

联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统*

陈进¹ 郑世宇¹ 李耀明² 吕世杰¹

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 分析了联合收获机的工作过程, 针对其工作过程中的非线性、时变、大滞后特性, 提出了采用灰色预测模糊控制方法对联合收获机的前进速度进行自动控制, 使其负荷保持稳定。分析了预测控制和模糊控制相结合的必要性和重要性, 设计了基于灰色预测模糊控制的联合收获机前进速度控制装置, 建立了灰色预测模糊控制模型, 并进行了仿真和试验。仿真结果表明, 运用灰色预测模糊控制算法能使控制系统的调整时间更短、超调量更小、控制性能更加优越。

关键词: 联合收获机 前进速度 灰色预测 模糊控制

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0110-06

Grey Predictive Fuzzy Control System of Forward Speed for Combine Harvester

Chen Jin¹ Zheng Shiyu¹ Li Yaoming² Lü Shijie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

The working process of combine harvester was analyzed, aiming at the properties of nonlinear, time varying and delay. Fuzzy control with grey prediction algorithm was used to control the speed of combine harvester and keep the load stable. The necessity and importance of the combining predictive control with fuzzy control was analyzed. Forward speed control device for combine harvester based on grey prediction fuzzy control was designed. The grey prediction fuzzy control model was established, simulated and tested. The results showed that the control system with the grey prediction fuzzy control algorithm had shorter adjustment time, smaller overshoot and more superior control performance.

Key words Combine harvester, Forward speed, Grey prediction, Fuzzy control

引言

性能良好的联合收获机应该在不超过额定喂入量和允许损失量的前提下, 具有最大的前进速度^[1]。脱粒滚筒作为联合收获机的重要工作部件, 其脱粒性能不仅与喂入量和脱粒滚筒转速等可控因素有关, 还与地理环境、作物成熟度和含水率等不可控因素有关, 均匀合理的喂入量和稳定的滚筒转速是保证脱粒性能的前提。国内外农机研究人员在联

合收获机负荷智能监测和联合收获机前进速度的自动控制方面作了不少研究, 取得了一定的成果^[2-6]。

联合收获机前进速度自动控制的目的是保持均匀合理的喂入量, 使脱粒滚筒和螺旋输送器等主要工作部件的负荷稳定, 以获取最佳脱粒质量和最大前进速度。然而, 通过对脱粒滚筒或螺旋输送机转速的监测来控制前进速度有很大的滞后性, 现有的研究成果中对控制滞后的问题还没有很好地解决, 控制系统实时性差。谷物经由割台螺旋输送器和倾

收稿日期: 2011-03-24 修回日期: 2011-04-08

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2010AA101402)

作者简介: 陈进, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备监测与控制技术研究, E-mail: chenjinjd126@126.com

通讯作者: 李耀明, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备关键技术基础理论及产品开发研究, E-mail: ymli@ujs.edu.cn

斜输送机才进入脱粒滚筒,因此当发现脱粒滚筒转速急剧下降时再进行处理已经滞后一定的时间,很容易直接造成滚筒的堵塞。

本文以灰色预测模糊控制理论为基础,设计以单片机为控制器的联合收获机前进速度控制装置,在保证联合收获机具有稳定的负荷和良好的脱粒性能的情况下,快速地对故障作出预警,并及时对前进速度进行控制,重点解决前进速度控制中的滞后问题。

1 前进速度控制系统组成及工作原理

联合收获机前进速度自动控制系统硬件组成如图 1 所示,主要由信号采集调理模块、参数设定模块、液晶显示模块、声光报警模块、调速执行机构以及单片机控制器组成。本系统以雷沃谷神牌纵联联合收获机作为试验样机,单片机控制器选用 C8051F020,它在一个芯片内集成了构成一个单片机数据采集或控制系统所需要的几乎所有模拟和数字外设及其他功能部件。滚筒转速、螺旋输送机转速以及前进速度的测量均用霍尔传感器采集转速信号,经斯密特触发器滤波进入单片机。液晶显示模块选用内藏 T6963C 控制驱动器的 JM240128B 图形点阵式液晶模块。声光报警模块通过蜂鸣器和 LED 灯的闪动显示故障。参数设定模块采用 4 个按键“设定”、“+”、“-”和“确认”,实现参数的设定。调速执行机构以 C8051F020 芯片内自带的 DAC 控制器外接功率放大电路驱动试验样机内部的速度控制阀实现速度的自动控制。

