系统满足实际要求。

- LIU Yang, ZHOU Canfang, WAN Zhong, et al. Guangdong litchi and longan industry development present and situation analysis in 2008[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(2): 110 – 112. (in Chinese)
- 2 余国雄,王卫星,谢家兴,等. 基于物联网的荔枝园信息获取与智能灌溉专家决策系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 144 – 152.
- YU Guoxiong, WANG Weixing, XIE Jiaying, et al. Information acquisition and expert decision system in litchi orchard based on Internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 144 – 152. (in Chinese)
- 3 庞新华,张继,张宇. 我国荔枝产业的研究进展及对策[J]. 农业研究与应用, 2014(4): 58 – 61.
- PANG Xinhua, ZHANG Ji, ZHANG Yu. Research progress and countermeasures of litchi industry in China [J]. Agricultural Research and Application, 2014(4): 58 – 61. (in Chinese)
- 4 贾文君,万景刚,徐冰,等. 根际交替灌溉技术在荔枝上的应用效果研究[J]. 福建农业学报, 2013, 28(2): 129 – 133.
- JIA Wenjun, WAN Jinggang, XU Bing, et al. A preliminary study on partial rootzone-drying irrigation for litchi [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 28(2): 129 – 133. (in Chinese)
- 5 雷刚,王卫星,孙宝霞,等. 基于能量异构双簇头路由算法的水稻田无线传感器网络[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 139 – 146.
- LEI Gang, WANG Weixing, SUN Baoxia, et al. Experiment on wireless sensors network based on double cluster head clustering routing algorithm of energy heterogeneous in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 139 – 146. (in Chinese)
- 6 MARE S, CVETAN G, VLADIMIR D, et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 297 – 307.
- 7 NIKHIL J, VINAY S P, SHAHBAZ S, et al. A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 233: 108 – 117.
- 8 郭正琴,王一鸣,杨卫中,等. 基于模糊控制的智能灌溉控制系统[J]. 农机化研究, 2006, 28(12): 103 – 108.
- GUO Zhengqin, WANG Yiming, YANG Weizhong, et al. Ground obstacles evading and point location control system based on chip microcomputer SPCE061A [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(12): 103 – 108. (in Chinese)
- 9 杨翠琴. 基于无线网络的环境监测与智控灌溉系统设计研究[J]. 节水灌溉, 2015, 40(7): 86 – 94.
- YANG Cuicui. Environmental monitoring and intelligent irrigation system based on wireless network [J]. Agricultural Water Management, 2015, 40(7): 86 – 94. (in Chinese)
- 10 张晓光,宋继荣,林家骏. 节水灌溉的模糊控制[J]. 自动化仪表, 2002, 23(11): 58 – 60.
- ZHANG Xiaoguang, SONG Jirong, LIN Jiajun. Fuzzy control of water saving irrigation [J]. Process Automation Instrumentation, 2002, 23(11): 58 – 60. (in Chinese)
- 11 高玉芹. 基于 ZigBee 和模糊控制决策的自动灌溉系统的设计[J]. 节水灌溉, 2010(8): 52 – 55.
- GAO Yuqin. Design of automatic irrigation system based on ZigBee and fuzzy control strategy [J]. Agricultural Water Management, 2010(8): 52 – 55. (in Chinese)
- 12 张寄阳,段爱旺,孟兆江,等. 茎直径微变化诊断作物水分技术的发展及应用[J]. 云南大学学报, 2006, 21(3): 324 – 328.
- ZHANG Jiyang, DUAN Aiwang, MENG Zhaojiang, et al. The development and application of diagnosis methods on crop water status based on stem diameter microvariation[J]. Journal of Yunnan University, 2006, 21(3): 324 – 328. (in Chinese)
- 13 张伟,何勇,裴正军,等. 基于无线传感器网络与模糊控制的精细灌溉系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 7 – 12.
- ZHANG Wei, HE Yong, QIU Zhengjun, et al. Design of precision irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 7 – 12. (in Chinese)
- 14 蔚东晓,贾霞彦. 模糊控制的现状与发展[J]. 自动化与仪器仪表, 2006, 26(6): 4 – 7.
- WEI Dongxiao, JIA Xiayan. Present situation and development of fuzzy control [J]. Automation and Instrumentation, 2006, 26(6): 4 – 7. (in Chinese)
- 15 葛新程,胡永霞. 模糊控制的现状与发展概述[J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 51 – 55.
- GE Xincheng, HU Yongxia. Present analysis and development trends of fuzzy control techniques [J]. Modern Defense Technology, 2008, 36(3): 51 – 55. (in Chinese)
- 16 裴正军,童晓星,沈杰辉,等. 基于模糊控制与虚拟仪器的灌溉决策系统研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 165 – 168.
