

基于云模型推理的施肥机营养液 pH 值调节过程控制

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: 针对精准施肥机营养液的 pH 值调节过程控制本质非线性、时滞性、时变性、不确定性等特点, 建立了描述该过程的数学模型。利用云模型能够处理定性概念和定量描述之间不确定转换的特点, 提出了一种基于云模型推理的变论域模糊 PI 控制 (CVFPI) 算法。该算法采用正态云模型描述系统误差和误差变化率的语言值, 通过 X 条件隶属云和 Y 条件隶属云分别实现规则前件和规则后件的推理, 利用伸缩因子实时调整输入输出变量论域, 由二维云推理机实现控制参数的在线修正。为验证该算法的有效性和优越性, 分别对 CVFPI、VFPI、PI 等 3 种控制算法进行了仿真测试和田间试验。试验结果表明, 提出的 CVFPI 控制算法能够适应精准施肥 pH 值调节过程的控制要求, 相比于常规 PI 控制算法和 VFPI 控制算法, 在不同工作点条件下超调量分别减小 45.3%、21.2%, 均方根误差分别减小 54.9%、52.9%, 在不同流量条件下超调量分别减小 59.0%、48.4%, 均方根误差分别减小 54.1%、37.9%, 具有较好的动态特性和稳态特性。

关键词: 温室; 施肥机; 营养液; pH 值控制; 云模型; 模糊推理

中图分类号: S24; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0057-08

Regulating Process Control of pH Value in Nutrient Solution of Fertigation Equipment Based on Cloud Model Inference

Niu Yin¹ Zhang Kanyu²

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

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

Abstract: The pH value regulating control process has the characteristics of nonlinearity, pure hysteresis, time degeneration and uncertainty in the precision fertigation system. A model described the pH value regulating process was established. The cloud model is a model that can deal with the uncertain transition between qualitative concepts and quantitative description. Based on this, a control algorithm with cloud inference in the variable universe fuzzy-PI controller (CVFPI) was proposed. In this algorithm, the normal cloud model was used to describe certain language concept corresponding to the system error and error rate. The inference of rule premise was realized by X conditional membership cloud while the inference of rule post was realized Y conditional membership cloud. A set of stretching factors with proportional exponential function was used to modify the universe of input and output variable real time, and a two dimensional inference engine based on cloud model was designed to adjust control parameters of PI controller on line. In order to verify the effectiveness and superiority of the proposed algorithm, the test platform of pH control process of the fertigation equipment was constructed. Two simulation experiments and two field experiments were carried out using CVFPI, VFPI and PI control algorithm respectively. The contrast testing results demonstrate that the proposed CVFPI control algorithm can meet the requirements of pH process control in the precision fertigation system, it has better

收稿日期: 2015-11-20 修回日期: 2016-02-16

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

characteristics both in dynamic process and steady state. Compared to PI and VFPI, CVFPI has smaller overshoot, shorter stable time and stronger ability of anti-interference.

Key words: greenhouse; fertigation equipment; nutrient solution; pH process control; cloud model; fuzzy inference

引言

精准施肥机是实现温室灌溉施肥过程精准调控的核心智能装备,营养液 pH 值的控制则是其关键内容之一^[1-2]。一些温室作物对营养液的 pH 值控制精度要求较高(如花卉、蓝莓等),而对于 pH 值调节过程本身,由于其滴定曲线的强非线性,使得该过程在不同工作点处的增益相差很大,同时过程参数的时变性,干扰的不确定性等问题都增加了该过程的控制难度。

目前,国内外学者对于 pH 值调节过程控制的研究主要集中在基于模型的控制策略和人工智能控制策略两方面。基于模型的控制策略其实现的前提是要获得能够描述过程行为的数学模型。模型的种类有很多,其中比较有代表性的是 GUSTAFSSON 和 WALLER 从机理角度提出的 pH 值中和过程的一般模型,它描述了该过程的动态特性和静态特性^[3]。WALLER 和 WRIGHT 分别引入反应不变量^[4]、强酸当量^[3]等概念,并提出线性化模型以简化控制器设计。另外,线性多模型^[5]、Wiener 模型^[6]、Hammerstein 模型^[7]、神经网络模型^[8]等可被用于预测系统输出,并在此基础上设计预测控制算法。总的来说,这类方法依赖于模型的精度,其关键是要解决好模型失配问题,然而要获得一个满意的模型往往需要花费较大的成本。

随着人工智能理论的发展,其在控制领域中的优势也逐渐显现出来。模糊控制理论是其中的一个重要分支,其本质是一种基于非线性推理的控制方法^[9],具有不依赖控制对象精确模型的特点,因此很多学者尝试将其用于 pH 值调节过程这种具有本质非线性系统的控制^[10-12]。