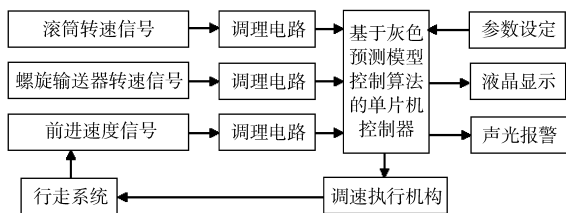


图 1 控制系统硬件组成框图

Fig. 1 Control system hardware block diagram

联合收获机的工作过程是非线性时变且有大延时的复杂过程。以脱粒滚筒为例,假设谷物通过倾斜输送器的时间为 ΔT ,则脱粒滚筒当前喂入量不是机器当前时刻割台处的喂入量,脱粒滚筒转速的变化相对割台处谷物密度的变化滞后 ΔT 时间。另外,控制器发出控制命令改变前进速度也需要一定的时间,联合收获机才能达到相应的控制速度。本系统将灰色预测控制引入到模糊控制中构成灰色预测模糊控制,并将灰色预测模糊控制算法应用于联合收获机的前进速度控制系统中,解决控制过程中

存在的非线性、时变和时滞问题^[7-8]。其基本原理是首先采集计算脱粒滚筒和输粮螺旋输送机转速与其各自的额定值的偏差以及偏差的变化量,之后由灰色预测算法计算出 ΔT 时间后的预测值,将预测值作为模糊控制系统的输入量,经过模糊推理获得机器前进速度的改变量,进而通过前进速度执行机构调整收获机的前进速度。

控制系统中,脱粒滚筒转速、输粮螺旋输送机转速和前进速度为控制系统的当前输入信号,输入信号经过相应的调理电路后输入到控制器中,经过预测模糊控制算法,得出前进速度的改变量。控制器根据改变量输出控制信号驱动前进速度执行机构调整收获机的前进速度,使前进速度按照预期的改变量进行调整。各输入信号通过液晶显示器显示,除前进速度外,其他输入信号还具有越限预警和故障报警功能。

2 灰色预测模糊控制模型的建立

灰色预测模糊控制是将灰色预测模型输出的过程预测值用模糊推理方式求得控制量。其结构框图如图 2 所示。

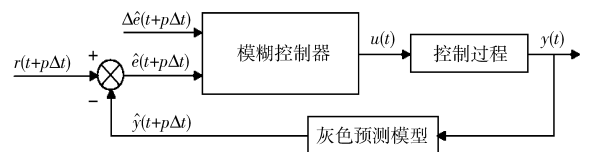


图 2 灰色预测模糊控制器结构框图

Fig. 2 Block diagram of gray predictive fuzzy controller

图 2 中, $r(t+p\Delta t)$ 是 $(t+p\Delta t)$ 时刻的设定值, $u(t)$ 为模糊控制器输出的控制量, $y(t)$ 为过程输出值, $\hat{y}(t+p\Delta t)$ 为 $(t+p\Delta t)$ 时刻的预测值,其中 Δt 为采样周期, p 为预测步数。图 2 中的预测模糊控制器的结构与常规二维模糊控制器相同,都是以偏差及其变化量作为系统的输入。所不同的是,两个输入变量分别为 $(t+p\Delta t)$ 时刻的预测偏差 $\hat{e}(t+p\Delta t)$ 和预测偏差的变化 $\Delta\hat{e}(t+p\Delta t)$ 。

2.1 灰色预测模型的建立

通常灰色模型用 $GM(M, N)$ 表示, M 代表模型方程的阶数, N 代表模型方程变量的个数,本文以脱粒滚筒为例说明其灰色预测模型的建立。根据 GM 模型的建模步骤对滚筒转速进行预测,需要确定的参数包括原始数列 $\{x^{(0)}(i)\} (i=1, 2, \dots, n)$ 、数列长度 n 、预测步数 p 、发展系数 a 、灰色输入 $u^{[9]}$ 。

