

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.007

轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程变论域模糊控制

牛寅¹ 张侃谕^{1,2}

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海大学电机与控制工程研究所, 上海 200072)

摘要: 灌溉施肥系统的混肥过程在轮灌条件下表现出非线性、时滞性、时变性和不确定性的特点。为解决该系统的控制问题,提出了一种变论域的模糊PI控制策略(VFPI),算法采用一组比例指数函数作为伸缩因子对模糊控制器的论域进行在线调整,同时引入了一个协模糊控制器,通过测量系统流量的变化在线调节控制器积分系数的基准值。为验证控制算法的有效性,搭建了灌溉施肥控制系统的试验平台,分别设计了4组不同配方内容和3组不同轮灌条件的模拟试验,采用本文提出的VFPI控制算法和常规PI控制算法进行了对比试验。试验结果表明,所提出的VFPI控制策略能够更好地适应配方内容变化以及轮灌条件变化对混肥过程造成的影响;相比于常规PI控制,VFPI控制的调节时间更短、超调量更小、动态过程更平稳。

关键词: 轮灌; 灌溉施肥系统; 变论域; 模糊控制

中图分类号: S24; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0045-08

Variable Universe Fuzzy Control of Water-fertilizer Mixing Process in Fertigation System under Rotational Irrigation Situation

Niu Yin¹ Zhang Kanyu^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(2. Institute of Motor and Control Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The water-fertilizer mixing process with an open-tank in the fertigation system was analyzed by a simplified dynamic mixing process in this paper. Then a variable universe fuzzy-PI control strategy was proposed which aimed at the characteristics of nonlinearity, pure hysteresis, time degeneration and uncertainty in the control system. A set of stretching factors with proportional exponential function was used to modify the universe of the fuzzy controller on line for improving its adjustability. Considering the influence of varied rotational irrigation schedule, a co-fuzzy controller with one-dimensional was proposed to regulate the reference value of integral coefficient of PI controller, through monitoring the system flow change on line. And the correction value of control parameters of PI controller were regulated by the variable universe fuzzy controller. In order to verify the validity and advantage of proposed control algorithm(VFPI), four experiments with different recipes and three experiments with different rotational irrigation situations that compared to the traditional PI controller were carried out, while the testing platform of fertigation control system was established. The contrast testing results demonstrate that the proposed VFPI control strategy has better adjustability than the traditional PI control method. When the recipe contents or rotational irrigation situations varied, the VFPI controller has smaller overshoot, better dynamic quality and reliability than the traditional PI controller.

Key words: rotational irrigation situation; fertigation system; variable universe; fuzzy control

收稿日期: 2015-09-23 修回日期: 2015-12-02

基金项目: 上海市科委重点科技攻关项目(10DZ2212300)

作者简介: 牛寅(1987—),男,博士生,主要从事设施农业智能水肥调控系统与智能装备技术研究,E-mail: nevin.007@163.com

通信作者: 张侃谕(1952—),男,教授,博士生导师,主要从事复杂对象建模与控制研究,E-mail: kanyu_zhang@agriscience.com.cn

引言

灌溉施肥是通过施肥装置将水溶性肥料注入到灌溉系统中,并借助低压输水管网将水肥一起送到田间的一种先进的施肥方式^[1]。这种方式可以将肥液直接输送到作物根部,从而大大提高水肥利用效率。同时,对肥液浓度的精密控制还能有效抑制病虫害问题和土壤重茬问题,对现代农业的高效可持续发展具有重要意义。

精密的施肥装置和智能化的控制系统是实现精准灌溉施肥的核心内容。农业发达国家,如荷兰、以色列、美国等,自动控制技术已比较成熟,都普遍采用高性能的施肥设备和控制精度较高的智能灌溉施肥系统。国内的研究主要集中在装置与系统设计和施肥控制策略两方面。目前国内常用的施肥装置主要有压差式施肥罐、文丘里施肥器、比例注肥泵、计量泵等^[2]。其中,文丘里施肥器结构简单,成本低,应用较为广泛,但其混肥浓度不易实现自动调控^[4]。将文丘里施肥器与电磁阀相结合,并与测量肥液浓度的 EC 传感器一起,可组成一个闭环控制系统,通过控制电磁阀的开关时间实现肥液浓度的控制^[3-4]。

在施肥控制策略方面,模糊控制已成为目前的研究热点。由于其不依赖控制对象精确的数学模型,适用于非线性、时变性、纯滞后的系统,因此得到了越来越多的关注,在施肥控制方面也有着广泛的应用^[4-9]。以上研究表明,采用模糊控制的方法能够在施肥系统中取得良好的效果,然而上述研究均是围绕某一个装置或者过程本身进行的。事实上在灌溉施肥系统中,轮灌制度是不确定的,这种不确定性会对施肥系统本身的运行参数带来显著的不确定影响。另一方面,当系统有多个施肥通道时,肥料配方的不确定性也会对系统本身的参数造成影响。为此,本文以灌溉施肥系统混肥过程的浓度控制为研究对象,综合分析混肥过程本身及其在轮灌条件下的对象特性,在此基础上,将变论域模糊控制与 PI 控制方法相结合,并针对系统流量不确定的特点引入一个协模糊控制器,针对系统的对象特性分别设计 4 组不同配方内容和 3 组不同轮灌条件的模拟试验,以验证本文提出的控制方法的有效性。

