

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.041

# 插秧机行驶速度变论域自适应模糊PID控制\*

郭娜<sup>1,2</sup> 胡静涛<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 农机行驶速度控制是精细农业中导航控制和变量作业控制系统的重要组成部分。农机在田间行驶过程中状态多变且环境恶劣,对行驶速度控制算法的自适应能力要求较高。在分析农机变速机构的基础上设计了插秧机行驶速度控制系统,将变论域方法引入模糊PID控制器设计中,提高了控制算法的适应性,并以高速乘坐式插秧机为试验平台进行了控制算法的水泥道路试验验证。试验结果表明,所提出的控制算法对插秧机行驶速度控制是可行的,插秧机行驶速度平均误差小于0.02 m/s,与PID控制算法相比,调节时间更短,超调量较小,并且具有更好的自适应能力。

**关键词:** 插秧机 行驶速度 变论域 模糊PID 自适应

**中图分类号:** S223.91<sup>+</sup>2; TP273<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0245-07

## Variable Universe Adaptive Fuzzy-PID Control of Traveling Speed for Rice Transplanter

Guo Na<sup>1,2</sup> Hu Jingtao<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The control of agricultural vehicle traveling speed is an important factor of navigation system and variable rate application system in precision agriculture. The traveling speed control algorithm of agricultural vehicle in the field requires a higher adaptive ability because of adverse circumstance. The rice transplanter speed control system was designed on the basis of the analysis of vehicle speed shifting mechanism. The variable universe adaptive fuzzy-PID (VFPID) control method was introduced to improve the adaptability of the control algorithm. The road test of control system was accomplished on the platform of rice transplanter. The test results showed that the average error was less than 0.02 m/s and the control method was feasible and effective. As compared with PID results, the traveling speed stabilized in a short period for the VFPID control method, and the control method was more adaptive with the changes of set point and engine speed.

**Key words:** Rice transplanter Traveling speed Variable universe Fuzzy-PID Adaptability

### 引言

精准农业技术是当今世界现代农业发展的前沿,是实现我国农业可持续发展的根本途径。农机智能化是实现精准农业变量投入、定位实施的核心

关键技术<sup>[1]</sup>。国内外对于农机智能化的研究主要集中在导航控制与变量作业控制两方面。农机行驶速度控制系统是导航控制和变量作业控制系统的重要组成部分<sup>[2-5]</sup>,为其提供稳定的行驶速度,有效地提高其控制精度。目前国内外在农机行驶速度控制

收稿日期: 2012-12-22 修回日期: 2013-01-31

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B0603)和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KGCX2-YW-138)

作者简介: 郭娜, 博士生, 主要从事精准农业变量控制研究, E-mail: gn8422@163.com

通讯作者: 胡静涛, 研究员, 博士生导师, 主要从事精准农业研究, E-mail: hujingtao@sia.com

的研究集中在系统设计阶段,对控制算法研究比较少<sup>[4-10]</sup>。

农机在田间的行驶速度变化是驱动力和各种行驶阻力共同作用的结果,与发动机输出功率、变速机构传动比、地形等因素有关,其过程是一个复杂的多变量、非线性、时变系统,精确的数学模型难以获得。常规 PID 控制由于其控制参数固定,对系统状态变化和干扰比较敏感,因此难以满足系统的性能要求;模糊控制不依赖于被控对象的数学模型,鲁棒性好,但是控制精度不高<sup>[11]</sup>;模糊 PID 控制利用模糊推理对 PID 参数进行在线修正,使系统具有了一定的自适应能力。但是常规模糊 PID 控制算法中,量化因子与比例因子选取过大或过小很容易造成模糊控制对 PID 参数调整过量或不足,影响系统的动态响应特性。

本文将变论域方法引入插秧机行驶速度模糊 PID 控制器设计中,利用论域伸缩因子实时调整输入输出变量的基本论域<sup>[12-13]</sup>,改善系统控制的动态特性和稳定精度,增加系统的自适应能力。同时,在分析农机变速机构的基础上,设计插秧机行驶速度控制系统,并以高速乘坐式插秧机为试验平台对上述控制算法进行道路试验验证。