原始数列由控制系统采样得到,其长度一般 $n \geq 4$,为了简化计算又不失准确性,本设计中取 $n=4$ 。控制系统每次采样得到脱粒滚筒转速 $n_{CT}^{(0)}(t)$,可得

原始数列为

$$n_{\text{GT}}^{(0)} = \{n_{\text{GT}}^{(0)}(1), n_{\text{GT}}^{(0)}(2), n_{\text{GT}}^{(0)}(3), n_{\text{GT}}^{(0)}(4)\} \quad (1)$$

若系统的采样周期为 0.5 s, 谷物经过倾斜输送机到达脱粒滚筒的时间为 1.5 s, 调速执行机构的响应时间约为 1 s, 选定预测步数 $p=5$ 。

滚筒转速都为正值, 不需要正则化处理。对原始数列进行累加处理, 进而得到累加生成数列

$$\begin{cases} n^{(1)}(1) = n_{\text{GT}}^{(0)}(1) & (k=1) \\ n^{(1)}(2) = n_{\text{GT}}^{(0)}(1) + n_{\text{GT}}^{(0)}(2) & (k=2) \\ n^{(1)}(3) = n_{\text{GT}}^{(0)}(1) + n_{\text{GT}}^{(0)}(2) + n_{\text{GT}}^{(0)}(3) & (k=3) \\ n^{(1)}(4) = n_{\text{GT}}^{(0)}(1) + n_{\text{GT}}^{(0)}(2) + n_{\text{GT}}^{(0)}(3) + \\ \quad n_{\text{GT}}^{(0)}(4) & (k=4) \end{cases} \quad (2)$$

背景值 $z^{(1)}(k)$ 为

$$\begin{cases} z^{(1)}(2) = 0.5(n^{(1)}(1) + n^{(1)}(2)) & (k=2) \\ z^{(1)}(3) = 0.5(n^{(1)}(2) + n^{(1)}(3)) & (k=3) \\ z^{(1)}(4) = 0.5(n^{(1)}(3) + n^{(1)}(4)) & (k=4) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{B} = \begin{bmatrix} (z^{(1)}(2))^2 + (z^{(1)}(3))^2 + (z^{(1)}(4))^2 & & \\ & -(z^{(1)}(2) + z^{(1)}(3) + z^{(1)}(4)) & \\ & & (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T = \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{F - C^2} \begin{bmatrix} C - z^{(1)}(2) & C - z^{(1)}(3) & C - z^{(1)}(4) \\ F - Cz^{(1)}(2) & F - Cz^{(1)}(3) & F - Cz^{(1)}(4) \end{bmatrix} \quad (9)$$

进而可以求得

$$(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{X}_N = \frac{1}{F - C^2} \begin{pmatrix} CD - E \\ FD - CE \end{pmatrix} \quad (10)$$

所以发展系数为

$$a = \frac{CD - E}{F - C^2} \quad (11)$$

灰色输入为

$$u = \frac{FD - CE}{F - C^2} \quad (12)$$

求出以上参数后, 就可以求得脱粒滚筒在 $p\Delta t$ 时间后转速的预测值 $\hat{n}_{\text{GT}}^{(0)}(4+p)$, 即

$$\hat{n}_{\text{GT}}^{(0)}(4+p) = \left(n_{\text{GT}}^{(0)}(4) - \frac{u}{a} \right) e^{-ap} (1 - e^{-a}) \quad (13)$$

2.2 灰色预测模糊控制器的设计

模糊控制器的设计包括模糊化过程、知识库(含数据库和规则库)、模糊推理和反模糊化计算4部分^[10]。本文以滚筒为例说明前进速度控制系统中模糊控制器的建立。若试验测定脱粒滚筒转速为 0 ~ 906 r/min, 正常工作转速范围是 700 ~ 906 r/min, 额定转速是 840 r/min 左右, 则其偏差预测值 $\hat{e}_{\text{GT}}(t + \Delta T)$ 的