施肥机营养液 pH 值调节过程具有非线性、时滞性、时变性和不确定性等特点,难以建立一个精确的数学模型。为此本文尝试将模糊控制与 PI 控制相结合,通过变论域的方法动态调整模糊规则,并将云模型引入控制器的设计,替代传统的隶属度函数实现模糊推理,以期进一步提升控制器的性能。

1 精准施肥机 pH 值调节过程描述

1.1 系统组成

精准施肥机的结构如图 1 所示。整个系统以混

合罐为反应中心,共有 3 个输入和 1 个输出。输入分别为酸液、肥液和灌溉水,输出为反应混合后的营养液,由灌溉施肥泵加压送至田间管网。调节酸液经过滤后由文丘里吸肥器注入混合罐,粗调阀可以调节酸液通道流量,快速电磁阀用于控制实际注酸速度,酸液流量计用于记录实际的注酸量。检测通道由 2 个 pH 传感器并联组成,用于检测混合好的营养液 pH 值。

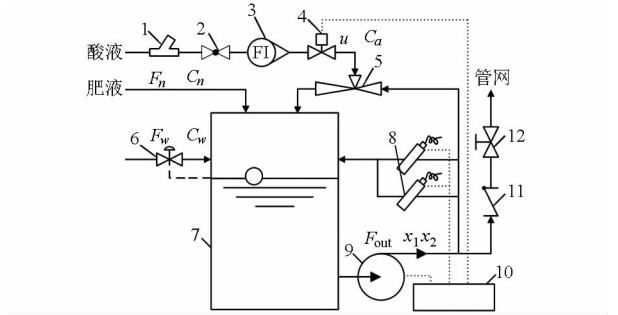


图 1 精准施肥 pH 值调节过程示意图

Fig. 1 pH value adjusting process of precision fertilizer
1. 过滤器 2. 粗调阀 3. 酸液流量计 4. 快速电磁阀 5. 文丘里吸肥器 6. 浮球隔膜阀 7. 混合罐 8. pH 传感器 9. 灌溉施肥泵 10. 控制柜 11. 止回阀 12. 灌溉主阀

为了提高传感器测量的精度,降低过程干扰对参数测量结果的影响,将一个 pH 传感器用于测量,另一个 pH 传感器用于校正。具体过程如下:①在采样时刻分别采集 2 个通道的传感器测量值。②对 2 个测量值求差,若差值在正常范围内则判定该次检测有效,并以 2 个测量值的平均值作为本次采集值,否则产生报警信号。③对于采集值,采用低通数字滤波器算法进一步减小干扰对测量结果的影响。

1.2 pH 值调节过程描述

灌溉水和肥液通常呈弱碱性,而调节酸液通常采用强酸(如 HCl),因此施肥的 pH 值调节过程可以视为一个强酸弱碱的中和反应过程。根据文献[3]推导的 pH 值中和过程的一般模型可知,该过程可以由一个描述状态变量的动态方程和一个描述中和滴定曲线的静态 pH 值方程组成。对于本文研究的精准施肥 pH 值调节过程,其动态数学模型描述为

$$V \frac{dx_1}{dt} = uC_a - F_{out}x_1 \tag{1}$$

$$V \frac{dx_2}{dt} = F_n C_n + F_w C_w - F_{out}x_2 \tag{2}$$

其中 $F_{out} = F_n + F_w + u$ (3)

式中 V ——混合罐内混合液体积
 u ——酸液输入流量
 C_a ——酸液输入浓度
 F_n ——肥液输入流量
 C_n ——肥液输入浓度
 F_w ——灌溉水输入流量
 C_w ——灌溉水输入浓度
 F_{out} ——系统输出总流量
 x_1, x_2 ——输出混合液中酸、碱浓度

pH 值滴定方程为

$$10^{-pH} - 10^{pH-14} - x_1 + \frac{1}{1 + 10^{pK_b + pH-14}} x_2 = 0 \quad (4)$$

其中, $pH = -\lg[H^+]$, $pK_b = -\lg K_b$, pH 为过程的输出变量, K_b 为弱碱的电离常数, 水的电离常数 $K_w = 10^{-14}$ 。

式(1)、(2)、(4)共同组成了施肥 pH 值调节过程的数学模型。前 2 个方程描述了 pH 值调节过程状态变量的动态过程, 具有轻微的非线性, 如果 $F_{out} \gg u$ 成立, 则动态过程可以认为是线性的, 而 pH 值滴定方程是一个具有强非线性的静态方程, 描述了 pH 值调节过程本质的非线性。

2 云模型推理模糊 PI 控制器设计

2.1 CVFPI 控制器结构

本文设计的基于云模型推理的模糊 PI 控制器 (CVFPI 控制器) 的结构如图 2 所示。CVFPI 控制器设计的总体方法是以 pH 值调节过程中目标输出 $y_d(t)$ 和实际输出 $y_{out}(t)$ 的误差 e 及误差变化率 e_c 为推理依据, 通过基于云模型的模糊推理机和论域调整规则对 PI 控制器的控制参数进行在线调节, 使其满足控制要求。CVFPI 控制器内部由 3 部分组成: 论域调整规则、二维云推理机和 PI 控制器。