## 1 农机行驶速度控制系统

### 1.1 农机变速机构

对于自主行走式的轮式农机,其驱动力由发动机产生,传动系将发动机的动力根据不同的作业需求调整到不同的扭矩和转速,并传递到车轮驱动农机行驶。因此,农机的行驶驱动力是由发动机的输出功率和变速机构的传动比共同决定的。变速机构是传动系的主要组成部分,按传动比变化方式可分为有级变速、无级变速两种<sup>[14]</sup>。

有级变速机构又称为机械式变速机构,是由多对齿轮啮合构成,驾驶员通过变速操纵机构使主动齿轮与不同挡位的从动齿轮啮合以获得不同的传动比,从而改变发动机输出的扭矩和转速。发动机的输出功率则通过与节气门相连的变速踏板来改变。装备有级变速机构的农机在田间作业过程中,挡位一般固定在某一适当位置,通过变速踏板调节行驶速度以适应作业需求。

无级变速机构可连续调节传动比,其实现形式多种多样,液压无级传动由于其结构紧凑,操作简单在联合收获机、乘坐式插秧机、中小功率拖拉机上的应用越来越广泛<sup>[15]</sup>。无级变速机构由液压泵和液压马达构成容积调速回路,液压泵将发动机的输出功率变为工作油压并驱动液压马达转动,通过改变

泵或马达的排量来获得传动比的无级变化。但是液压无级变速传动效率低,将液压变速与机械变速相结合实现大功率高效的液压机械无级变速传动机构在国外多种农机上广泛应用<sup>[16]</sup>。装备无级变速机构的农机在田间作业时,行驶速度的变化通过变速踏板调节变速机构的传动比来实现,并辅助油门手柄来增大发动机的扭矩和转速。

### 1.2 系统设计

农机在田间作业时需要保持基本恒定的速度行驶。根据 1.1 节对农机变速机构的分析,设计了一种通过控制变速踏板行程实现插秧机行驶速度调节的速度控制系统,如图 1 所示。控制器根据雷达速度传感器测量的插秧机实时行驶速度不断地调整变速踏板的位置,使插秧机始终保持在所设定的车速行驶,并通过田间计算机实时显示行驶速度等信息、配置速度设定值等参数或者启停速度控制功能。各个单元通过基于 ISO11783 协议的 CAN 总线实现实时可靠的通信,能够与导航控制单元相配合构成分布式控制网络。

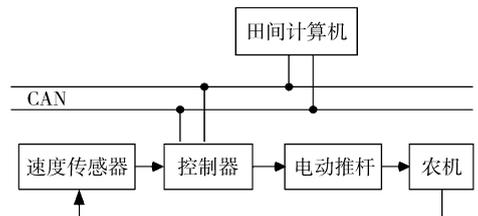


图 1 插秧机行驶速度控制系统

Fig. 1 Rice transplanter speed control system

本系统将带位置反馈的电动推杆与变速踏板通过钢丝绳相连,如图 2 所示。电动推杆收缩时,钢丝绳拉动踏板实现加速;电动推杆伸长时,踏板靠弹力恢复原位实现减速,变速踏板的位置可通过推杆内置的电位器进行测量。

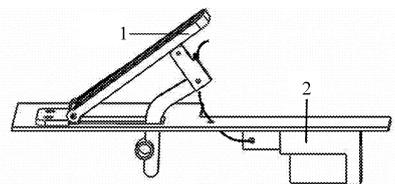


图 2 变速踏板改造图

Fig. 2 Structural diagram of gear shift pedal transformation

1. 变速踏板 2. 电动推杆

## 2 变论域自适应模糊 PID 控制设计

### 2.1 变论域模糊原理

模糊控制器的性能与控制规则数目的多寡呈正比。常规模糊控制中,增加控制规则会引起“规则爆炸”等问题,且规则过多则使控制器变得十分复杂并不利于实现。在控制过程中,随着系统误差逐