得到矩阵 \mathbf{B} 和数据向量 \mathbf{X}_N 为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ -z^{(1)}(4) & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_N = [n_{\text{GT}}^{(0)}(2) \quad n_{\text{GT}}^{(0)}(3) \quad n_{\text{GT}}^{(0)}(4)]^T \quad (5)$$

求得矩阵 \mathbf{B} 的转秩矩阵为

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & -z^{(1)}(3) & -z^{(1)}(4) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

定义 4 个计算参数

$$\begin{cases} C = \sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) \\ D = \sum_{k=2}^4 n_{\text{GT}}^{(0)}(k) \\ E = \sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) n_{\text{GT}}^{(0)}(k) \\ F = \sum_{k=2}^4 (z^{(1)}(k))^2 \end{cases} \quad (7)$$

则求得

$$-\begin{pmatrix} (z^{(1)}(2) + z^{(1)}(3) + z^{(1)}(4)) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} F & -C \\ -C & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

基本论域为 (-140 ~ 66 r/min)。为了精细描述变量, 将基本论域划分为 13 个等级, 得到偏差预测值 $\hat{e}_{\text{GT}}(t + \Delta T)$ 的模糊子集论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。每个等级对应的偏差变化范围如表 1 所示。

表 1 $\hat{e}_{\text{GT}}(t + \Delta T)$ 的量化表

Tab. 1 $\hat{e}_{\text{GT}}(t + \Delta T)$ quantization table

量化等级	变化范围/r·min ⁻¹	量化等级	变化范围/r·min ⁻¹
-6	-140 ~ -130	6	55 ~ 66
-5	-130 ~ -105	5	45 ~ 55
-4	-105 ~ -80	4	35 ~ 45
-3	-80 ~ -55	5	25 ~ 35
-2	-55 ~ -30	2	15 ~ 25
-1	-30 ~ -5	1	5 ~ 15
0	-5 ~ 5		

对应的模糊语言变量集为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 用英文字头缩写为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。 $\hat{e}_{\text{GT}}(t + \Delta T)$ 对应的语言变量若为正, 表明滚筒转速高于额定转速; 若为负, 则说明滚筒转速低于额定转速。隶属度函数曲线如图 3 所示。

分析试验数据可知, 采样时间为 0.5 s, 当滚筒转速下降率超过 30 r/(min·s) 时, 表示滚筒会有堵塞的趋势。为了防止滚筒堵塞, 将滚筒转速变化率

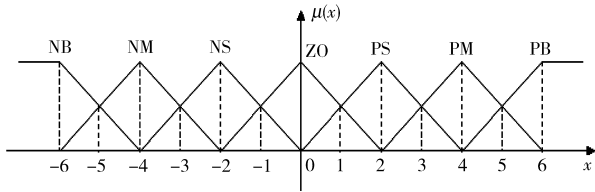


图 3 输入隶属度函数

Fig.3 Input membership function

下限设为 $-30 \text{ r}/(\text{min}\cdot\text{s})$ 。由于采样时间设为 0.5 s ，所以滚筒转速偏差变化量的下限为 $-15 \text{ r}/\text{min}$ ，则 $\Delta \hat{e}_{\text{CT}}(t + \Delta T)$ 的基本论域为 $(-15 \sim 15 \text{ r}/\text{min})$ ，模糊子集论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。对应的模糊语言变量集为 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ ，用英文字头缩写为 $\{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ 。 $\Delta \hat{e}_{\text{CT}}(t + \Delta T)$ 对应的语言变量若为正，说明滚筒转速在上升；若为负，则表明滚筒转速正在下降。采用图 3 所示的三角型分布隶属度函数进行模糊语言变量的赋值。

模糊控制系统的控制对象是调速执行机构，模糊子集论域也可分为 13 级 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，其相应的模糊语言变量集定义为 7 个等级： $\{\text{减速大, 减速中, 减速小, 正常, 加速小, 加速中, 加速大}\}$ ，记为 $\{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ 。采用图 4 所示的三角型分布隶属度函数进行模糊语言变量的赋值。

