

移动式秸秆制粒机作业速度调控系统研究

王伟 官元娟 白雪卫 谭睿 黄婉媛

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 为了提高移动式秸秆制粒机工作效率,解决玉米秸秆收获过程中作业速度与喂入量不匹配的问题,设计了一种移动式秸秆制粒机作业速度自动调控系统,以实现对秸秆制粒机作业速度的自动调控。该系统由喂入量-期望作业速度自适应变论域模糊控制器与液压马达转速调控系统构成,采用液压系统控制秸秆制粒机作业速度的方式进行调控。通过螺旋输送机功率得到实际喂入量,并根据灰色理论建立喂入量预测模型,以预测值作为变论域模糊控制器的输入;变论域控制器的输出作为液压马达转速调控系统的输入,作业速度 PID 控制器驱使液压控制系统调节制粒机行走机构改变作业速度,从而使作业速度和喂入量匹配,达到最佳喂入量,起到超前调节的目的。设计了3次试验,分别为模型参数的获取试验、均匀秸秆条件下的稳定性试验、非均匀秸秆条件下跟踪性能试验。试验结果表明,在均匀秸秆条件下,作业速度能够在3 m内达到最佳作业状态,超调量小于5%,之后能够保持良好的平稳运行状态,使制粒机以最佳喂入量工作;同样,在非均匀秸秆条件下,作业速度能够以不大于5%的超调量跟踪喂入量的变化。试验证明,本系统能够实时检测作业速度和喂入量,达到作业速度和喂入量相匹配的目的,有效提高了移动式秸秆制粒机的工作效率。

关键词: 秸秆制粒机; 作业速度; 喂入量; 模糊控制; 变论域

中图分类号: S225.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)10-0186-10 **OSID:** 

Investigation on Operating Speed Regulation System of Mobile Straw Granulator

WANG Wei GONG Yuanjuan BAI Xuewei TAN Rui HUANG Wanyuan
(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to improve the working efficiency of mobile straw granulator and solve the problem of mismatch between operating speed and feeding quantity in the process of corn straw harvesting, an automatic monitoring system for operating speed was designed to realize automatic monitoring and control of operating speed of the mobile straw granulator. The system was composed of a fuzzy controller with adaptive variable universe of feeding quantity and a hydraulic motor speed control system. The operating speed of the straw granulator was controlled by the hydraulic system. The actual feeding quantity was obtained by the power of the screw conveyor, and the prediction model of the feeding quantity was established according to the grey theory, with the prediction value as the input of the variable universe fuzzy controller. The output of the variable universe controller was the input of the hydraulic motor speed regulation system. The operating speed PID controller drove the hydraulic control system to adjust the running mechanism of the pellet machine to change the running speed, so as to match the running speed and the feed quantity to achieve the optimum feed quantity and achieve the purpose of advance adjustment. Three tests were designed, which were used to obtain the model parameters, the stability test under the condition of uniform straw, and the tracking performance test under the condition of non-uniform straw. The experimental results showed that under the condition of uniform straw, the operating speed can reach the best operating speed within 3 m and the overshoot less than 5%, and then kept a good stable running state, so that the granulator can work with the best feeding quantity. Under the condition of non-uniform straw, the operating speed can track the change of the feeding quantity with an

收稿日期: 2021-06-15 修回日期: 2021-08-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(51405311)、国家重点研发计划项目(2017YFD0300701-A02B)、辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10200019)、辽宁省教育厅重点项目(LSNZD201707)和辽宁省教育厅项目(LSNQN201904)
作者简介: 王伟(1984—),男,博士生,主要从事农业装备智能化研究,E-mail: wwchyloe@163.com
通信作者: 官元娟(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事秸秆利用技术与装备研究,E-mail: yuanjuangong@163.com

overshoot not more than 5%. The tests showed that the system can detect and match the operating speed and feeding quantity in real time, and can effectively improve the working efficiency of the mobile straw granulator.

Key words: straw granulator; operating speed; feeding quantity; fuzzy control; variable universe

0 引言

我国玉米种植面积大,玉米秸秆年产量可达 2.4 亿 t^[1]。移动式秸秆制粒机将田间秸秆捡拾、粉碎、压块成型,是生产生物质颗粒的重要设备。在田间作业时,玉米秸秆喂入量过低,会影响生产效率,喂入量过高,会影响移动式秸秆制粒机捡拾、粉碎和除尘等机械部件的性能,严重时会导致制粒机压块装置堵塞。因而,控制移动式秸秆制粒机以合理的作业速度前进,使喂入量达到最佳状态,可获得最高的生产效率。由于作业速度需要通过喂入量间接控制,所以作业速度的调控包括喂入量检测和作业速度调控。

随着农田作业机械设备向大型化、智能化方向发展^[2],实时对秸秆喂入量进行检测与控制尤为重要,国内外学者对喂入量的检测以及控制方面都有较为深入的研究。文献[3-8]建立了谷物喂入量与功率以及喂入量与滚筒转速的相关模型,以间接的方式获得了联合收获机的喂入量。为了提高喂入量检测精度,文献[9-10]引入了滤波函数对原始喂入量数据做平滑处理,并依托物联网技术对喂入量进行实时监测。在作业速度控制方面,目前国内外的研究集中在谷物联合收获机上,通过液压缸油压力、滚筒负荷、倾斜输送喂入辊负荷等调控作业速度^[11-14]。文献[15-18]建立了收获机速度控制系统的模型,并研制了控制装置,提高了收获效率。对于移动式秸秆制粒机的作业速度控制,虽然与谷物收获机的控制原理类似,但是移动式秸秆制粒机需要将收获的秸秆挤压成生物质颗粒,作业速度较慢,要求的超调量较小,所以本文探索对移动式秸秆制粒机作业速度进行研究,运用智能监测与控制技术来解决玉米秸秆收获过程中作业速度和喂入量不匹配的问题。