渐减小到零附近,原有的模糊划分变得粗糙,使模糊控制器不能发挥应有的作用。变论域模糊控制方法是在控制规则不变的情况下,引入论域伸缩因子使输入输出变量的论域随误差的减小或增大而相应的收缩和扩展,相当于增加控制规则<sup>[13,17]</sup>,提高了模糊控制的鲁棒性和自适应能力。

以双输入单输出模糊控制器为例,输入变量为系统的偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$ ,其基本论域分别为  $X_1 = [-E, E]$ 、 $X_2 = [-E_c, E_c]$ ; 输出变量为  $u$ ,其基本论域为  $Y = [-U, U]$ 。  $A = \{A_i\}$ 、 $B = \{B_i\}$  和  $C = \{C_i\}$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 分别为论域  $X_1$ 、 $X_2$  和  $Y$  上的模糊划分,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为语言变量;  $e_i$ 、 $e_{c_i}$ 、 $u_i$  分别表示  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  的峰点。具有模糊推理规则

If  $e$  is  $A_i$  and  $e_c$  is  $B_i$  then  $y$  is  $C_i$

的模糊系统可近似表示为一个二元分片插值函数

$$y(e, e_c) = \sum_{i=1}^m A_i(e)B_i(e_c)y_i \quad (1)$$

变论域是指论域  $X_1$ 、 $X_2$  和  $Y$  根据变量  $e$ 、 $e_c$  和  $y$  变化而调整。输入输出变量的论域伸缩因子分别记为  $\alpha_e(e)$ 、 $\alpha_{ec}(e_c)$  和  $\beta(y)$ , 则基本论域变为

$$X_1(e) = [-\alpha_e(e)E, \alpha_e(e)E]$$

$$X_2(e_c) = [-\alpha_{ec}(e_c)E_c, \alpha_{ec}(e_c)E_c]$$

$$Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U]$$

原有的基本论域  $X_1$ 、 $X_2$  和  $Y$  变为初始论域。根据文献[12],变论域模糊控制器可用二元分片动态插值函数表示

$$y(\mathbf{x}(t+1)) = \beta(y(\mathbf{x}(t))) \sum_{i=1}^m A_i\left(\frac{e(t)}{\alpha_e(e(t))}\right) B_i\left(\frac{e_c(t)}{\alpha_{ec}(e_c(t))}\right) u_i \quad (2)$$

其中  $\mathbf{x}(t) \triangleq (e(t), e_c(t))^T$

变论域模糊控制在实际应用时可与量化因子和比例因子两者相结合,便于理解和实现。量化因子与比例因子取值变化时也会引起论域的变化,常规模糊控制中由于二者为固定值而不能适时地对论域进行灵活的变化。  $[-N_e, N_e]$ 、 $[-N_{ec}, N_{ec}]$ 、 $[-N_u, N_u]$  分别表示变量  $e$ 、 $e_c$ 、 $u$  所对应的模糊论域,因此在变论域模糊控制中,量化因子表示为

$$K_e = \frac{1}{\alpha_e(x)} \frac{N_e}{E} \quad (3)$$

$$K_{ec} = \frac{1}{\alpha_{ec}(x)} \frac{N_{ec}}{E_c} \quad (4)$$

比例因子修正为

$$K_u = \beta(x) \frac{U}{N_u} \quad (5)$$

因此在应用时,只需将对应于初始论域的量化

因子除以对应的伸缩因子,比例因子乘以对应的伸缩因子即可。

## 2.2 控制器设计

根据 1.2 节可知,本文所设计的插秧机行驶速度控制系统只控制变速机构的传动比,因此控制算法需具有一定的自适应能力,使插秧机在田间地面起伏或发动机转速发生变化等情况下能够得到满意的控制效果。