1 灌溉施肥控制系统

1.1 系统组成

灌溉施肥系统主要由提水系统、输水系统、注肥系统、控制系统组成。传统的系统连接方式是由注肥系统将原液直接注入灌溉管网,水肥在输水管道

中边流动边混合。而本文采用一个敞口的混肥罐作为灌溉清水和水溶性肥液的混合场所,提水系统、输水系统和注肥系统均与该混肥罐连接,组成一个多输入单输出的水肥系统。这种方式的好处是为肥液的混合过程提供了一个缓冲的场所,混肥过程更平稳,也更均匀。灌溉施肥系统的结构^[9]如图 1 所示。

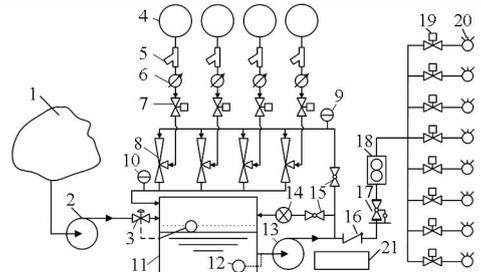


图 1 灌溉施肥系统结构图

Fig. 1 Structure of fertigation system

1. 水源 2. 补水泵 3. 浮球隔膜阀 4. 母液罐 5. 肥液过滤器
6. 肥液流量计 7. 高速脉冲电磁阀 8. 文丘里吸肥器 9. 文丘里进口压力表 10. 文丘里出口压力表 11. 混肥罐 12. 低位浮球
13. 灌溉施肥泵 14. EC 传感器 15. 压力调节阀 16. 止回阀 17. 持压阀 18. 电磁流量计 19. 田间阀门 20. 灌水器
21. 灌溉施肥控制柜

提水系统主要由水源和补水泵组成。水源中存放的是符合灌溉水质要求的灌溉清水,补水泵从水源中取水并将灌溉清水送至混肥罐。混肥罐内的液位由浮球隔膜阀控制,保持罐内的液位恒定。注肥系统由多路吸肥通道组成,每路吸肥通道包括母液罐、肥液过滤器、肥液流量计、高速脉冲电磁阀、文丘里吸肥器等,各通道均可独立工作。注肥系统将各母液罐中的浓缩原液注入到混肥罐与灌溉清水混合,混合好的肥液由输水系统将其送至田间管网,并通过灌水器直接作用于作物根部附近的土壤中。输水主管道上装有止回阀、持压阀等辅助设备,其中止回阀用于控制水流方向,持压阀用于维持管网的压力恒定。

灌溉施肥泵是整个灌溉施肥系统的总动力,通常由驱动电动机和多级叶轮组成。灌溉施肥泵将混肥罐内的水肥溶液加压输出,输出共分为 3 路:一路如上所述将水肥输送至田间管网;另一路有压水流作为驱动文丘里吸肥的驱动水流,在经过文丘里吸肥器后返回混肥罐;还有一路作为检测回路,经过 EC 传感器(电导率传感器)的测量探头后返回混肥罐。

吸肥通道是注肥系统的关键组成部分,而文丘里吸肥器则是核心的吸肥装置,其原理是利用驱动水流经过文丘里吸肥器后在其喉部形成负压从而达到吸肥的目的^[2]。试验研究表明,文丘里的额定吸肥量会随其进出口压力差的变化而变化^[4],为此本

系统选择在文丘里吸肥器的入口处增加一个压力调节阀,通过调节阀门开度将文丘里进口压力调节至某一固定值。由于文丘里结构参数确定且出口直接连接到混肥罐,如果不考虑其它干扰因素,文丘里进出口压力差也是一个固定值,这样各个吸肥通道的文丘里额定吸肥量将保持不变,从而大大抑制了灌溉管网的压力波动对吸肥过程造成的影响。

控制系统主要由灌溉施肥控制柜、EC 传感器、电磁流量计、高速脉冲电磁阀和田间阀门组成。每一个田间阀门控制一个灌区,在轮灌条件下由于轮灌制度的不同,某一次灌溉过程可能有一个或多个田间阀门同时开启,电磁流量计的作用就是在线测量某一时刻灌溉施肥系统的输出总流量,即同一时刻开启的田间阀门的流量之和。经混肥罐混合后的肥液通过低压管道由灌水器直接施加给作物,而混合后的肥液总质量浓度将对作物的生长产生直接影响,因此对于控制系统来说,混肥过程的控制对象即是混合后的肥液总质量浓度。已有研究表明,肥液质量浓度与其电导率之间存在显著的相关性^[10],因此本系统采用 EC 传感器间接测量混合后的肥液总质量浓度。高速脉冲电磁阀是控制吸肥通道实际吸肥量的执行机构,利用其高速开关特性,控制器通过 PWM 的方式控制其每个周期的占空比,从而实现吸肥量的精确控制。