本文以辽宁宁越有限公司的移动式秸秆制粒机为试验样机,设计作业速度自动调控系统,主要包含喂入量-期望作业速度模糊控制器和液压马达转速调控系统。喂入量-期望作业速度模糊控制器将喂入量检测传感器、改进的灰色预测模型、变论域模糊 PID 控制结合起来,根据预测喂入量和最佳喂入量的误差,推测期望作业速度。作业速度控制系统包含 PID 控制器、速度传感器和液压控制系统。PID

控制器将接收的期望作业速度和速度传感器获得的实时速度相比较,调控作业速度,以达到提高速度控制系统动态性能、稳态精度与抗干扰能力的目的。

1 作业速度自动调控系统总体设计

系统体系结构如图 1 所示,作业速度自动调控系统由喂入量检测系统与作业速度控制器两部分构成。喂入量检测系统通过喂入量传感器检测喂入量。喂入量传感器由螺旋输送器的转速传感器和扭矩传感器构成。根据螺旋输送机转速与扭矩计算出功率,进而得到玉米秸秆的喂入量。作业速度控制器由 PLC 控制器、液压控制系统、车速传感器组成,PLC 控制器为控制的核心部分。系统利用灰色预测喂入量模型预测喂入量变化,然后输入到喂入量-期望作业速度自适应变论域模糊 PID 控制器,得到期望作业速度,将其输送至作业速度 PID 控制器,驱动液压控制系统带动相关执行机构调整车速,实现作业速度的控制。

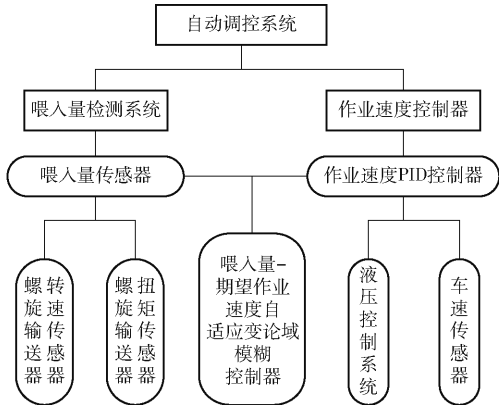


图 1 作业速度自动调控系统体系结构框图

Fig. 1 Architecture of automatic monitoring system for operating speed

系统原理图如图 2 所示,喂入量为主控变量,液压马达的转速为副控变量。基于喂入量采样数据序列来预测喂入量,计算预测喂入量和最佳喂入量的偏差,将偏差输入到喂入量-期望作业速度自适应变论域模糊 PID 控制器,进而得到期望作业速度。期望作业速度和通过速度传感器得到的实际速度的偏差作为作业速度 PID 控制器的输入。液压马达转速调控系统根据作业速度 PID 控制器调节液压马达转速使作业速度快速跟踪实时变化的喂入量,使秸秆制粒机工作在最佳状态。

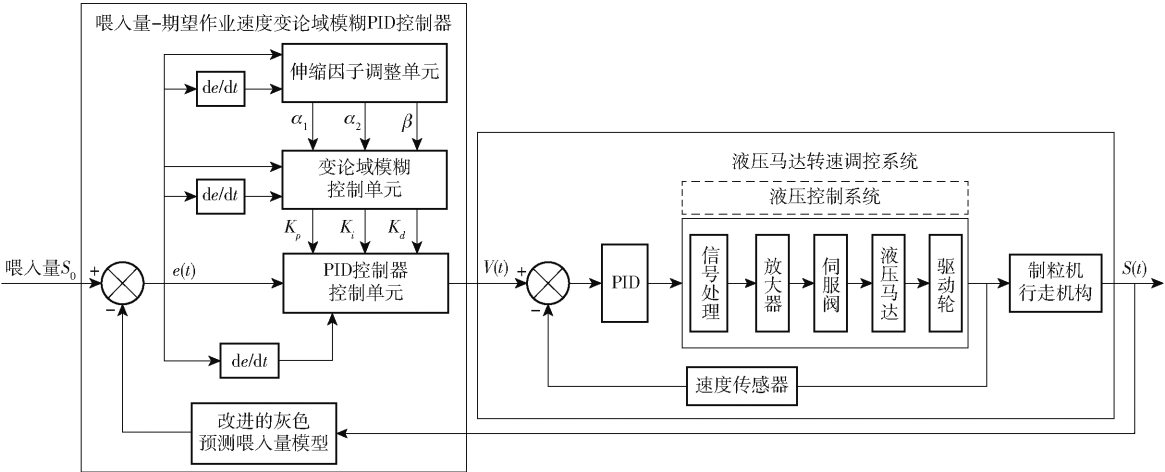


图2 作业速度自动调控系统原理图

Fig. 2 Schematic of automatic monitoring system for operating speed

2 自适应变论域模糊 PID 控制器设计

2.1 喂入量检测系统

移动式秸秆制粒机试验设备和进料装置如图3所示,移动式秸秆制粒机作业时由前端捡拾装置对玉米秸秆进行粉碎、捡拾,然后把秸秆送入螺旋输送机,通过螺旋输送机将秸秆喂入输送设备,最后秸秆进入制粒机料仓。在秸秆制粒机喂入量检测方法中,螺旋输送机依靠机械能驱动,不能采用电表测量仪器直接测量其功率,需要求取螺旋输送器的转速与扭矩来间接测量功率,具体方法为:首先,在螺旋输送机轴上粘贴应变片,通过搭建的电子电路采集应变片变化的电压信号,通过专业扭矩传感器标定电压信号对应的扭矩;其次,由扭矩与转速传感器得到的转速计算功率;最后,通过将间接计算得到的功率和实际喂入量进行线性模型拟合,即可通过功率得到喂入量。根据喂入量历史数据,形成喂入量序列。在喂入量序列的基础上,根据灰色喂入量预测模型预测喂入量。