插秧机行驶速度变论域模糊自适应 PID 控制器包括常规 PID 控制、模糊推理参数自整定、论域自调整 3 部分,控制器结构如图 3 所示。其中,  $r(t)$  为设定速度,  $y(t)$  为插秧机实时行驶速度,  $u(t)$  为控制器输出的控制量。控制器在运行过程中不断检测实时速度与设定速度之间的偏差  $e$  和偏差变化率  $e_c$ , 实时调整输入、输出变量的论域和 PID 控制参数,增加了系统的自适应能力。

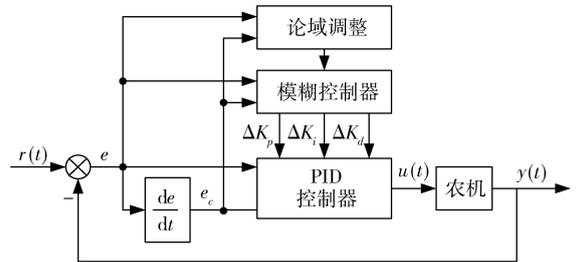


图 3 变论域模糊自适应 PID 控制器结构图  
Fig. 3 Variable universe adaptive fuzzy-PID controller diagram

(1) 输入输出变量的论域及其隶属度函数

模糊控制器输入为偏差  $e$  和偏差变化率  $e_c$ , 初始论域由插秧机行驶的速度范围所决定; 输出为 PID 参数的修正值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ , 初始论域根据一组整定好的 PID 参数确定。输入输出变量的模糊论域均设为  $[-6, 6]$ , 并分别在此论域上定义 7 个模糊子集, 即 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 记为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。各个模糊子集的隶属度函数选取为高斯函数, 其中心点分别为  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ , 如图 4 所示。

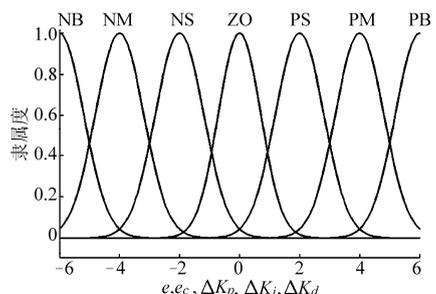


图 4 输入输出变量的隶属度函数  
Fig. 4 Membership function of inputs and outputs

## (2) 论域伸缩因子

论域伸缩因子的选择对模糊控制器性能的影响很大,需要满足对偶性、保零性、单调性、协调性和正规性<sup>[13]</sup>。本文选用易于实现的比例指数函数作为伸缩因子<sup>[18]</sup>,各输入输出变量的伸缩因子为

$$\alpha_e(e) = \left(\frac{|e|}{E}\right)^a \quad (0 < a < 1) \quad (6)$$

$$\alpha_{e_c}(e_c) = \left(\frac{|e_c|}{E_c}\right)^b \quad (0 < b < 1) \quad (7)$$

$$\beta_j(e, e_c) = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{|e|}{E}\right)^a + \left(\frac{|e_c|}{E_c}\right)^b \right] \quad (j = p, i, d) \quad (8)$$

## (3) 模糊控制规则

模糊控制规则是总结 PID 参照整定过程中工程设计人员的技术知识和实际操作经验制定的。模糊控制规则如表 1~3 所示。

表 1  $K_p$  的模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy rules of  $K_p$

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $K_i$  的模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy rules of  $K_i$

$e$	$e_c$						
	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	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表 3  $K_d$  的模糊控制规则

Tab. 3 Fuzzy rules of  $K_d$

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

## (4) 模糊推理及去模糊化

本文采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器相结合的算法<sup>[19]</sup>,得到 PID 参数修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的在线整定式

$$\Delta K_j(t) = \frac{\sum_{n=1}^{49} y_j^n \mu_{A^n}(e(t)) \mu_{B^n}(e_c(t))}{\sum_{n=1}^{49} \mu_{A^n}(e(t)) \mu_{B^n}(e_c(t))} K_{K_j} \quad (j = p, i, d) \quad (9)$$