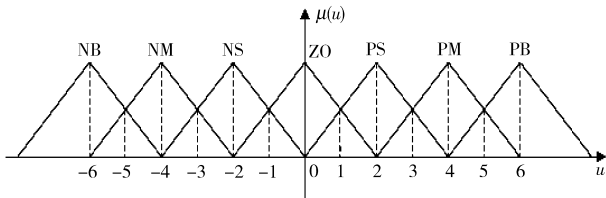


图 4 输出隶属度函数

Fig.4 Output membership function

根据前进速度控制系统的实际运行经验，得到相应控制量的模糊值，再进行试验分析、归纳，共制定了 49 条控制规则，建立的模糊控制规则如表 2 所示。

在表 2 中，如果当滚筒转速的偏差为 NB，偏差的变化量为 NB 时，说明滚筒转速远低于额定值且有继续减小的趋势，所以控制量 u 应选择减速大，即 NB。当滚筒转速的偏差为 ZO，偏差的变化量为 PM 时，说明滚筒转速在标定值附近但有逐渐增大的趋势，所以此时为防止超调，控制量 u 选择为加速小，即 PS。当滚筒转速的偏差为 PM，偏差的变化量为 NM 时，表明滚筒转速较高且有逐渐减小的趋势，其能自行回到标定工况点，因此输出量 u 选择为不调整，即 ZO。

表 2 模糊控制规则

Tab.2 Fuzzy control rule

偏差变化量 e	滚筒转速偏差 e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO
ZO	NM	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

2.3 灰色预测模糊控制器算法设计

滚筒转速的偏差和偏差变化量的预测结果分别用变量 $e_{\text{Gip}}, e_{\text{cGip}}$ 表示，相应的螺旋输送机转速偏差和偏差变化量的预测结果用 e_{Jip} 和 e_{cJip} 来表示。以滚筒为例，其灰色预测算法流程如图 5 所示。

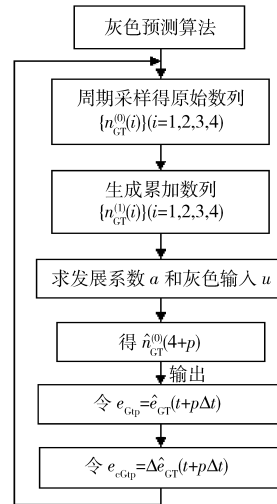


图 5 灰色预测算法流程图

Fig.5 Flow chart of grey predictive algorithm

模糊控制算法流程图如图 6 所示。在单片机中实现模糊控制算法，必须首先在单片机中建立输入、输出量的偏差和偏差变化量的量化表和模糊规则查询表。对于特定的输入，通过输入量的量化表查得其对应的量化等级得到对应的模糊量，之后根据模糊规则查询表取得系统的输出量的量化等级，最后由输出量的量化表得到调速执行机构的执行方案。

3 仿真与试验

3.1 仿真与结果分析

在 Matlab 的 Simulink 图形仿真环境下利用 Fuzzy Logic Toolbox 工具箱设计了模糊控制器，采用单位阶跃输入信号对前进速度控制系统进行灰色预测模糊控制仿真，系统响应曲线如图 7、8 所示。