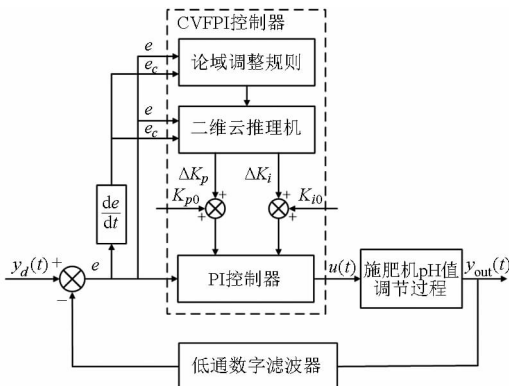


图 2 CVFPI 控制器结构框图

Fig. 2 Structure of CVFPI controller

PI 控制器共有 2 个控制参数: 比例系数 K_p 和积

分系数 K_i 。每个控制参数均由初始值和修正值 2 部分组成, 初始值由人为初步整定获得, 修正值由二维云推理机完成在线推理计算。控制器离散化后的输出写成增量形式为

$$\Delta u(k) = (K_{p0} + \Delta K_p)(e(k) - e(k-1)) + (K_{i0} + \Delta K_i)e(k) \quad (5)$$

式中 K_{p0}, K_{i0} —— K_p, K_i 的初始值

$\Delta K_p, \Delta K_i$ —— K_p, K_i 的修正值

$e(k)$ —— $y_{out}(t)$ 与 $y_d(t)$ 在采样时刻的偏差

2.2 云模型

考虑到精准施肥 pH 值调节过程中存在的不确定性, 本研究在推理系统中引入云模型的概念。云模型是一种定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型, 该模型同时反映了所描述对象的模糊性和随机性^[13]。云模型的基本单元是隶属云, 其定义如下^[14]:

设论域 $U = \{x\}$, T 为论域 U 上的语言子集, 如果对于任意元素 x 都存在一个具有稳定倾向的随机数 $\mu_T(x)$, 称为 x 对 T 的隶属度, 则 $\mu_T(x)$ 在 U 上的分布称为隶属云, 数据 $(x, \mu_T(x))$ 称为云滴。若 $\mu_T(x)$ 服从正态分布则称此时的隶属云为正态云。

采用正态云模型建立定性概念与定量数据之间的转换关系, 其模型描述为^[15]

$$\begin{cases} x_i = R_1(E_x, E_n) \\ P_i = R_1(E_n, H_e) \\ \mu_i = e^{-(x_i - E_x)^2 / (2P_i^2)} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $R_1(\cdot)$ ——服从正态分布的随机函数

(x_i, μ_i) ——正态云滴

E_x ——期望 E_n ——熵

H_e ——超熵

在模糊推理中, 通常用语言值表示定性概念。 E_x 反映了该语言值的信息中心; E_n 反映了论域中能够被该语言值所接受的元素的个数, 即模糊度, E_n 越大表示该语言值描述的定性概念的模糊程度越高; H_e 是 E_n 的熵, 反映了云滴隶属于该语言值的凝聚性, 即云的厚度, H_e 越大表示云滴对正态分布的偏离程度越大, 隶属度的不确定性越强。

若已知上述 3 个数字特征 E_x, E_n, H_e , 则可以通过式(6)描述的云模型得到大量云滴 (x_i, μ_i) , 该过程即为正向云发生器^[15]。需要指出的是, 云滴的生成过程是一种随机映射, 因此每一次产生的云滴可能不同, 但大量云滴组成的整体和语言值的数字特征是相互对应的。相比于采用正态分布的隶属度函数, 云模型不再强调精确的函数表示, 而是通过不确定概念的轮廓实现相应的不确定推理, 因而对于输

入概念的不确定因素具有更好的继承性。

2.3 云模型推理机

由正向云发生器原理可知通过云模型的数字特征可以生成满足条件的云滴 (x_i, μ_i) 。进一步规定,若输入条件 x_i 已知则称此时的云为 X 条件隶属云,若输入条件 μ_i 已知则称此时的云为 Y 条件隶属云^[15]。

云模型推理过程通过 if x , then y 规则实现,其前件推理由 X 条件隶属云计算,后件推理由 Y 条件隶属云计算。

对于一个 MIMO 系统,可以将其分解为多个 MISO 系统,由推理规则表维护各系统的推理过程。设系统输入变量 $x_i \in U(i=1,2,\cdots,m)$, m 为输入变量的维数; $C_{xij}(j=1,2,\cdots,k)$ 为 x_i 对应的语言子集的 X 条件隶属云, k 为论域上分布的语言子集的划分数; $R_l(l=1,2,\cdots,n)$ 为推理前件的合成运算规则, n 为推理规则的数量; C_{yl} 为 R_l 对应的推理后件的 Y 条件隶属云; y_{out} 为系统推理输出。 m 维云模型推理机的结构如图3所示,其推理过程为:

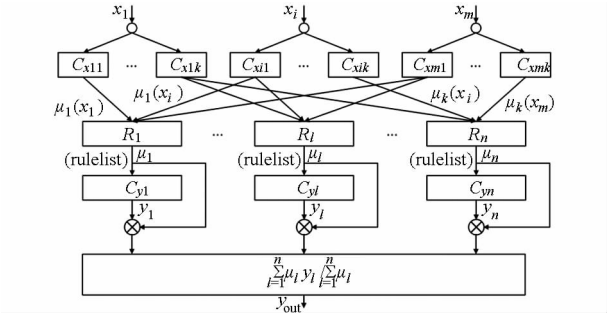


图 3 m 维云模型推理机结构

Fig. 3 Structure of m -dimensional cloud model inference

- (1) 计算系统 m 维输入向量
- $$\mathbf{I}_{input} = (x_1, \cdots, x_i, \cdots, x_m)$$

(7)
- (2) 输入变量 x_i 激活论域上分布的 X 条件隶属云,并计算相应的隶属度
- $$\begin{cases} P_{ij} = R_l(E_{nj}, H_{ej}) \\ \mu_j(x_i) = \frac{1}{N} \sum_N e^{-(x_i - E_{xij})^2 / (2P_{ij}^2)} \end{cases}$$

(8)
- 式中 P_{ij} ——由 x_i 论域上第 j 个云模型生成的服从正态分布的随机数
- N ——生成的云滴个数
- (3) m 个隶属度共同激活一个推理规则 R_l ,按照 min 合成运算法则计算推理前件的输出,得到该规则的激活强度
- $$\mu_l = \min(\mu_j(x_i))$$

(9)
- (4) 每一规则的推理前件按照推理规则表 rulelist 中的映射关系可以找到其推理后件对应的 Y 条件隶属云,由此计算各规则的推理输出

$$\begin{cases} P_{yl} = R_l(E_{nyl}, H_{eyl}) \\ y_l = \frac{1}{N} \sum_N (E_{xyl} \pm P_{yl} \sqrt{-2\ln u_l}) \end{cases}$$

(10)

式中 P_{yl} ——由 y 论域上第 l 个云模型生成的服从正态分布的随机数

(5) 对各规则的推理输出进行加权平均计算得到最终的推理输出

$$y_{out} = \frac{\sum_{l=1}^n \mu_l y_l}{\sum_{l=1}^n \mu_l}$$

(11)

2.4 二维云推理机

二维云推理机为双输入双输出系统,输入变量分别为偏差 e 和偏差变化率 e_c ,输出变量分别为控制参数修正值 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,由系统初始时刻的状态决定, $\alpha_e, \alpha_{ec}, \beta_{\Delta kp}, \beta_{\Delta ki}$ 分别为输入输出变量的伸缩因子。输入输出变量的模糊论域均为 $[-6, 6]$,量化因子 K_e 和 K_{ec} 分别为

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

比例因子 $K_{\Delta kp}$ 和 $K_{\Delta ki}$ 分别为

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

量化因子和比例因子随伸缩因子的动态变化而变化。

输入输出论域均划分为 7 个语言子集,分别为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB},对应的云模型如图4所示。

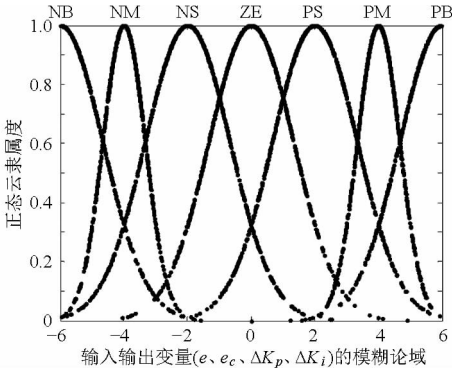


图 4 输入输出变量的正态云模型

Fig. 4 Normal cloud model of input and output

云模型中各隶属云的数字特征值如表1所示。 ΔK_p 和 ΔK_i 的推理规则分别如表2和表3所示。

2.5 论域调整规则

在控制过程的初始时刻,系统输出往往距离目标值较远,随着实际输出慢慢逼近目标值,系统误差

表 1 二维推理机输入输出云模型

Tab. 1 Cloud model of input and output in two-dimensional inference

参数	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E_x	-6	-4	-2	0	2	4	6
E_n	4/3	2/3	4/3	4/3	4/3	2/3	4/3
H_e	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

注:NB 对应的是左半云模型,PB 对应的是右半云模型。

表 2 ΔK_p 推理规则表

Tab. 2 Inference 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 3 ΔK_i 推理规则表