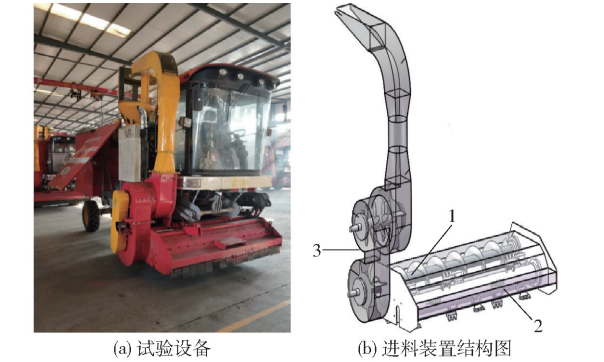


图3 移动式秸秆制粒机

Fig. 3 Mobile straw granulator

1.螺旋输送机 2.捡拾粉碎设备 3.输料设备

2.1.1 基于螺旋输送机功率的喂入量检测方法

螺旋输送机扭矩检测采用应变法。应变片如

图4所示,与x轴呈±45°的平面即为主平面,σ₁、σ₂分别为拉应力、压应力,数值相等,由胡克定律可知沿主应力方向的拉应变与压应变分别为

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \frac{\sigma_2}{E} = (1 + \mu) \frac{\sigma_1}{E} = \frac{16(1 + \mu)}{\pi E D^3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{-45^\circ} = \frac{\sigma_2}{E} - \mu \frac{\sigma_1}{E} = (1 + \mu) \frac{\sigma_2}{E} = -\frac{16(1 + \mu)}{\pi E D^3} \quad (2)$$

式中 E——应变片材料弹性模量
D——传动轴外径
μ——应变片材料泊松比

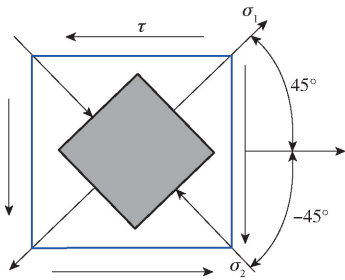


图4 扭矩原理示意图

Fig. 4 Schematic of torque principle

在扭矩作用下±45°方向应变大小相等,方向相反。令ε_{45°}=ε_{-45°}=ε(ε>0),G=E/[2(1+μ)],γ=2ε,可得扭矩

$$T = \frac{\pi D^3}{16} G \gamma \quad (3)$$

式中 G——剪切模量 γ——切应变

因而,在轴向±45°方向上分别粘贴应变片,检测出传动轴最大应变变化即可得到转轴扭矩T,T与ε呈线性关系。

扭矩传感器应变片粘贴方式如图5所示。扭矩传感器使用应变片组成惠更斯电桥,4个应变片(R1、R2、R3、R4)组成等臂全桥,粘贴在同一截面上,R1与R2以及R3与R4分别呈90°夹角。当传动轴受到扭矩产生应变时,应变片随着主动轴表面

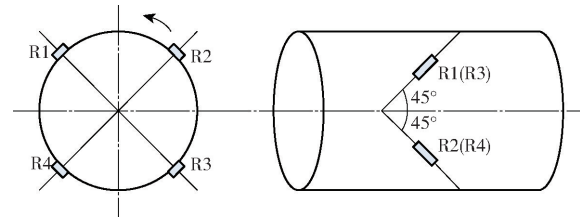


图 5 应变片粘贴方式示意图

Fig. 5 Schematic of strain gauge pasting method

应力变化,电阻产生变化,进而引起输出电压变化,

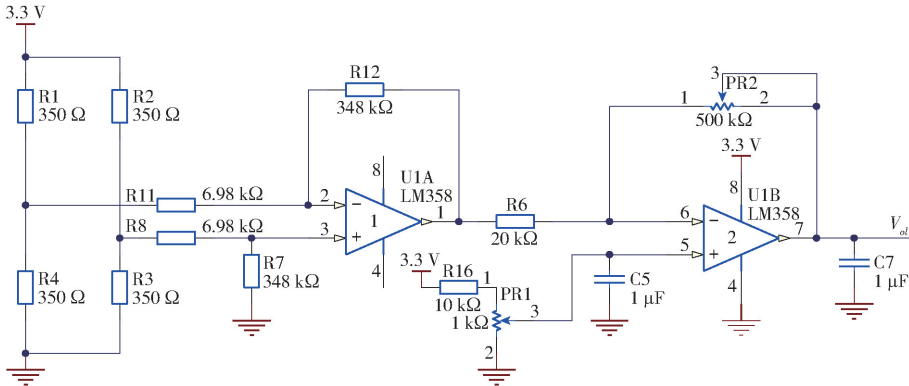


图 6 电压采集电路

Fig. 6 Voltage acquisition circuit

通过单片机 A/D 接口对电压变化进行采集,采集的应变片变化电压计算公式为

$$V_{ol} = \frac{3.3 R_{PR1}}{R_{16} + R_{PR1}} \left(1 + \frac{R_{PR2}}{R_6} \right) - \frac{R_{PR2}}{R_6} \left[\frac{3.3 R_3 R_7 (R_{11} + R_{12})}{R_{11} (R_2 + R_3) (R_7 + R_8)} - \frac{R_4 R_{12}}{R_{11} (R_1 + R_4)} \right] \quad (4)$$