灌溉施肥控制柜是控制系统的核心,主要包括嵌入式控制器、触摸屏、电源及电气控制回路等。触摸屏是系统的人机交互接口,操作管理人员通过触摸屏可以设置系统配置参数、灌溉过程参数、配方参数等。嵌入式控制器^[9]一方面按照用户设置的轮灌制度对田间阀门进行灌溉管理,另一方面按照用户设置的配方内容控制混肥过程。

对每个母液罐中原液的配置操作是进行灌溉施肥前的重要准备工作。其工艺流程如下:操作管理人员首先根据作物某一生长阶段的营养需求制定出合适的配方内容,包括肥料种类、肥料对应的通道号、肥料配比、混合后期望的 EC 值等;然后将这些配方参数依次设置到控制系统中;最后严格按照配方内容对一个或者多个母液罐中的原液进行调配。系统运行时,各吸肥通道对应的高速脉冲电磁阀采用相同的频率动作,这样一方面可以保持吸肥过程中原液之间的配比保持不变,控制系统只需要关注混合后的肥液总质量浓度即可;另一方面由于各通道执行机构动作一致,因此只需设计一个控制器即可实现多吸肥通道的控制,降低了控制器设计的成本和复杂度。

1.2 轮灌条件下的混肥过程分析

本文以轮灌条件下的实际混肥过程为研究对象,根据上述灌溉施肥系统的结构和配肥工艺流程,混肥过程的实际控制对象是水肥混合后的肥液总质量浓度,由 EC 传感器在线测量,因此该过程的浓度控制系统可以视为一个 SISO 系统。为了使控制器的设计更有针对性,有必要先对该过程的特性进行分析。

模型是描述对象特性的有力工具,能够揭示对象的本质。由于实际混肥过程较为复杂,干扰因素较多,建立一个精确的数学模型较为困难,因此本文通过一个简化的动态模型,从机理的角度定性分析灌溉施肥系统混肥过程本身及其在轮灌条件下的特点。

假设:①混肥罐内的液位恒定不变,肥液充分混合且浓度均匀。②各吸肥通道的性质完全一致,并且忽略水温变化的影响。简化后的混肥过程的动态模型如图 2 所示。图中, $Q_s(t)$ 为灌溉清水流量; C_s 为灌溉清水质量浓度; $Q_{out}(t)$ 为灌溉输出流量; $C_{out}(t)$ 为混肥输出质量浓度; $q_j(t)$ ($j=1,2,\dots,n$) 为吸肥通道的实际吸肥流量; C_j ($j=1,2,\dots,n$) 为吸肥通道对应的原液质量浓度; $V(t)$ 为混肥罐内液体体积; n 为吸肥通道数。

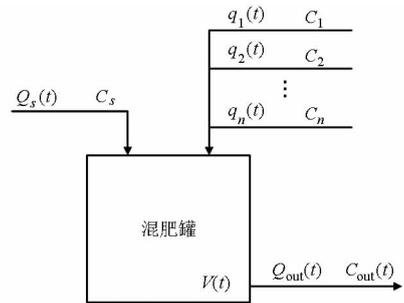


图 2 简化的混肥过程动态模型

Fig. 2 Simplified dynamic model of water-fertilizer mixing process

根据物料平衡原理,系统达到动态平衡时应遵循肥料量守恒和体积守恒

$$\frac{d(V(t)C_{out}(t+\tau))}{dt} =$$

$$Q_s(t)C_s + \sum_{j=1}^n C_j q_j(t) - Q_{out}(t)C_{out}(t+\tau) \quad (1)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_s(t) + \sum_{j=1}^n q_j(t) - Q_{out}(t) \quad (2)$$

假设条件

$$Q_s(t) + \sum_{j=1}^n q_j(t) = Q_{out}(t) \quad (3)$$

$$q_1(t) = q_2(t) = \dots = q_n(t) = q_{in}(t) \quad (4)$$

将式(2)代入式(1)整理后得到混肥过程的动

态表达式

$$V(t) \frac{dC_{\text{out}}(t+\tau)}{dt} + Q_{\text{out}}(t)(C_{\text{out}}(t+\tau) - C_s) = q_{\text{in}}(t)(C_m - nC_s) \quad (5)$$