Tab. 3 Inference 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

会越来越小,如果始终保持相同的论域范围进行推理势必会造成控制器在不同阶段对误差的敏感度不同,影响控制特性。为此,本文采用变论域的方法^[16]解决这一问题,引入伸缩因子实时调整输入输出变量的基本论域。

伸缩因子分别为系统偏差 e 或偏差变化率 e_c 的函数,这里采用易于实现的比例指数函数^[17],其定义为

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

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

$$\beta_{\Delta kp} = \frac{1}{150}(\alpha_e + \alpha_{ec}) \quad \beta_{\Delta ki} = \frac{1}{250}(\alpha_e + \alpha_{ec})$$

当系统误差变化时,伸缩因子也会随之改变,于是输入输出变量的基本论域范围就会依据 e 或 e_c 的动态变化相应地收缩或扩展,这样就相当于增加了模糊规则,从而达到提高推理精度的目的。其中, a

和 b 为伸缩比例系数,其值越接近 1,伸缩因子越接近比例变化,相反越接近 0,则伸缩因子越接近指数变化。根据本系统的特点,希望以比例变化为主,经试算后, a 和 b 均取 0.9。

3 试验验证与分析

3.1 施肥 pH 值调节过程试验平台

本文构建的施肥 pH 值调节过程试验平台如图 5 所示。试验平台由 7 部分组成:蓄水罐中存放灌溉清水,实测 pH 值为 7.8;母液罐中存放酸调节液,酸液选用稀盐酸(HCl),浓度为 0.2 mol/L;补水装置负责为精准施肥机补水,维持混合罐液位恒定;精准施肥机的最大输出流量为 12 m³/h,注酸通道文丘里额定流量为 110 L/h,快速电磁阀的开关时间为 200 ms,pH 传感器的测量精度为 0.01,控制系统平台采用基于 STM32 的嵌入式 MCU 搭建^[16];电磁流量计选用 EMF5000 系列传感器,采集信号为 4 ~ 20 mA 电流信号,用于测量 pH 值调节过程的瞬时流量;分水器上装有多路电磁阀,用于模拟田间阀门;计算机通过 RS232 接口与精准施肥机通信。



图 5 施肥 pH 值调节过程试验平台

Fig. 5 Experimental platform of pH value adjusting process in precision fertilizer

1. 蓄水罐 2. 母液罐 3. 补水装置 4. 计算机 5. 精准施肥机
6. 电磁流量计 7. 分水器

试验操作时通过施肥机上的触摸屏设置配方内容、灌溉阀门组、灌溉制度等控制参数。计算机通过串口调试助手实时采集系统瞬时流量和 pH 值测量值等过程数据。

3.2 CVFPI 控制算法仿真试验

为验证本研究控制算法的有效性,在 Matlab 环境下分别对基于云模型推理的变论域模糊 PI 控制器(CVFPI)、变论域模糊 PI 控制器(VFPI)和常规 PI 控制器(PI)的控制效果进行仿真分析。在仿真试验之前,首先需要确定控制对象的仿真模型。

式(1)、(2)、(4)是精准施肥 pH 值调节过程的时域模型,但由于式(4)是一个超越方程,难以获得输入输出关系的解析表达式,因此本文通过频域法,利用现场输入输出实测数据,通过系统辨识的方法

来确定输入输出的传递函数,作为系统仿真模型。

3.2.1 模型建立

(1)确定模型结构。根据本文 pH 值调节过程的特点,采用带延迟环节的高阶系统传递函数表达式

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts+1)^p} \tag{12}$$

模型待辨识参数包括系统增益 K 、延迟时间 τ 、时间常数 T 、系统阶次 p 等 4 个参数。

(2)采集现场数据。调节系统流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$, 设定快速电磁阀输出占空比为 50%, 其余参数同 3.1 节,在该工况下获取 pH 值调节过程开环阶跃响应曲线。

(3)模型参数辨识。在开环阶跃响应曲线上得到系统初值和终值,由此计算出系统增益 $K = -0.11$;分别确定输出下降 40% 和 80% 时对应的时间 $t_1 = 87\text{ s}$, $t_2 = 134\text{ s}$,由工程建模法中 p 与 t_1/t_2 的关系表^[20]确定系统阶次 $p = 6$,时间常数 $T = (t_1 + t_2)/(2.16p) = 17.05$;系统延迟时间 $\tau = 3$,最后得到系统仿真模型为

$$G(s) = \frac{-0.11e^{-3s}}{(17.05s+1)^6} \tag{13}$$

3.2.2 仿真

(1)阶跃响应跟踪试验

采用一阶保持器对式(13)进行离散化,采样时间 $T_s = 3\text{ s}$,系统初始状态的 pH 值为 7.8,设定目标值分别为 $y_d = 6$ 和 $y_d = 5$ 。控制参数的初始值分别设定为 $K_{p0} = 10$ 和 $K_{i0} = 0.15$ 。VFPI 的隶属度函数选用钟形函数,去模糊方法选用重心法,模糊论域、推理规则、伸缩因子等参数与 CVFPI 保持一致。3 种控制算法的仿真结果如图 6 所示。