其中, V_{ol} 为应变片变化电压信号; $R_1, R_2, R_3, R_4, R_6, R_7, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{16}$ 为固定电阻值, R_{PR1}, R_{PR2} 为可调电阻值。

转速传感器内置霍尔元件,在螺旋输送机主动轴所带轮盘的侧面粘贴磁钢,当磁钢接近霍尔元件时,霍尔元件产生霍尔效应形成脉冲信号,通过计算单位时间内记录的脉冲数计算螺旋输送机主动轴的转速 n 。通过检测螺旋输送机主动轴的扭矩 T 和转速 n 计算主动轴功率 P ,计算式为

$$P = nT/9\,550 \quad (5)$$

通过拟合的方式建立喂入量和螺旋输送机功率的关系模型,将功率转化为喂入量。

2.1.2 灰色预测喂入量模型

基于 GM(1,1) 的灰色预测模型^[19-20]对原始数据的随机性比较敏感,即喂入量传感器测量的原始数据的粗劣程度越大,灰色模型的预测精度越低。喂入量原始矩阵的构造对于灰色模型的建立起着至关重要的作用,由于原始数据的随机性,会导致矩阵中某行(或某列)的数据之间产生较大差距,最终造

通过对输出电压信号的标定与测量可得到螺旋输送机主动轴扭矩 T 。

应变片电压采集电路如图 6 所示,对电桥的变化采用二级运算放大器(U1A、U1B)进行放大,U1A 为差分运算放大器,能有效放大差模电压并抑制共模电压,U1B 和 PR2 对电压信号做进一步放大,使电压量程达到 0 ~ 3.3 V,满足单片机的采集需求。PR2 调节输出电压的基准。C5、C7 滤除高频干扰。

成喂入量数值随机性和波动性较大,不符合喂入量变化的实际情况。本文采用改进的 GM(1,1) 模型对原始数据序列进行数据预处理,以减少序列的随机性,增加序列的规律性。

改进的 GM(1,1) 模型建模过程如下:

(1) 对原始喂入量数据做平滑处理,设原始数据为

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(t_1), x^{(0)}(t_2), \dots, x^{(0)}(t_n)) \quad (6)$$

运用 $\ln(x^{(0)} + 1)$ 对数据进行平滑处理后序列为

$$y^{(0)} = (y^{(0)}(t_1), y^{(0)}(t_2), \dots, y^{(0)}(t_n)) \quad (7)$$

(2) 对测量的喂入量数据进行线性累加为

$$y^{(1)} = (y^{(1)}(t_1), y^{(1)}(t_2), \dots, y^{(1)}(t_n)) \quad (8)$$

式中 $y^{(1)}(t_k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(t_i); k=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 确定最佳训练喂入量数据维数,初选训练数据维数为 M ,不断降低维数,设当前预测维数为 $m = M - l (l=0, 1, 2, \dots, M)$,分别求取平均相对残差 $\bar{\delta}(m)$,最佳预测维数为 $m_0 = \min \bar{\delta}(m)$,用于训练的数据序列为

$$y^{(1)} = (y^{(1)}(t_1), y^{(1)}(t_2), \dots, y^{(1)}(t_{m_0})) \quad (9)$$

当有新的喂入量数据 $y^{(1)}(t_{m_0} + \Delta t)$ 产生时,剔除原始数据 $y^{(1)}(t_1)$,构成新的喂入量训练数据序列 $y_n^{(1)}$ 为

$$y_n^{(1)} = (y^{(1)}(t_2), y^{(1)}(t_3), \dots, y^{(1)}(t_m), y^{(1)}(t_{m_0} + \Delta t)) \quad (10)$$

(4)建立 GM(1,1)线性灰色微分方程,该方程的白化微分形式为

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + ay^{(1)} = u \tag{11}$$

其中, a 反映喂入量的变化速度,表示喂入量预测模型的发展系数; u 代表喂入量数据变化关系,表示喂入量预测模型的协调系数。

(5)利用最小二乘法求 a 与 u ,即

$$(a,u)^T = B^{-1}Z = (B^TB)^{-1}B^TZ \tag{12}$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -(y^{(1)}(2) + y^{(1)}(1))/2 & 1 \\ -(y^{(1)}(3) + y^{(1)}(2))/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(y^{(1)}(n) + y^{(1)}(n-1))/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} y^{(0)}(2) \\ y^{(0)}(3) \\ \vdots \\ y^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

(6)求解预测模型,将式(12)求取的 a 与 u 代入式(11),通过求解微分方程得到喂入量 GM(1,1)预测模型的解为

$$y^{(2)}(t+1) = (y^{(0)}(1) - u/a)e^{-ak} + u/a \tag{13}$$

通过对该预测值累减还原得到喂入量 $y^{(0)}(t)$ 对 $t+1$ 时刻的预测值 $y^{(2)}(t+1)$,喂入量取 $e^{y^{(2)}(t+1)} - 1$ 。