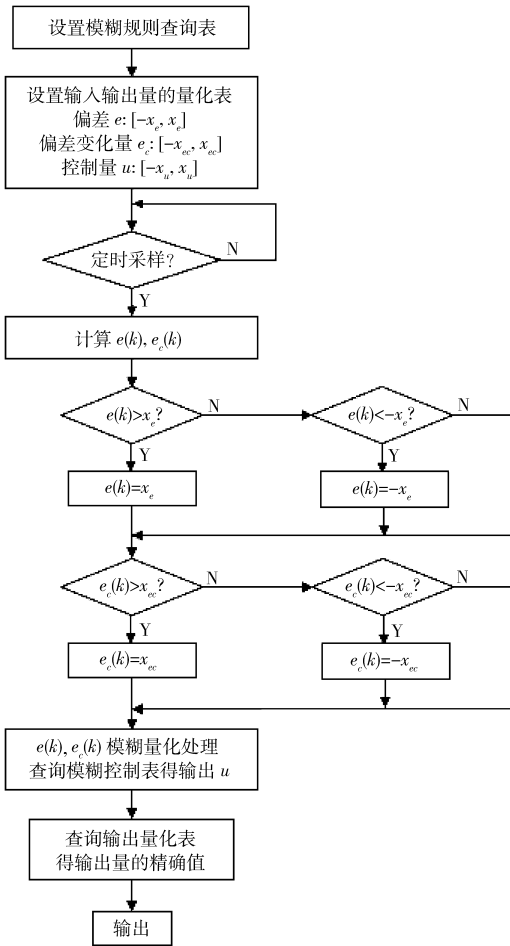


图6 模糊控制算法流程图

Fig. 6 Flow chart of fuzzy control algorithm

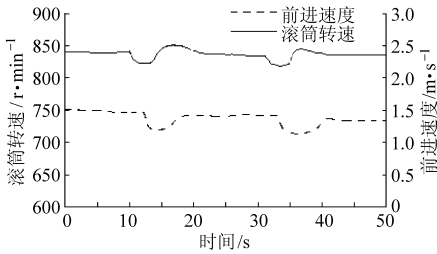


图7 模糊控制仿真结果

Fig. 7 Simulation results of fuzzy control

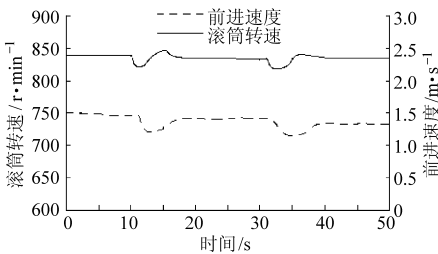


图8 灰色预测模糊控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of grey predictive fuzzy control

从图7、8中可以看出,在第10秒和第32秒左右时分别给系统添加一个阶跃信号,普通模糊控制系统约2 s后前进速度开始减小,脱粒滚筒转速经过约8 s的调整后回到840 r/min附近,其波动范围

在820 ~ 850 r/min之间,脱粒滚筒的负荷能够稳定在合理的范围内。灰色预测模糊控制系统约1 s后前进速度开始减小,脱粒滚筒转速经过约5 s的调整后回到840 r/min附近,其波动范围在825 ~ 848 r/min之间,脱粒滚筒的负荷能够稳定在合理的范围内。与单纯的模糊控制算法相比,灰色预测模糊算法的调整时间更短、超调量更小、控制性能更加优越,能够使得滚筒的负荷保持稳定。

3.2 田间试验与结果分析

将该控制系统用于雷沃谷神牌切纵流联合收获机上,分两种情况进行了水稻收获试验。

(1) 模糊控制变割幅收获

在自动收获状态下,选择固定的割茬高度(10 ~ 20 cm),通过改变割幅改变喂入量,记录了采用单纯模糊控制系统的滚筒转速和前进速度的变化,收获距离约为80 m,得到二者关系如图9所示。

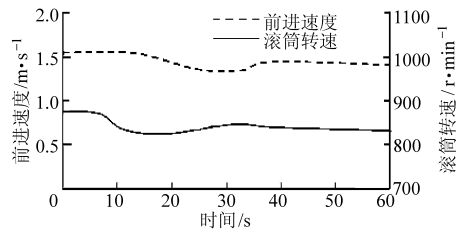


图9 模糊控制变割幅收获数据曲线

Fig. 9 Variable cut width harvest curves with fuzzy control

(2) 灰色预测模糊控制变割幅收获

在自动收获状态下,选择固定的割茬高度(10 ~ 20 cm),通过改变割幅改变喂入量,记录了采用灰色预测模糊控制系统的滚筒转速和前进速度的变化,收获距离为80 m。滚筒转速与前进速度的变化关系如图10所示。