其中

$$C_m = \sum_{j=1}^n C_j$$

由式(5)可以看出,控制系统的输入输出变量分别为吸肥通道的实际吸肥流量 $q_{\text{in}}(t)$ 和混肥输出总质量浓度 $C_{\text{out}}(t)$,动态方程中包含有非线性项。肥料在混肥罐中的混合延迟及测量延迟统一由一个时滞时间 τ 表示。主要的过程参数有 5 个,即混肥罐内液体体积 $V(t)$ 、各母液罐的原液总质量浓度 C_m 、灌溉清水质量浓度 C_s 、吸肥通道数 n 和灌溉输出流量 $Q_{\text{out}}(t)$ 。其中,混肥罐内液体体积 $V(t)$ 根据假设可视为一常数。灌溉清水质量浓度 C_s 相对于各母液罐的原液总质量浓度 C_m 来说可以忽略不计,但是相对于混肥输出总质量浓度 $C_{\text{out}}(t)$ 并不能忽略,这就相当于给系统增加了一个持续的阶跃扰动,其数值与灌溉输出流量 $Q_{\text{out}}(t)$ 有关。若将灌溉清水视为一种特殊的肥料,在实际操作当中通过将控制目标值 C_{set} 与灌溉清水质量浓度 C_s 求差后,即 $C_{\text{set}} - C_s$ 作为新的控制目标,则可以消除系统的这一固有扰动。另外, C_m 是各个通道对应的母液罐中原液质量浓度的加和,因此吸肥通道数 n 对混肥过程的影响可以由 C_m 统一描述。

由上述分析可知,影响系统动态过程的主要变量是各母液罐的原液总质量浓度 C_m 和灌溉输出流量 $Q_{\text{out}}(t)$ 。各母液罐的原液总质量浓度是由具体配方决定的,包括每个母液罐中原液的质量浓度和吸肥通道数。对于控制系统来说,配方内容是不确定的,配方的变化会引起 C_m 的变化,从而导致系统增益的变化。

另一个重要的影响因素就是系统的灌溉输出流量 $Q_{\text{out}}(t)$ 。灌溉输出流量与具体的轮灌制度有关。设灌溉施肥泵的最大供水流量为 Q_{max} ,田间阀门的流量为 $Q_i (i=1,2,\dots,m)$,其中 m 为田间阀门的个数。在某一轮灌制度下, $A_k = \{Q_i\} (1 \leq i \leq m)$, A_k 为第 k 个轮灌组划分,记该轮灌组流量为 $Q(A_k)$,则

$$Q_{\text{out}}(t) = Q(A_k) \quad (6)$$

其中 $0 \leq \min Q(A_k) \leq \max Q(A_k) \leq Q_{\text{max}}$

可以看出,系统的灌溉输出流量是由某种轮灌制度下轮灌组的划分决定的,其数值的波动范围为 $[\min Q(A_k), \max Q(A_k)]$ 。由于轮灌制度具有不确定性,因此对于控制系统来说灌溉输出流量 $Q_{\text{out}}(t)$ 也是不确定的,而这种不确定性将会同时影响系统的增益和时间常数,增加了系统的时变因素。

综上对该动态模型的分析可知,本文研究的实际混肥过程本身是一个具有一定非线性和时滞性的系统,而配方内容的不确定性和轮灌制度的不确定性导致混肥过程的运行参数具有严重的时变性。再加上系统固有的非线性,如电磁阀的死区特性等,采用常规控制器难以取得满意效果。因此本文针对混肥过程的这些特点,将模糊控制方法用于该过程控制器的设计。

2 变论域模糊 PI 控制器设计

传统的模糊控制器由于量化等级的限制导致控制精度不高,且由于量化因子和比例因子是固定的,无法对控制规则进行有效调整,因而自适应能力有限^[11-15]。对于这 2 个问题:一是可以将模糊控制器与 PI 控制器结合,利用 PI 控制器的特点消除稳态误差,提高控制精度;二是可以引入变论域的方法,通过调整量化因子和比例因子增加系统的自适应能力。

本文设计的变论域模糊 PI 控制器结构如图 3 所示。整个控制器包括 4 部分:PI 控制器、模糊控制器、论域调整和协模糊控制器。PI 控制器是系统的基本控制器,其控制参数由基准值和修正值组成,控制器离散化后的输出写成增量形式^[16]为

$$\Delta u(k) = (K_{p0} + \Delta K_p)(e(k) - e(k-1)) + (K_{i0} + \Delta K_i)e(k) \quad (7)$$

式中 K_{p0} 、 K_{i0} ——比例系数和积分系数的基准值
 ΔK_p 、 ΔK_i ——比例系数和积分系数的修正值
 $e(k)$ ——目标值与测量值之间的偏差

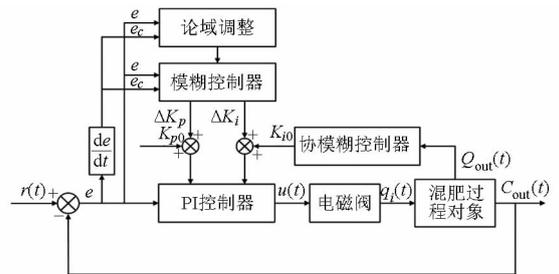


图 3 变论域模糊 PI 控制器结构框图

Fig. 3 Structure of variable universe fuzzy-PI controller

模糊控制器对 PI 控制参数的修正值 ΔK_p 和 ΔK_i 在线调整,论域调整部分通过伸缩因子调整模糊控制器输入输出变量的基本论域。PI 控制参数的基准值 K_{p0} 和 K_{i0} 可以由一组整定好的参数确定,然而当系统运行在轮灌条件下时,希望积分系数 K_{i0} 能够跟随灌溉输出流量的波动以维持动态性能,而单纯依靠模糊控制器进行修正其范围有限。为此引入一个一维的协模糊控制器,根据灌溉输出流量的检测值在线整定积分系数的基准值 K_{i0} ,对积分系数进行粗调,再由变论域的模糊控制器进行细调。