2.2 控制器设计

由于秸秆收获时受光照、气温、湿度等环境参数的影响,常规 PID 控制器及固定论域的模糊 PID 控制器^[21]不能满足作业速度控制精度的需求,而自适应变论域模糊 PID 控制器能根据喂入量的变化对模糊控制单元的输入输出论域范围作出及时的调整,同时对其量化因子与比例因子作出调整,克服了模糊 PID 控制自适应能力有限的缺点,改善模糊 PID 控制器参数的调整精度与范围,提高控制系统的快速响应性能。变论域 PID 为主调节回路,由伸缩因子调整单元、变论域模糊控制单元与 PID 控制单元组成。伸缩因子调整单元根据喂入量及喂入量变化率,不断调整伸缩因子 α_1 、 α_2 、 β ,通过变论域模糊控制单元在线调整 PID 控制器^[22]的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。

2.2.1 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 调节器误差的比例、积分与微分通过线性组合构成控制量对作业速度进行调节,离散公式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{t-1} e(t) + \frac{T_d}{T} (e(t) - e(t-1)) \right] \tag{14}$$

式中, K_p 为控制器比例系数,其作用为加快控制系统的响应速度,提高作业速度的调节精度, T_i 、 T_d 分别为积分时间常数与微分时间常数。

增量 PID 的控制算法为

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u(t) - u(t-1) = \\ &K_p \left[e(t) - e(t-1) + \frac{T}{T_i} e(t) + \right. \\ &\left. \frac{T_d}{T} (e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) \right] = \\ &K_p \Delta e(t) + K_p \frac{T}{T_i} e(t) + K_p \frac{T_d}{T} (\Delta e(t) - \Delta e(t-1)) = \\ &K_p \Delta e(t) + K_i e(t) + K_d (\Delta e(t) - \Delta e(t-1)) \end{aligned} \tag{15}$$

式中, K_i 为控制器的积分系数,可消除控制系统的稳态误差; K_d 为控制器的微分系数,作用在于改善控制系统的动态性能,减少超调量。使用作业速度误差 e 与作业速度误差变化率 $\dot{e}$ 作为模糊控制单元的二维输入,采用变论域模糊推理对 PID 控制器的参数进行在线调整。模糊控制单元的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 与 PID 控制器参数的初始值相加得到实际值,即

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \tag{16}$$

变论域模糊 PID 输入变量 e 、 $\dot{e}$ 和输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集取为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 e 和 $\dot{e}$ 的基本论域为 $[-9, 9]$ 、 $[-2, 2]$, ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的基本论域为 $[-10, 10]$ 、 $[-0.5, 0.5]$ 、 $[-10, 10]$,输入与输出的模糊论域均取为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。 e 、 $\dot{e}$ 的量化因子分别为 $K_e = 6/9 = 0.67$ 、 $K_{\dot{e}} = 6/2 = 3$,输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 比例因子分别为 $K_{rp} = 10/6 = 1.67$, $K_{ri} = 0.5/6 = 0.083$, $K_{rd} = 10/6 = 1.67$ 。

隶属度函数是决定模糊控制器控制效果的重要因素,为了更好地抑制田间作业环境的影响,本文采用梯形函数作为模糊控制器的输入、输出隶属度函数

$$F_{trapmf} = \begin{cases} 1 & (c_0 \leq x \leq b_0) \\ \frac{a_0 - x}{a_0 - b_0} & (b_0 \leq x \leq a_0) \\ \frac{x - d_0}{c_0 - d_0} & (d_0 \leq x \leq c_0) \\ 0 & (x \geq a_0 \text{ 或 } x \leq d_0) \end{cases} \tag{17}$$

式中 F_{trapmf} ——隶属度函数

x ——模糊控制器论域
 $a_0、b_0、c_0、d_0$ ——梯形隶属度函数的参数
基于移动式秸秆制粒机的机器操作人员经验和

秸秆制粒机设计专家的技术知识,构建二维输入($e、\dot{e}$)与三维输出($\Delta K_p、\Delta K_i、\Delta K_d$)的模糊控制单元,该模糊控制单元的模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊 PID 控制器的 $K_p/K_i/K_d$ 调整规则
Tab.1 Adjusting rules of $K_p/K_i/K_d$ for fuzzy PID controller

e	$\dot{e}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO	PS/NS/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PB
NM	PM/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PM/NS/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NS	ZOZO/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PM
ZO	PM/NS/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO	NS/PS/PS	NS/PS/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PM
PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PS/NS	NM/PM/ZO	NM/PM/PS	NM/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/PM

2.2.2 变论域伸缩因子调制单元

论域范围和模糊量等级划分个数对模糊控制器的控制精度有较大影响。模糊量等级个数越多,论域范围越小,等级划分越细,控制器控制精度越高^[23-24]。因此,本文引进自适应调整论域的思想:控制器根据误差及误差变化率,实时调整论域,在不增加模糊规则数量的情况下,使同一等级模糊变量对应的真实量的范围能根据实际情况自动扩大或者缩小,提高了模糊控制系统的精度,从而一定程度上解决了控制复杂度和控制精度的矛盾。

模糊控制单元输入论域的伸缩因子为 $\alpha=[\alpha_1,\alpha_2]$,输出论域的伸缩因子为 β ,模糊控制系统输出的基本论域为 $[-u_1,u_1]$,则变换后的论域为

$$\begin{cases} E(e_1)=[-\alpha_1(e_1)\times 9,\alpha_1(e_1)\times 9] \\ E(e_2)=[-\alpha_2(e_1)\times 2,\alpha_2(e_1)\times 2] \\ U(e_1,e_2)=[-\beta(e_1,e_2)u_1,\beta(e_1,e_2)u_2] \end{cases} \quad (18)$$