式中  $y_j^n$ ——第  $n$  条模糊规则中模糊输出语言值的隶属度函数中心点

$\mu_{A^n}(e(t))$ 、 $\mu_{B^n}(e_c(t))$ ——输入变量  $e$  和  $e_c$  在第  $n$  条模糊规则中其模糊语言值的隶属度

$K_{K_j}$ ——各个输出变量的比例因子

将修正值代入以下各式求得 PID 控制器的参数

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (10)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \quad (11)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \quad (12)$$

式中  $K_p$ ——比例系数  $K_i$ ——积分系数

$K_d$ ——微分系数

$K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$ ——PID 控制的参数初值

## 3 试验验证

### 3.1 试验平台

以 6 行乘坐式高速水稻插秧机为试验平台。插秧机的驱动力由汽油机产生,经过液压机械无级(HMT)变速箱分别传递到插植部和行驶系,驱动插秧机完成插秧动作和行走。油门手柄与汽油机的节气门相连,可以改变发动机的输出功率;HMT 变速箱来自汽油机的动力通过两条线路传输,一路经过液压传动系传输到差动行星轮系的恒星轮上;另一路将动力直接传输到差动行星轮系的行星架上;两路传输的动力经差动行星轮系合成后由齿圈输出后再与机械变速箱相连。

液压传动系是由斜盘式变量柱塞泵和定量柱塞马达组成的闭式容积调速回路。变速踏板与变量柱塞泵的斜盘轴相连,能够无级调节插秧机的行驶速度。主变速手柄有 2 个挡位,可改变机械变速箱的传动比。油门手柄与汽油机节气门相连来改变发动机的输出功率。插秧机在田间作业时,主变速手柄固定一档,主要通过变速踏板改变行驶速度,同时根据田间地面状况拉下油门手柄以增加驱动力。

按照 1.2 节所设计的插秧机行驶速度控制系统对插秧机进行改造,将变速踏板与电动推杆相连,并

将田间计算机、控制器、速度传感器安装在合适位置,改造后插秧机试验平台如图 5 所示。

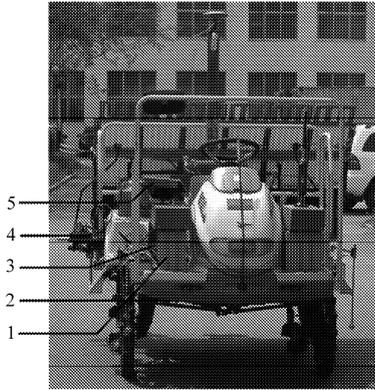


图 5 插秧机试验平台

Fig. 5 Rice transplanter experiment platform

1. 控制器 2. 电动推杆 3. 变速踏板 4. 速度传感器 5. 田间计算机

### 3.2 试验设计

为了检验本文所设计的变论域自适应模糊 PID 控制器对于插秧机行驶速度控制的有效性,在插秧机试验平台上进行了道路试验,并将试验结果与常规 PID 控制结果相比较。共设计以下了 3 种试验,观察并记录试验结果。

(1) 速度设定值固定试验,分别选择 0.8、1.0、1.2 m/s 3 个速度设定值,控制器控制插秧机按设定速度行驶。

(2) 速度设定值变化试验,插秧机行驶速度设定值由 0.8 ~ 1.2 m/s 和 1.2 ~ 0.8 m/s 的变化,在插秧机行驶速度在初始设定值达到稳定后,通过田间计算机修改插秧机的设定速度,并通过 CAN 总线发送到控制器,控制器控制插秧机按修改后的速度设定值行驶。

(3) 油门手柄拉下试验,设定速度为 0.8 m/s 和 1.2 m/s 时,在插秧机行驶速度设定值稳定后,拉下油门手柄,发动机输出功率增加,系统状态发生变化,控制器自整定 PID 参数控制插秧机重新稳定在设定值。