2.1 变论域模糊控制器

模糊控制器为双输入双输出系统,输入为偏差 e 和偏差的变化率 e_c ,输出为 PI 控制参数的修正值 ΔK_p 和 ΔK_i 。 e 的基本论域为 $[-\alpha_e E, \alpha_e E]$, e_c 的基本论域为 $[-\alpha_{ec} E_C, \alpha_{ec} E_C]$, ΔK_p 的基本论域为 $[-\beta_{\Delta kp} K_{p0}, \beta_{\Delta kp} K_{p0}]$, ΔK_i 的基本论域为 $[-\beta_{\Delta ki} K_{i0}, \beta_{\Delta ki} K_{i0}]$, 其中 E 和 E_C 为初始论域的边界值,由 EC 目标值决定, α_e 、 α_{ec} 、 $\beta_{\Delta kp}$ 、 $\beta_{\Delta ki}$ 分别为输入输出变量的伸缩因子,这里采用比例指数函数作为伸缩因子^[17]

$$\alpha_e = \left(\frac{|e|}{E} \right)^a \quad (0 < a < 1)$$

$$\alpha_{ec} = \left(\frac{|e_c|}{E_C} \right)^b \quad (0 < b < 1)$$

$$\beta_{\Delta kp} = \beta_{\Delta ki} = \frac{1}{2}(\alpha_e + \alpha_{ec})$$

a 和 b 均取 0.8。输入输出变量的模糊论域均为 $[-6, 6]$, 则量化因子和比例因子可以表示为

$$K_e = \frac{6}{\alpha_e E} \quad K_{ec} = \frac{6}{\alpha_{ec} E_C}$$

$$K_{\Delta kp} = \beta_{\Delta kp} \frac{K_{p0}}{6} \quad K_{\Delta ki} = \beta_{\Delta ki} \frac{K_{i0}}{6}$$

量化因子和比例因子随伸缩因子的变化而变化。每个论域对应的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, 隶属度函数如图 4 所示。

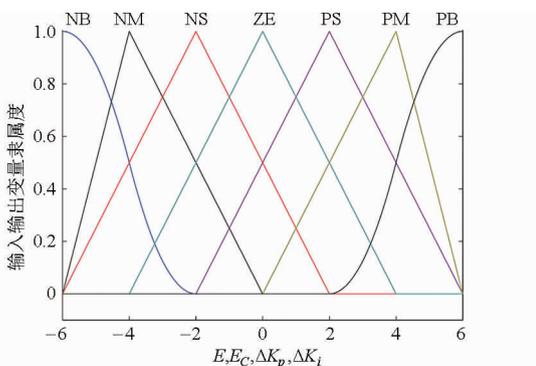


图4 模糊控制器输入输出变量隶属度函数

Fig.4 Membership functions of input and output variables of fuzzy controller

ΔK_p 和 ΔK_i 的模糊规则分别如表 1 和表 2 所示。采用重心法进行去模糊化^[18]。

2.2 协模糊控制器

协模糊控制器为单输入单输出的一维模糊控制器,输入为轮灌组流量 $Q(A_k)$,输出为积分系数的基准值 K_{i0} 。 $Q(A_k)$ 的基本论域为 $[0, Q_{\max}]$, K_{i0} 的基本论域为 $[0, \gamma Q_{\max}]$, Q_{\max} 由系统最大供水流量决定, γ 取 1/5。输入输出变量的模糊论域均为 $[0, 12]$, 该控制器的量化因子和比例因子为固定值,分别为

$$K_{Q(A_k)} = \frac{12}{Q_{\max}} \quad K_{k_{i0}} = \gamma \frac{Q_{\max}}{12}$$