设 F_c 为模糊控制器的输出,则变论域控制器的输出为

$$F_v(e_1,e_2)=\beta(e_1,e_2)F_c(e_1/\alpha_1(e_1),e_2/\alpha_2(e_2)) \quad (19)$$

伸缩因子 $\alpha_1、\alpha_2$ 模糊子集取为 {VS, S, M, B, VB}, 分别代表较小、小、中、大、较大,对应伸缩因子 $\alpha_1、\alpha_2$ 的值为 {0.15, 0.30, 0.50, 0.75, 1.0}。伸缩因子 β 的模糊子集取为 {GS, VS, S, M, B, DB, VB, GB}, 分别代表极小、特小、小、中、大、大些、特大、极大。 β 的值为 {0.10, 0.25, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 1.0}。

模糊控制单元输入论域伸缩因子 $\alpha_1、\alpha_2$ 的调整规则如下:为了提高喂入量的快速响应和不扩大喂入量的超调, e 和 $\dot{e}$ 的论域范围应保持较大状态;当 e 和 $\dot{e}$ 变化较小时,喂入量的实际值接近控制系统的目标值,系统应提高 e 和 $\dot{e}$ 的分辨率,并缩小输入

论域的范围来提高控制器的灵敏度和精度, e 和 $\dot{e}$ 的变化较大时,应放大输入论域的范围来提高喂入量控制的精度。伸缩因子 β 的调整规则如下:当 e 和 $\dot{e}$ 的变化较大且符号相同时,表明喂入量的实际值与目标值相差较大,并且喂入量实际值偏离目标值较快,应提高输出喂入量的值使实际值跟踪目标值;当 e 和 $\dot{e}$ 的变化很大且符号相反时,表明喂入量的实际值与目标值相差较大,并且喂入量实际值正在快速接近目标值,系统应有较小的输出控制量。当误差 e 趋于 0 而误差变化率 $\dot{e}$ 很大时,表明系统实际值接近目标值,但实际值正在快速偏离实际值,通过 β 扩大论域近而输出较大的控制量。类似地可以推测 β 对调控过程的影响,推导出 e 和 $\dot{e}$ 在不同情况下伸缩因子 β 对应的语言值变量。根据以上规则可推导出 $\alpha_1(\alpha_2)$ 和 β 模糊控制规则如表 2 所示。

表 2 $\alpha_1(\alpha_2)$ 和 β 模糊控制规则
Tab.2 Fuzzy control rule for $\alpha_1(\alpha_2)$ and β

e	$\dot{e}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	VB/GB	VB/GB	B/GB	M/VB	B/M	VB/S	VB/GS
NM	VB/VB	B/GB	M/VB	S/VB	M/B	B/VS	VB/S
NS	B/GB	M/DB	S/DB	VS/DB	S/VS	M/VS	B/GS
ZO	M/VS	S/DB	VS/DB	VS/VB	VS/VS	S/VS	M/VS
PS	B/VS	M/S	S/VS	VS/GB	S/VB	M/DB	B/GB
PM	VB/VS	B/VS	M/M	S/VB	M/VB	B/DB	VB/DB
PB	VB/GS	VB/GS	B/B	M/VB	B/VB	VB/VB	VB/GB

3 液压马达转速调控系统设计

3.1 调控原理

液压马达转速调控系统由 PID 控制器、速度传感器、信号处理、放大器、伺服阀、液压马达、驱动轮和制粒机行走机构构成。PID 控制器根据自适应变

论域模糊 PID 控制器的输出速度与速度传感器测量的作业速度变化来调节液压马达的转速,液压马达通过驱动轮改变移动式秸秆制粒机的作业速度,从而和实时变化的喂入量匹配。液压马达转速调控系统主控制器选用西门子 PLC S7-300 系列,型号为 6ES7-313-5BE01-0AB0,具有 48KB RAM,内置 24 路 DI、16 路 DO、4 个 AI、2 个 AO、RS485 等信息传输通道,满足本调控系统的需要。

3.2 液压控制系统建模

伺服阀控液压控制系统原理图如图 7 所示,主要由伺服放大器、电液伺服阀、液压马达和转速传感器组成。转速传感器作为液压系统的反馈元件,将检测到的速度信号送入伺服放大器,伺服放大器根据指令信号与实际作业速度信号的差值来调节伺服阀驱动液压马达,液压马达通过驱动轮来调整移动式秸秆制粒机作业时的作业速度。

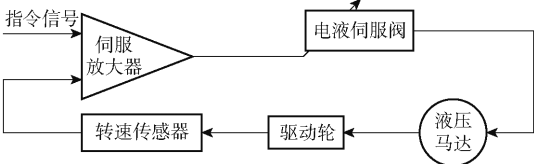


图 7 伺服阀控液压控制系统原理图

Fig. 7 Principle diagram of servo valve controlled hydraulic control system

移动式秸秆制粒机行走机构系统主要由伺服阀控制液压马达流量来实现转速的控制,需要对伺服阀和液压马达分别建模来得到输入电压与输出转速的关系模型。伺服阀建模是为了建立输入电压与输出流量的关系。伺服阀的传递函数需要根据动力元件液压的固有频率确定^[25],如果液压固有频率与伺服阀的频宽相近,伺服阀可近似看成二阶振荡环节,即

$$K_s G_s(s) = \frac{Q_0}{U} = \frac{K_s}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{2\xi_s}{\omega_s}s + 1} \tag{20}$$