(2)抗干扰能力试验

在阶跃响应试验基础上将设定目标值改为 $y_d = 6.5$,其它条件不变。待系统输出稳定后,分别对控制器输出端增加确定性干扰和随机干扰,3 种控制算法的仿真结果如图 7 所示。图 7a 加入的是一确定性阶跃扰动信号,图 7b 和图 7c 加入的均是随机扰动信号,并持续 10 个周期。

(3)仿真试验分析

从图 6 的结果可以看出,3 种控制器在 2 个不同的工作点上均能使系统稳定,但 PI 控制器的波动最大,控制性能最差。VFPI 和 CVFPI 由于能够根据误差的变化实时修正控制参数,因此这 2 种控制器的效果明显优于 PI 控制器,而 CVFPI 控制器相比之下具有更小的超调量和稳定时间,控制性能最好。

从图 7 的结果可以看出,无论是对系统输出端

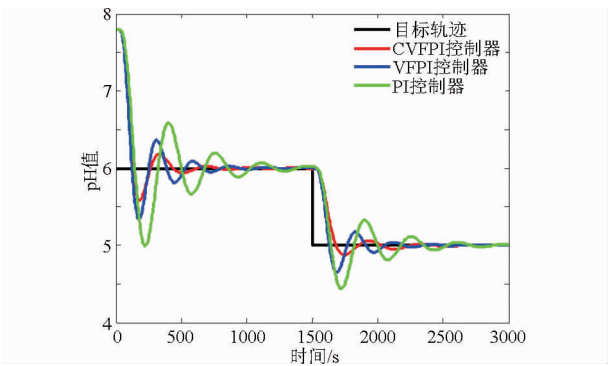


图 6 阶跃响应测试仿真结果

Fig. 6 Simulation result of step-response test

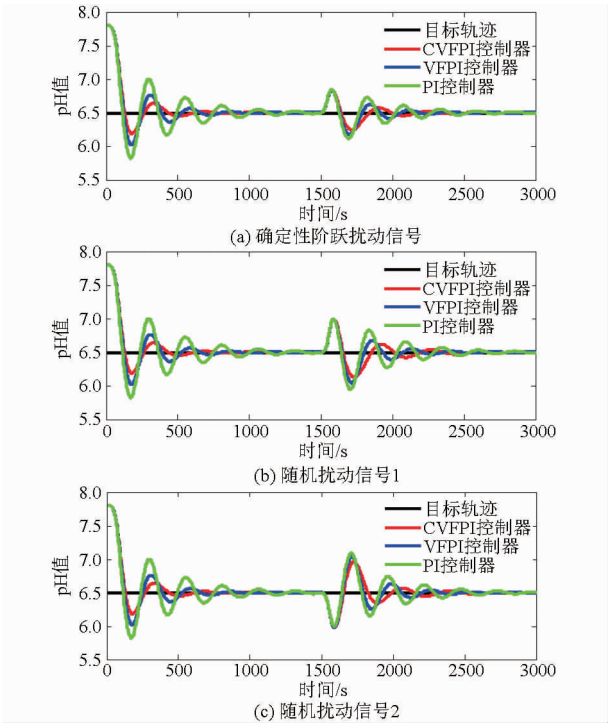


图 7 抗干扰测试仿真结果

Fig. 7 Simulation results of anti-disturbance test

增加确定性的扰动信号还是随机扰动信号,CVFPI 控制器都具有优于其它 2 种控制器的抗干扰能力。仿真对比结果体现了本文提出的 CVFPI 控制算法的优越性。

3.3 施肥 pH 值调节过程控制试验

为了验证 CVFPI 控制算法的运行效果,在本文搭建的施肥机试验平台上进行营养液 pH 值调节过程的控制试验。分别采用 PI 控制算法、VFPI 控制算法和 CVFPI 控制算法在 pH 值调节过程的不同工作点和不同系统流量条件下进行对比试验,控制算法的运行精度为 float,采样周期为 3 s。

(1)不同工作点对比试验

分别在 pH 值设定值为 5.5 和 5.0 工作条件下对 3 种算法的控制效果进行测试,系统流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 。试验结果如图 8 所示,试验数据如表 4 所示。