每个论域对应的模糊子集为 $\{SS, S, M, L, LL\}$, 隶属度函数如图 5 所示。

表 1 ΔK_p 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules of ΔK_p

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

表 2 ΔK_i 模糊规则

Tab.2 Fuzzy rules of ΔK_i

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

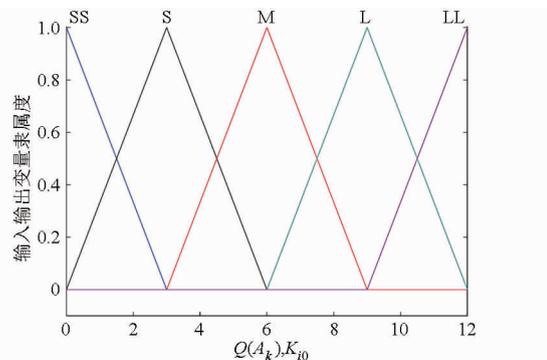


图5 协模糊控制器输入输出变量隶属度函数

Fig.5 Membership functions of input and output variables of co-fuzzy controller

该控制器共有 5 条模糊规则

if ($Q(A_k)$ is SS) then (K_{i0} is SS)

if ($Q(A_k)$ is S) then (K_{i0} is S)

if ($Q(A_k)$ is M) then (K_{i0} is M)

if ($Q(A_k)$ is L) then (K_{i0} is L)

if ($Q(A_k)$ is LL) then (K_{i0} is LL)

同样采用重心法进行去模糊化。

3 试验验证

根据前面对混肥过程对象特性的分析可知,配方内容和不同轮灌条件下的灌溉输出流量是影响系统

的主要因素。为验证本文提出的控制方法的有效性,分别设计了不同配方内容和不同轮灌条件的模拟试验,以验证模糊PI控制器的控制精度和自适应能力。

本文搭建的灌溉施肥控制系统试验平台如图6所示。灌溉施肥泵额定流量为 $12\text{ m}^3/\text{h}$,灌溉清水采用自来水,其实测EC约为 $0.4\text{ mS}/\text{cm}$,试验肥料选用水溶性较好的硝酸钾,文丘里额定吸肥量为 $150\text{ L}/\text{h}$,共有4路吸肥通道。电磁流量计和EC传感器均为 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号,电磁流量计的量为 $0\sim 70\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 0.5% ;EC传感器的量程为 $0\sim 10\text{ mS}/\text{cm}$,精度为 $0.01\text{ mS}/\text{cm}$ 。高速脉冲电磁阀的开关时间为 200 ms 。分水器上装有多路电磁阀,用于模拟田间阀门。试验操作时在灌溉施肥一体机的触摸屏上设置施肥配方、灌溉阀门组、灌溉策略等内容,由基于STM32的嵌入式控制器控制混肥过程^[9],灌溉输出流量和EC值的实时采集数据通过RS485总线上传到计算机进行记录。



图6 灌溉施肥控制系统试验平台

Fig.6 Experimental platform of fertigation control system

1. 蓄水罐 2. 母液罐 3. 补水装置 4. 计算机 5. 灌溉施肥一体机 6. 电磁流量计 7. 分水器

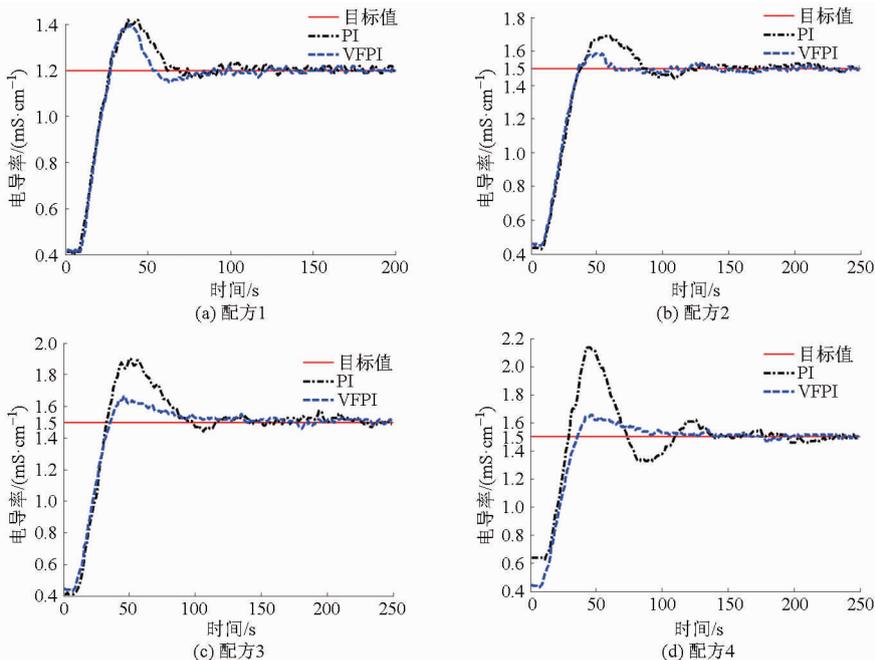


图7 不同配方条件下的对比试验结果

Fig.7 Experimental results with different recipes

3.1 不同配方的控制试验

配方内容主要包括EC设定值、吸肥通道数和各母液罐的原液总质量浓度。本试验设计了4组施肥配方,涵盖了不同的EC设定值以及不同的原液总质量浓度,如表3所示。

表3 试验配方设计

Tab.3 Experimental recipes

配方号	EC设定值/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	吸肥通 道数	各母液罐的原液总 质量浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	1.2	1	83.3
2	1.5	1	83.3
3	1.5	2	166.6
4	1.5	4	333.3