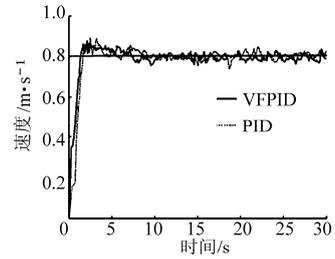
### 3.3 试验结果分析

#### (1) 速度设定值固定试验结果

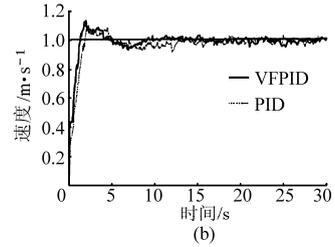
由图 6 可知,对于不同的设定速度,两种控制算法均能使速度在 10 s 内稳定在设定值附近,但是 VFPIID 控制算法响应更为迅速。由表 4 可知,对于两种控制算法的控制效果相差不大,稳态平均误差均小于 0.016 6 m/s。

#### (2) 速度设定值变化试验结果

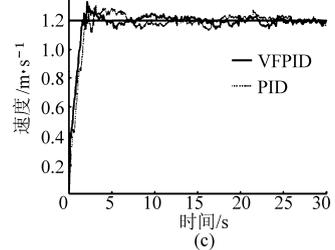
由图 7a 可知,速度设定值在 27 s 时由 1.2 m/s 下降到 0.8 m/s,插秧机行驶速度在 VFPIID 和 PID 控制下分别在 6 s 和 14 s 后稳定在 0.8 m/s。由



(a)



(b)



(c)

图 6 速度设定值固定控制结果

Fig. 6 Result of fixed set point

(a) 速度设定值为 0.8 m/s (b) 速度设定值为 1.0 m/s  
(c) 速度设定值为 1.2 m/s

表 4 设定值固定试验误差

Tab. 4 Error of fixed set point m/s

参数	控制算法	速度设定值		
		0.8	1.0	1.2
平均误差	VFPIID	0.013 0	0.013 8	0.016 6
	PID	0.012 9	0.015 3	0.014 9
均方差	VFPIID	0.016 1	0.017 7	0.020 3
	PID	0.016 4	0.021 6	0.023 3
超调量	VFPIID	0.052 4	0.114 7	0.098 4
	PID	0.089 4	0.105 9	0.102 8

图 7b 可知,速度设定值在 27 s 时由 0.8 m/s 上升到 1.2 m/s,插秧机行驶速度 VFPIID 和 PID 控制下分别在 7 s 和 13 s 后稳定在 0.8 m/s。比较可知,VFPIID 控制算法相应更为迅速,调节时间更短,约为 PID 控制算法的一半。比较表 4 和表 5 可知,重新稳定后的平均误差均有所增加,但 VFPIID 控制算法误差增加较少,稳定性更好。

#### (3) 拉下油门手柄试验结果

由图 8a 可知,当速度设定值为 0.8 m/s 时,油门手柄拉下后,插秧机行驶速度在 VFPIID 和 PID 控制下分别在 8 s 和 22 s 后基本稳定;由图 8b 可知,当速度设定值为 1.2 m/s 时,油门手柄拉下后,插秧机行驶速度在 VFPIID 控制下在 7 s 后基本稳定,而

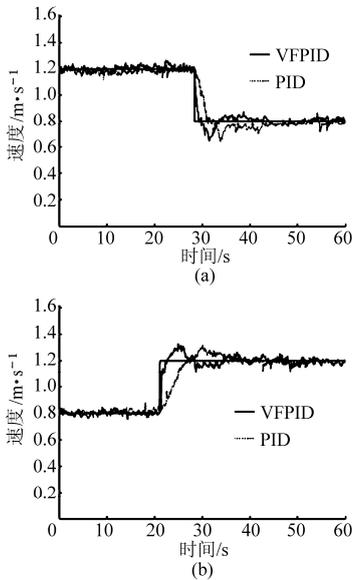


图7 速度设定值变化控制效果

Fig.7 Result of speed set point changed

- (a) 速度设定值 1.2 m/s 降至 0.8 m/s  
(b) 速度设定值 0.8 m/s 升至 1.2 m/s

表5 设定值变化试验误差

Tab.5 Error of set point changed m/s

参数	控制算法	速度设定值	
		0.8 ~ 1.2	1.2 ~ 0.8
重新稳定后平均误差	VFPID	0.014 9	0.018 7
	PID	0.015 4	0.019 8
超调量	VFPID	0.131 5	0.154 3
	PID	0.131 2	0.150 6