式中 K_s ——伺服阀流量增益, $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$
 G_s ——伺服阀在 $K_s=1$ 时的传递函数
 ω_s ——伺服阀的固有频率, Hz
 ξ_s ——伺服阀阻尼比
 U ——伺服阀输入电压, V
 Q_0 ——伺服阀空载流量

液压马达转速 θ_m 对 Q_0 的传递函数为

$$\frac{\theta_m}{Q_0} = \frac{\frac{1}{D_m}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1 \right)} \tag{21}$$

式中 D_m ——液压马达排量, mL
 ω_h ——液压马达固有频率, Hz

将式(20)与式(21)相乘,得到液压马达转速 θ_m 与伺服阀输入电压 U 的传递函数为

$$\frac{\theta_m}{U} = \frac{\frac{K_s}{D_m}}{\left(\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{2\xi_s}{\omega_s}s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1 \right)} \tag{22}$$

4 试验

为了验证本文所提出的作业速度自动调控系统的有效性,于 2020 年 10 月 9 日在辽宁省锦州市黑山县辽宁宁越农机有限公司的农业试验基地和大田进行秸秆收获模拟试验,试验秸秆制粒机为霞光 560XC 型,试验设备和场地如图 8 所示。试验分为模型参数的获取和作业速度的自动调控两部分。



图 8 秸秆收获试验现场

Fig. 8 Field experiment of straw harvesting

4.1 模型参数获取试验

试验于 2020 年 10 月 9 日在辽宁省锦州市黑山县辽宁宁越农机有限公司的农业试验基地进行。由于喂入量检测需要建立扭矩传感器的功率和喂入量的关系,本部分将进行喂入量传感器标定试验,建立喂入量的输入电压和喂入量的关系模型。在试验田 1 中,铺设长为 10 m、宽为 2 m 的长方形粉碎秸秆,单位面积秸秆质量为 1 kg,密度一致,厚度均匀。捡拾装置与螺旋输送器离地 10 cm。实际收获秸秆的质量为

$$q = Sm = dvm_g \tag{23}$$

式中 q ——实际喂入量, kg/s
 S ——单位时间收获秸秆面积, m^2/s
 d ——收获时实际捡拾宽度, m
 v ——秸秆制粒机作业速度, m/s
 m_g ——单位面积秸秆质量, kg/m^2

扭矩传感器单片机内置 A/D 模块采集得到电压信号值,在软件上经过算术平均滤波算法后,经过标定计算后转化为扭矩。具体标定数据如表 3 所示,由标定的数据可以得到标定公式

$$y = 47.6x - 57.2 \tag{24}$$

通过标定后的扭矩传感器检测得到的扭矩如表 4 所示,喂入量传感器获取螺旋输送器转速和扭矩后,由式(5)计算得到螺旋输送器功率,如表 4 所

表 3 扭矩传感器标定试验数据

Tab.3 Calibration test data of torque sensor				
力矩/ (N·m)	电压实测 均值/V	电压理论 值/V	电压预测 误差/V	力矩计算值/ (N·m)
0	1.202	1.202	0	0
25	1.717	1.728	0.011	24.98
50	2.260	2.252	0.008	50.03
75	2.791	2.777	0.014	75.06
100	3.291	3.300	0.009	99.95

表 4 螺旋输送机功率和喂入量拟合的试验数据

Tab.4 Test data of power of screw conveyor and feeding quantity				
螺旋输送机转 速/(r·min ⁻¹)	扭矩/ (N·m)	车速/ (m·s ⁻¹)	螺旋输送机 功率/kW	喂入量/ (kg·s ⁻¹)
1 406	48.9	0.543 5	7.196	1.087
1 423	48.6	0.559 5	7.245	1.119
1 456	48.1	0.568 0	7.328	1.136
1 487	48.0	0.598 5	7.482	1.197
1 489	48.4	0.605 0	7.543	1.210
1 510	48.1	0.585 5	7.601	1.171
1 534	48.6	0.597 5	7.807	1.195
1 544	49.5	0.660 5	7.993	1.321
1 564	50.1	0.662 0	8.208	1.324
1 585	50.1	0.668 5	8.308	1.337
1 596	50.5	0.673 0	8.442	1.346
1 601	51.3	0.684 0	8.565	1.368
1 608	51.2	0.683 5	8.612	1.367
1 600	52.0	0.703 5	8.712	1.407
1 599	52.8	0.736 5	8.812	1.473
1 612	54.8	0.744 5	9.233	1.489
1 605	53.3	0.753 5	8.945	1.507
1 612	53.7	0.762 5	9.064	1.525
1 590	55.1	0.778 0	9.165	1.556
1 589	55.8	0.789 0	9.283	1.578

示。实际的喂入量通过式 (23) 得到, 如表 4 所示, 根据表 4 对在线监测螺旋输送机功率数据与喂入量数据进行线性拟合, 拟合结果如图 9 所示。

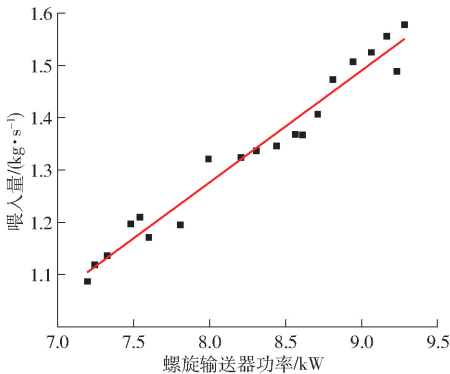


图 9 螺旋输送机功率和喂入量的拟合结果
Fig.9 Regression curve of power of screw conveyor and feeding quantity