分别采用PI控制和本文设计的VFPI控制算法对混肥过程进行调节,其中VFPI的基准参数采用在配方1条件下整定的PI控制器的参数。试验时灌溉输出流量固定为 $5.8\text{ m}^3/\text{h}$,即同时开启两路电磁阀,采样周期为 3 s ,4种配方条件下的对比试验结果如图7所示。

3.2 不同轮灌条件的控制试验

试验平台的分水器上装有若干路电磁阀用于模拟田间阀门,各阀门流量均为 $2.9\text{ m}^3/\text{h}$,不同的阀门开启个数可以代表不同的轮灌组划分,即不同的轮灌条件。本试验设计了3组不同的试验轮灌条件,如表4所示。在本文设计的试验平台条件下,轮灌条件1代表了系统能够提供的最小输出流量,轮灌条件3代表了系统能够提供的最大输出流量,而轮灌条件2作为对照试验。

表4 试验轮灌条件设计

Tab.4 Experimental rotational irrigation situations

轮灌条件	EC 设定值/ (mS·cm ⁻¹)	同时开启 的阀门数	灌溉输出流量/ (m ³ ·h ⁻¹)
1	1.2	1	2.9
2	1.2	2	5.8
3	1.2	4	11.6

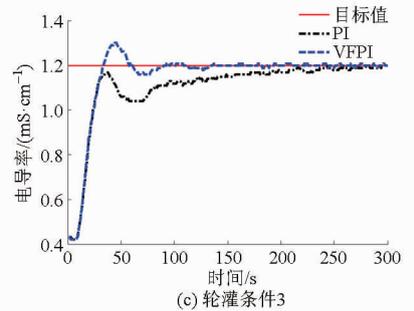
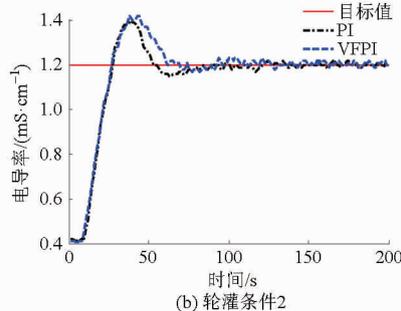
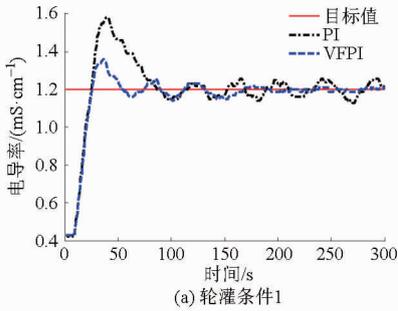


图8 不同轮灌条件下的对比试验结果

Fig.8 Experimental results with different rotational irrigation situations

3.3 试验结果分析

(1) 不同配方对比试验结果分析

4组不同配方的试验误差如表5所示。由图7和表5可知,当设定值为1.2 mS/cm时,PI控制和VFPI控制都能取得较好的效果,虽然VFPI控制参数的基准值与PI控制参数一致,但是VFPI控制的超调量、调节时间和均方根误差都略小于PI控制,这说明在确定的工况下,VFPI控制算法能够在PI控制的基础上对混肥过程的动态性能有进一步的改善。当设定值变为1.5 mS/cm时,PI控制和VFPI控制的超调量都有所减少,而调节时间和均方根误差都有所增加。

表5 不同配方试验误差

Tab.5 Experimental errors of different recipes

配方号	控制方法	超调量/%	调节时间/s	均方根误差
1	PI	18.33	59	0.0114
	VFPI	16.67	49	0.0095
2	PI	12.67	79	0.0124
	VFPI	6.00	56	0.0109
3	PI	26.67	87	0.0208
	VFPI	10.67	77	0.0143
4	PI	42.67	134	0.0233
	VFPI	18.67	96	0.0165

在配方3和配方4条件下,PI控制的效果较差,尤其是在配方4条件下动态过程出现了较大的振荡,这是由于原液总质量浓度的增加提高了系统的固有增益,而PI控制的参数并不能跟随配方内容的变化而变化。对于VFPI控制,随着各母液罐的原液总质量浓度的增加,其超调量、调节时间、均方根误差也有所增加,但增加的幅度明显小于PI控制,这是变论域模糊控制器对控制参数进行在线调

节的结果。因此,对比试验结果表明VFPI控制算法能够更好地适应配方内容的变化对系统造成的影响。

(2) 不同轮灌条件对比试验结果分析

3组不同轮灌条件的试验误差如表6所示。由图8可以看出,当系统运行在轮灌条件2时,2种控制算法都出现了一定程度的振荡,这主要是由于系统流量较小时混肥罐内液体惯性相对较大引起的,但VFPI控制的振荡幅度和超调量都要小于PI控制。当系统运行在轮灌条件3时,PI控制虽无超调,但调节时间较长,这是因为当系统流量增加时,系统的固有增益和时间常数都发生了变化,此时需要较大的控制参数才能适应系统的变化,但PI控制由于其控制参数固定,因此不能很好地适应轮灌条件的变化。由表6可知,VFPI控制器在2种轮灌条件下的超调量和调节时间的变化幅度都不大,且稳态性能优于PI控制。该对比试验结果表明,VFPI控制算法能够对轮灌条件的变化及时做出反应。