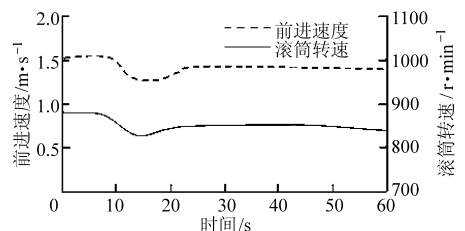


图10 灰色预测模糊控制变割幅收获数据曲线

Fig. 10 Variable cut width harvest curves with grey predictive fuzzy control

从图9、10中可以看出,采用单纯模糊控制系统时,滚筒转速在约12 s时低于预警值820 r/min,前进速度约在14 s时才开始进行调整,经过了8 ~ 10 s的调整后脱粒滚筒转速稳定在840 r/min左右。而采用灰色预测模糊控制的系统时,滚筒转速约在8 s时开始下降,前进速度约在1 s左右进行调整,经过4 ~ 5 s调速后滚筒转速稳定在840 r/min左右。试

验结果与仿真结果吻合,表明了与单纯的模糊控制相比,灰色预测模糊控制系统的控制性能更加优越。

4 结束语

针对联合收获机工作过程中非线性、时变、大滞后的特点,设计了基于灰色预测模糊控制的联合收获机前进速度控制装置,建立了灰色预测模糊控制

模型。该控制系统以单片机为控制器,通过灰色预测模糊控制算法的计算,得到前进速度的改变量用以对前进速度进行调整。对控制过程进行了仿真及试验,结果表明该控制系统比单一模糊控制方法的控制过程调整时间更短、超调量更小、控制性能更加优越,使得联合收获机工作在高效稳定的工作状态。

参 考 文 献

- 1 余利锋,肖新棉,兰海军. 国内外农业机械化现状与发展趋势[J]. 湖北农机化, 2007(6):36~37.
- 2 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.
- 3 李国栋,李勇智,张际先,等. 联合收获机脱粒滚筒的 PID 恒速控制[J]. 农业机械学报,2000,31(1):48~50.
Li Guodong, Li Yongzhi, Zhang Jixian, et al. PID control of constant palstance of a combine cylinder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(1): 48~50. (in Chinese)
- 4 李耀明,丁为民,陈进. 梳脱式联合收获机脱粒输送装置自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5):86~89.
Li Yaoming, Ding Weimin, Chen Jin. Automatic controller for threshing and transporting devices of stripping combine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004,35(5):86~89. (in Chinese)
- 5 介战,陈家新,刘红俊. GPS 联合收获机随机喂入量模糊控制技术[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1):55~58.
Jie Zhan, Chen Jiabin, Liu Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(1):55~58. (in Chinese)
- 6 张淑红,陈进. 联合收获机自动报警系统的设计[J]. 农机化研究, 2002,24(3):72~74.
Zhang Shuhong, Chen Jin. A study on the auto-alarm system of combine harvester[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2002,24(3):72~74. (in Chinese)
- 7 Zhou Yuan, Liu Mingshan, Zhang Zida, et al. Research on application of fuzzy neural network in combine harvester[C]// *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008.
- 8 蔡自兴. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- 9 钱积新,赵均,徐祖华. 预测控制[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 10 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

(上接第 124 页)

- 6 Mason I G. Mathematical modeling of the composting process: a review [J]. *Waster Management*, 2006, 26(1): 3~21.
- 7 Matshe N F, Andrews J F. A mathematical model for the continuous cultivation of thermophilic microorganisms [J]. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, 1973: 77~90.
- 8 张锐. 小型试验室好氧堆肥反应器系统研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Zhang R. Study on the bench-scale aerobic composting reactor system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 9 罗玮,曾光明. 城市生活垃圾堆肥过程动力学模型研究[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(5): 104~107.
Luo W, Zeng G M. Study on the composting kinetic model of municipal solid waste [J]. *Journal of Hunan University*, 2005, 32(5): 104~107. (in Chinese)
- 10 Petric I, Selimbasic V. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 139(2): 304~317.
- 11 Yaldiz O, Kulcu R. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 93(1): 49~57.
- 12 Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of poultry manure—wood shavings mixture at different aeration rates [J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(2): 215~223.