PID 控制下经过 30 s 仍无法稳定。因此, VFPID 控制算法具有较好的自适应能力。

试验结果表明, 本文所提出的控制策略对插秧机行驶速度控制具有较高的可靠性和稳定性, 速度稳态平均误差控制在 0.02 m/s 以内, 与 PID 控制算法相比, 响应更快, 调节时间更短, 超调量较小, 并且对设定值变化和发动机输出功率变化具有更好的自适应能力。

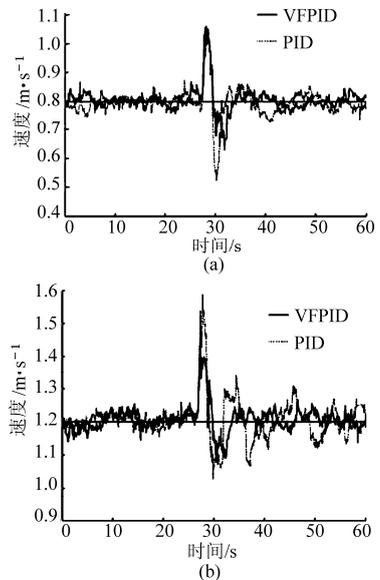


图8 油门手柄拉下试验结果

Fig.8 Result of pulled down throttle handles

- (a) 速度设定值为 0.8 m/s (b) 速度设定值为 1.2 m/s

表6 油门手柄拉下试验误差

Tab.6 Error of pulled down throttle handle m/s

参数	控制算法	速度设定值	
		0.8	1.2
重新稳定后平均误差	VFPID	0.017 4	0.019 8
	PID	0.018 7	
最大误差	VFPID	0.168 5	0.206 1
	PID	0.281 3	0.339 2

## 4 结束语

提出了基于变论域自适应模糊 PID 插秧机行驶速度控制策略, 通过模糊控制算法实现对 PID 控制参数的在线自整定, 引入变论域方法, 提高了控制的精度和自适应能力; 以高速乘坐式插秧机为试验平台进行了道路试验, 试验结果表明, 该控制策略对速度控制是可行并有效的, 插秧机行驶速度平均误差小于 0.02 m/s, 与 PID 控制算法相比, 调节时间更短, 超调量较小, 并且具有更好的自适应能力。

## 参 考 文 献

- 赵春江. 精准农业研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 刘志壮, 徐汉虹, 洪添胜, 等. 在线混药式变量喷雾系统设计与实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 93 ~ 96.  
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 93 ~ 96. (in Chinese)
- 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101 ~ 104.  
Chen Liping, Huang Wenqian, Meng Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101 ~ 104. (in Chinese)
- 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118 ~ 122.  
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter [J]. Transactions of the CSEA, 2009, 25(4): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186 ~ 190.  
Wei Liguoguo, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186 ~ 190. (in Chinese)