表6 不同轮灌条件试验误差

Tab.6 Experimental errors of different rotational irrigation situations

轮灌条件	控制方法	超调量/%	调节时间/s	均方根误差
1	PI	31.67	77	0.0360
	VFPI	13.33	49	0.0133
2	PI	18.33	59	0.0114
	VFPI	16.67	49	0.0095
3	PI		131	0.0231
	VFPI	8.33	53	0.0059

4 结论

(1) 阐述了一种灌溉施肥系统的结构组成及工作原理,建立了其混肥过程的简化数学模型,分析了

该过程在轮灌条件下的系统特点。

(2)将变论域模糊控制方法与常规PI控制方法相结合,提出了一种VFPI控制策略,同时引入了一个一维协模糊控制器以补偿轮灌条件的变化对系统的影响。

(3)搭建了试验平台,设计了不同配方内容和

不同轮灌条件下的VFPI和常规PI的对比控制试验。对比试验结果表明,常规PI由于控制参数固定导致其跟踪系统变化的能力较差,而采用本文提出的VFPI控制策略能够对配方的变化以及轮灌条件的变化做出及时反应,其动态性能和稳态性能均优于常规PI控制。

参 考 文 献

- 1 魏正英,葛令行,赵万华,等. 灌溉施肥自动控制系统的研究与开发[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(3):347-349.
WEI Zhengying, GE Lingxing, ZHAO Wanhua, et al. Development of automatic control system of fertigation technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3):347-349. (in Chinese)
- 2 李凯,毛罕平,李百军. 混药混肥装置控制性能分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 50-53.
LI Kai, MAO Hanping, LI Baijun. Analysis on control performance of various pesticide or fertilizer mixers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 50-53. (in Chinese)
- 3 杨仁全,王纲,周增产,等. 精密施肥机的研究与应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 197-199.
YANG Renquan, WANG Gang, ZHOU Zengchan, et al. Research and application of precise fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2005, 21(Supp.): 197-199. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 何青海,孙宜田,李青龙,等. 基于模糊控制的水肥药一体化系统研究[J]. 农机化研究, 2015(8):203-207.
HE Qinghai, SUN Yitian, LI Qinglong, et al. Study on the system of irrigation, fertilization and spraying based on fuzzy control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(8):203-207. (in Chinese)
- 6 LIANG Chunying, WANG Xi. Variable-rate fertilization control system based on fuzzy PID control strategy [C] // 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 2511-2514.
- 7 LIANG Chunying, WANG Xi, ZHANG Chengsheng, et al. Research of variable rate fertilization control system based on fuzzy PID control strategy [C] // Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, 2010: 2106-2110.
- 8 景兴红,王泽芳,宋乐鹏. 自适应模糊PID与PI复合控制变量施肥系统研究[J]. 农机化研究, 2015(10):29-33.
JING Xinghong, WANG Zefang, SONG Lepeng. Variable fertilization system for adaptive fuzzy PID and PI control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(10):29-33. (in Chinese)
- 9 NIU Yin, ZHANG Kanyu. Development of fertigation control system base on embedded platform and self-adaptive control strategy [C] // 2nd International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics, 2015: 1594-1600.
- 10 戴建军,樊小林,喻建刚. 电导率法快速检测缓释复合肥养分释放的探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4):83-88.
DAI Jianjun, FAN Xiaolin, YU Jian'gang. Rapid test of nutrients release from polymer-coated slowed release compound fertilizer using electric conductivity[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 83-88. (in Chinese)
- 11 陈焕新,杨培志,黄素逸. 空调列车车厢内CO₂浓度的模糊控制[J]. 中南工业大学学报, 2003, 34(6):652-656.
CHEN Huanxin, YANG Peizhi, HUANG Suyi. Fuzzy control of CO₂ concentration in train compartment[J]. Journal of Central South University of Technology, 2003, 34(6):652-656. (in Chinese)
- 12 成晓明,柳爱美,田淑杭. 基于PLC的炉温多级模糊控制的优化与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2001(12): 31-34.
- 13 JESSE Rocca, YANG Simon X. Fuzzy control of dissolved oxygen concentration in a bioreactor for wastewater applications [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009: 108-113.
- 14 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]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 295-300.
LI Mingsheng, ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro-hydraulic hitch system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 295-300. (in Chinese)
- 15 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(6): 4-7.
- 16 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- 17 郭娜,胡静涛. 插秧机行驶速度变论域自适应模糊PID控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12):245-251.
GUO Na, HU Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):245-251. (in Chinese)
- 18 黄卫华. 模糊控制系统及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- 19 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3):43-50.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):43-50. (in Chinese)