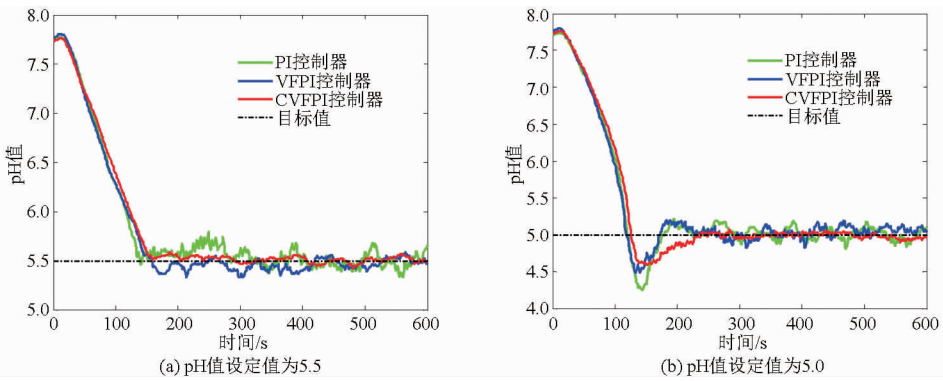
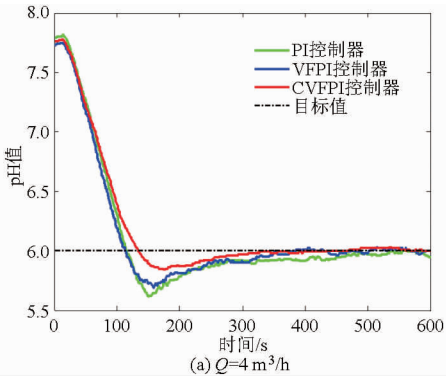


图 8 不同工作点条件下 pH 值控制试验结果

Fig. 8 Experimental results of pH control in different operating points

表 4 不同工作点对比试验数据

Tab. 4 Experimental data of different operating points				
pH 值 设定值	控制 算法	最大误差	平均绝对 误差	均方根误 差 (RMSE)
5.5	PI	0.29	0.075 1	0.094 3
	VFPI	0.17	0.056 2	0.068 5
	CVFPI	0.08	0.024 9	0.030 9
5.0	PI	0.75	0.063 5	0.075 9
	VFPI	0.52	0.056 5	0.074 6
	CVFPI	0.41	0.028 0	0.035 1



(2)不同流量对比试验

分别在 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $Q=8\text{ m}^3/\text{h}$ 流量条件下对 3 种算法的控制效果进行测试,pH 值设定值为 6。试验结果如图 9 所示,试验数据如表 5 所示。

(3)试验结果分析

由图 8 可以看出,当 pH 值设定值为 5.5 时,3 种控制算法的超调都不明显,但 PI 控制波动较大,VFPI 次之,CVFPI 算法波动最小;当 pH 值设定值为 5.0 时,PI 控制的超调量最大,VFPI 次之,CVFPI

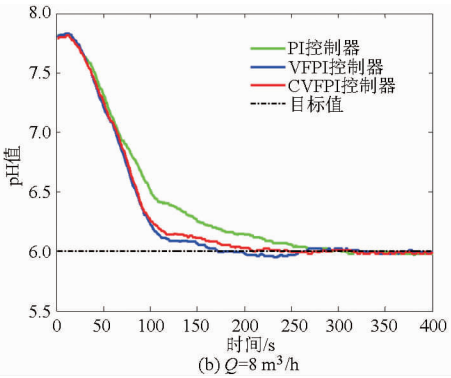


图 9 不同流量条件下 pH 值控制试验结果

Fig. 9 Experimental results of pH control in different system flows

表 5 不同流量对比试验数据

Tab. 5 Experimental data of different system flows				
流量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	控制算法	最大误差	平均绝对 误差	均方根误 差 (RMSE)
4	PI	0.39	0.052 7	0.060 4
	VFPI	0.31	0.022 7	0.032 0
	CVFPI	0.16	0.012 1	0.014 7
8	PI	0.14	0.035 8	0.052 3
	VFPI	0.05	0.018 2	0.021 9
	CVFPI	0.03	0.011 6	0.013 6

的超调量最小;相比 VFPI 和 PI 分别减小 45.3% 和 21.2%,动态效果最好。由表 4 可知,在 2 种不同的工作点条件下,CVFPI 控制算法的最大误差、平均绝对误差和均方根误差均小于其它 2 种算法,相比于 VFPI 控制算法,均方根误差分别减小了 54.9% 和

52.9%,具有更好的稳态特性。

由图 9 可以看出,当 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,CVFPI 控制算法的响应速度略慢于其它 2 种算法,但是超调量明显减小,相比 VFPI 和 PI 分别减小 59.0% 和 48.4%,且稳定时间较短;当 $Q=8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,PI 控制的响应速度明显弱于 VFPI 和 CVFPI,而由表 5 可知,CVFPI 的稳态特性优于 VFPI,在 2 种不同的流量条件下,CVFPI 控制算法的最大误差、平均绝对误差和均方根误差都小于其它 2 种算法,相比于 VFPI 控制算法,均方根误差分别减小了 54.1% 和 37.9%。