- QIU Zhengjun, TONG Xiaoxing, SHEN Jiehui, et al. Irrigation decision-making system based on the fuzzy-control theory and virtual instrument [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 165 – 168. (in Chinese)
- 17 张兵,袁寿其,李红,等. 基于模糊决策理论的冬小麦精量灌溉智能系统的研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(5): 17 – 20.
- ZHANG Bing, YUAN Shouqi, LI Hong, et al. Study on intelligent irrigation system of winter wheat based on fuzzy decision theory [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(5): 17 – 20. (in Chinese)
- 18 裴素萍,吴必瑞. 基于物联网的土壤含水率检测及灌溉系统[J]. 农机化研究, 2013, 35(7): 106 – 109.
- PEI Suping, WU Birui. The soil moisture content monitoring and irrigation system based on IOT[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(7): 106 – 109. (in Chinese)
- 19 ZHANG Q, WU C H, TILT K. Application of fuzzy logic in an irrigation control system [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 1996.

- HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(23):15-22. (in Chinese)
- 18 STEFFEN R W, QI D H, MILLER G C. Seed sensor with lightpipe photodetect assembly; US, 2014/035949 A1[P]. 2014-06-03.
- 19 李心平, 马义东, 金鑫, 等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(7):97-101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015.
- LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):97-101. (in Chinese)
- 20 黄伟力, 边燕, 冯青春, 等. 基于 Cortex-M3 的农作物生长参数监测系统设计[J]. 农机化研究, 2015,37(2):203-205.
- HUANG Weili, BIAN Yan, FENG Qingchun, et al. Crop growth parameters monitoring system based on Cortex-M3 [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(2):203-205. (in Chinese)
- 21 孟鹏祥, 耿端阳, 李玉环, 等. 基于单片机与 DGUS 显示的精密播种机监测系统研究[J]. 农机化研究, 2017,39(2):171-175.
- MENG Pengxiang, GENG Duanyang, LI Yuhuan, et al. Research on the monitoring system of the precision seeder based on single chip microcomputer and display DGUS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(2):171-175. (in Chinese)
- 22 朱嵘涛, 武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7):121-126.
- ZHU Rongtao, WU Hongtao. Design of DC motor speed regulation system based on incremental PID algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(7):121-126. (in Chinese)
- 23 李明生, 赵建军, 朱忠祥, 等. 拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊2):295-300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s255&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055.
- LI Mingsheng, ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro-hydraulic hitch system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):295-300. (in Chinese)
- 24 梁春英, 吕鹏, 纪建伟, 等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统 PID 参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊1):89-93,88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s117&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.017.
- LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):89-93,88. (in Chinese)
- 25 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(8):56-64.
- GUO Na, HU Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(8):56-64. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- 20 刘朝英, 宋哲英, 宋雪玲. MATLAB 在模糊控制系统仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2001, 18(5):10-13.
- LIU Zhaoying, SONG Zheyang, SONG Xueling. Application of MATLAB in the simulation of fuzzy control system [J]. Computerized Simulation, 2001, 18(5):10-13. (in Chinese)
- 21 邹战强, 蓝莎. 荔枝需水量和灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 1999(3):8-9.
- ZOU Zhanqiang, LAN Sha. Experimental study on water requirement and irrigation system of litchi [J]. Agricultural Water Management, 1999(3):8-9. (in Chinese)
- 22 陈汇林, 吴翠玲. 利用费歇尔准则判别荔枝花芽分化期[J]. 中国农业气象, 2007,28(4):417-419.
- CHEN Huilin, WU Cuiling. Judgment of period of flower bud differentiation of litchi by Fisher discriminant analysis [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4):417-419. (in Chinese)
- 23 全杰, 秦世引, 段建民. 基于 MATLAB 命令方式的模糊控制系统仿真及可视化实现[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5):113-116.
- QUAN Jie, QIN Shiyin, DUAN Jianmin. Simulation and visual realization of fuzzy control system based on MATLAB [J]. Computerized Simulation, 2002, 19(5):113-116. (in Chinese)
- 24 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/OL]. 农业机械学报, 2016,47(3):45-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160307&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.007.
- NIU Yin, ZHANG Kanyu. Variable universe fuzzy control of water-fertilizer mixing process in fertigation system under rotational irrigation situation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):45-52. (in Chinese)
- 25 李晓静, 黄红飞. S 函数建模和仿真过程研究[J]. 电子设计工程, 2011,19(18):27-32.
- LI Xiaojing, HUANG Hongfei. S-function of modeling and simulation process [J]. Electronic Design Engineering, 2011,19(18):27-32. (in Chinese)