- 6 Coen T, Saeys W, Missotten B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(1):47~55.
- 7 Coen T, Anthonis J, de Baerdemaeker J. Cruise control using model predictive control with constraints [J]. *Computer and Electronics in Agriculture*, 2008, 63(2):227~236.
- 8 林伟, 吕新民, 樊建荣. 基于喂入量的联合收割机速度控制系统研究[J]. *农机化研究*, 2009(5):118~121.  
Lin Wei, Lü Xinmin, Fan Jianrong. Research on combine harvesters' velocity control system based on feed quantity[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(5):118~121. (in Chinese)
- 9 陈进, 郑世宇, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10):110~115.  
Chen Jin, Zheng Shiyu, Li Yaoming, et al. Grey predictive fuzzy control system of forward speed for combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10):110~115. (in Chinese)
- 10 韩科立, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4):21~25.  
Han Keli, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4):21~25. (in Chinese)
- 11 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- 12 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J]. *中国科学:E 辑*, 2002, 32(2):211~223.
- 13 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. *中国科学:E 辑*, 1999, 29(1):33~42.
- 14 宋建农. 农业机械及农具[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- 15 昌茂红. HST 在农业机械上的应用及前景[J]. *拖拉机及农用运输车*, 2007, 34(1):4~5.  
Chang Maohong. Application and trend of HST on agricultural machinery[J]. *Tractors and Farm Transporter*, 2007, 34(1):4~5. (in Chinese)
- 16 徐立友. 拖拉机液力机械无级变速器特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.  
Xu Liyou. Study on characteristics of hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 17 潘永平, 王钦若. 变论域自适应模糊 PID 控制器设计[J]. *电气自动化*, 2007, 29(3):9~11.  
Pan Yongping, Wang Qinruo. Design of adaptive fuzzy-PID controller with variable universe[J]. *Electrical Automation*, 2007, 29(3):9~11. (in Chinese)
- 18 潘湘飞, 宋立忠. 几种变论域模糊控制收缩因子有效性研究[J]. *控制工程*, 2008(15):106~110.  
Pan Xiangfei, Song Lizhong. Effectiveness of several shrinkage factors of variable universe fuzzy control[J]. *Control Engineering of China*, 2008(15):106~110. (in Chinese)
- 19 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:14~118.

~~~~~

(上接第 232 页)

- 13 马晓丹, 谭峰, 许少华. 基于量子神经网络的马铃薯早疫病诊断模型[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6):174~178.  
Ma Xiaodan, Tan Feng, Xu Shaohua. Diagnosis method of potato early blight based on quantum neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6):174~178. (in Chinese)
- 14 潘俊任. 基于相似度的模糊推理算法研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2010.
- 15 韩敏, 范迎南. 基于 T-S 模型的扩展型模糊神经网络及应用[J]. *系统工程学报*, 2007, 22(5):532~538.  
Han Min, Fan Yingnan. Extended fuzzy neural network based on T-S model and its application [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2007, 22(5):532~538. (in Chinese)
- 16 舒桂清, 李力, 肖平. 基于多准则的多层模糊神经网络学习算法[J]. *安徽大学学报:自然科学版*, 2007, 31(1):39~42.  
Shu Guiqing, Li Li, Xiao Ping. A multi-criteria learning method for multi-layer fuzzy neural networks [J]. *Journal of Anhui University: Natural Science Edition*, 2007, 31(1):39~42. (in Chinese)
- 17 范胜辉. 量子进化算法及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- 18 关海鸥, 许少华, 谭峰. 基于遗传模糊神经网络的植物病斑区域图像分割模型[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11):163~168.  
Guan Haiou, Xu Shaohua, Tan Feng. Image segmentation model of plant lesion based on genetic algorithm and fuzzy neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11):163~168. (in Chinese)
- 19 许少华, 许辰, 郝兴, 等. 一种改进的双链量子遗传算法及其应用[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(6):2090~2093.  
Xu Shaohua, Xu Chen, Hao Xing, et al. Improved quantum genetic algorithm with double chains and its application [J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(6):2090~2093. (in Chinese)
- 20 李盼池, 李士勇. 基于量子遗传算法的正规模糊神经网络控制器设计[J]. *系统仿真学报*, 2008, 19(16):3710~3716.  
Li Panchi, Li Shiyong. Optimal design of normalized fuzzy neural network controller based on quantum genetic algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 19(16):3710~3716. (in Chinese)
- 21 杨俊安, 庄镇泉, 史亮. 多宇宙并行量子遗传算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(6):923~928.  
Yang Jun'an, Zhuang Zhenquan, Shi Liang. Multi universe parallel quantum genetic algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6):923~928. (in Chinese)
- 22 司永胜, 乔军, 刘刚. 基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8):161~165.  
Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang. Recognition and shape features extraction of apples based on machine vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8):161~165. (in Chinese)