对比试验结果表明,本文提出的 CVFPI 控制算法能够满足精准施肥 pH 值调节过程的控制要求,具有较好的动态特性和稳态特性。

4 结论

(1) 利用云模型能够处理定性概念和定量描述之间不确定转换关系的特点,提出了一种基于云模型推理的变论域模糊 PI 控制算法(CVFPI)。该算法采用正态云模型描述系统误差和误差变化率的语言值,通过 X 条件云和 Y 条件云分别实现规则前件和后件的推理,利用伸缩因子实时调整输入输出变量论域,由二维云推理机实现控制参数的在线修正。

(2) 为验证该算法的有效性和优越性,分别对 CVFPI、VFPI、PI 等 3 种控制算法进行了仿真测试和

田间试验。试验结果表明,CVFPI 算法相比 VFPI 和 PI,不同工作点条件下超调量分别减小 45.3% 和 21.2%,在不同流量条件下超调量分别减小 59.0% 和 48.4%,具有更好的动态特性。在统计指标上,CVFPI 算法的均方根误差相比于 VFPI 和 PI,在 2 种试验条件下分别减小 54.9%、52.9% 和 54.1%、37.9%,具有更好的稳态特性。由此可以得出,本文提出的 CVFPI 控制算法能够适应精准施肥 pH 值调节过程的控制要求,具有更小的超调量和稳定时间,以及更强的抗干扰能力。

参 考 文 献

- 1 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 CSAE, 2005, 21(Supp.): 197-199. (in Chinese)
- 2 李惠卓,张彦广,项宝珠,等. 花卉培养土的酸碱性及其调节的研究[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(3): 53-56, 68.
LI Huizhuo, ZHANG Yanguang, XIANG Baozhu, et al. The study and adjustment about the pH value of cultivatable soil of flowers [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(3): 53-56, 68. (in Chinese)
- 3 WRIGHT R A, COSTAS Kravaris. Nonlinear control of pH processes using the strong acid equivalent[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1991, 30: 1561-1572.
- 4 HENDRA Cordova, HERI Justiono, ALI Masduki. Nonlinear pH control based on reaction invariant and self-tuning PID controller [J]. The Journal of Technology and Science, 2009, 20(3): 115-122.
- 5 OMAR Galán, ROMAGNOLI J A, AHMET Palazoglu. Real-time implementation of multi-linear model-based control strategies—an application to a bench-scale pH neutralization reactor[J]. Journal of Process Control, 2004, 14(5): 571-579.
- 6 满红,邵诚. 基于 Hammerstein-Wiener 模型的连续搅拌反应釜神经网络预测控制[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2275-2280.
MAN Hong, SHAO Cheng. Neural network predictive control of continuous stirred-tank reactor based on Hammerstein-Wiener model[J]. CIESC Journal, 2011, 62(8): 2275-2280. (in Chinese)
- 7 ZOU Zhiyun, YU Meng, WANG Zhizhen, et al. Nonlinear model algorithmic control of a pH neutralization process[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21(4): 395-400.
- 8 LOH A P, LOOI K O, FONG K F. Neural network modeling and control strategies for a pH process[J]. Journal of Process Control, 1995, 5(6): 355-362.
- 9 葛新成,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 technique[J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(3): 51-55. (in Chinese)
- 10 杨梁,徐保国. 基因工程菌高密度发酵过程中 pH 值模糊控制的实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(1): 206-208.
YANG Liang, XU Baoguo. Study of PLC fuzzy controller based on the process of engineering bacteria highly dense fermentation [J]. Computer Engineering, 2005, 31(1): 206-208. (in Chinese)
- 11 薛薇,齐国元,李力,等. pH 值调节过程的 FNNC-PI 控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(6): 721-724, 733.
XUE Wei, QI Guoyuan, LI Li, et al. The FNNC-PI control study of pH process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(6): 721-724, 733. (in Chinese)
- 12 薛薇,李力. 基于 DSP 的 pH 值调节过程 FNNC-PI 控制器研究[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(1): 58-61.
XUE Wei, LI Li. Study of FNNC-PI controller of pH process based on DSP[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(1): 58-61. (in Chinese)
- 13 杜湘瑜,尹全军,黄柯棣,等. 基于云模型的定性定量转换方法及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4): 772-776.
DU Xiangyu, YIN Qunjun, HUANG Kedi, et al. Transformation between qualitative variables and quantity based on cloud models and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(4): 772-776. (in Chinese)
- 14 黄景春,肖建,周聪. 一种基于 T-S 云模型的非线性系统控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(11): 149-151, 156.
HUANG Jingchun, XIAO Jian, ZHOU Cong. T-S cloud model for nonlinear systems control[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(11): 149-151, 156. (in Chinese)
- 15 韩伟,马邕文,万金泉. 基于云模型在废水处理 pH 控制中的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 432-435, 440.
HAN Wei, MA Yongwen, WAN Jinquan. Simulation of pH controlling system based on cloud model[J]. Computer Simulation, 2015, 32(5): 432-435, 440. (in Chinese)