获得的模型为

$$y = 0.213\,9x - 0.435 \quad (R^2 = 0.964) \quad (25)$$

4.2 秸秆均匀条件下控制器稳定性试验

为了验证自动调控系统在秸秆铺设均匀情况下的稳定性,于 2020 年 10 月 15 日在辽宁省锦州市黑山县进行了田间秸秆收获试验,秸秆铺设密度均匀,总长度为 60 m,宽度为 2 m,干湿度一致,宽度不变。根据秸秆制粒机的额定功率可得到最佳喂入量为 1.6 kg/s。试验过程中,由于秸秆密度均匀,铺设厚度一致,制粒机应当在获得期望作业速度后保持平稳运行。为了将喂入量和作业速度呈现在一幅图里,将喂入量数据缩小为原来的 1/3,将行驶速度数据放大 1.3 倍,得到的曲线如图 10 所示,作业速度能够在 3 m 内达到最佳作业状态,超调量不大于 5%。开始时为典型的 PID 过程,随着行驶距离的变化,作业速度和喂入量曲线有微小的波动,近似为平滑的直线,表示喂入量和作业速度均为平稳的变化,和预期效果一致。

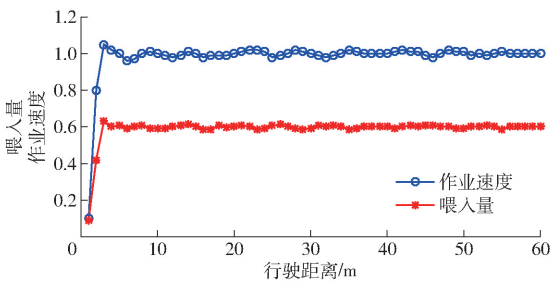


图 10 均匀条件下作业速度和喂入量跟随曲线
Fig.10 Curves of operating speed and feeding quantity under uniform condition

4.3 秸秆非均匀条件下控制器跟踪性能试验

为了验证自动调控系统在秸秆铺设不均匀情况下的跟踪性能,于 2020 年 10 月 16 日在辽宁省锦州市黑山县进行了田间秸秆收获试验。秸秆铺设总长度为 60 m,宽度为 2 m,每隔 20 m 改变一次铺设厚度和密度,测定自动调控系统随喂入量变化的性能。同样,为了将喂入量和作业速度呈现在一幅图中,将试验数据按比例缩放,如图 11 所示,随着行驶距离的变化,喂入量和作业速度随着铺设厚度和密度进

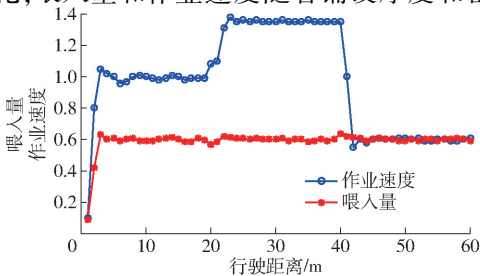


图 11 非均匀条件下作业速度和喂入量跟随曲线
Fig.11 Curves of operating speed and feeding quantity under non-uniform condition

行自适应的调整,以使得喂入量保持在最佳喂入量状态。3次明显的调控分别在0、20、40 m处,作业速度的超调量分别为5%、4%、5%。最大超调量为5%,相应的,喂入量在这几个位置点也有明显的波动,然后趋于稳定,调控的距离均不超过3 m,因为在秸秆密度和厚度发生变化时,系统通过调节作业速度控制喂入量,使喂入量稳定。试验结果和预期一致,说明本文提出的作业速度自动调控系统可以跟踪喂入量的变化,自动调节作业速度,使其和喂入量匹配。

5 结论

(1)为了解决喂入量变化非线性、大滞后与大惯性的复杂特点,设计了喂入量-期望作业速度模糊

变论域控制器。控制器采用螺旋输送机功率计算喂入量并利用灰色喂入量预测模型得到喂入量误差,然后利用自适应变论域模糊PID控制器将喂入量误差转化为期望作业速度。

(2)为了能够精确地调控作业速度,设计了以PLC控制器为核心的液压马达转速调控系统。系统通过速度传感器得到实际作业速度,然后根据实际作业速度和期望作业速度的误差进行PID调控,并输送给速度执行机构。

(3)对调控系统进行的田间试验表明,超调量不大于5%,调控距离小于3 m,能有效抑制田间收获时环境不利因素的影响,满足田间秸秆制粒机的收获需求。

参 考 文 献

- [1] 王德福,王沫,李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):165-171. WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 165-171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020. (in Chinese)
- [2] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):1-18. LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [3] 陈进,李耀明,季彬彬. 联合收获机喂入量测量方法[J]. 农业机械学报,2006,37(12):76-78. CHEN Jin, LI Yaoming, JI Binbin. Study on measurement method of combine feed quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 76-78. (in Chinese)
- [4] 刘元元,刘卉,尹彦鑫,等. 基于功率监测的联合收割机喂入量预测方法[J]. 中国农业大学学报,2017,22(11):157-163. LIU Yuanyuan, LIU Hui, YIN Yanxin, et al. Feeding assessment method for combine harvester based on power measurement[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 157-163. (in Chinese)
- [5] 屈哲,张东兴,杨丽,等. 纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):58-65. QU Zhe, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Experiment on feed rate and cylinder speed of longitudinal axial flow threshing and separating device for maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 58-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.008. (in Chinese)
- [6] 唐忠,李耀明,徐立章,等. 切纵流联合收获机小麦喂入量预测的试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(5):26-31. TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experimental study on wheat feed rate of tangential-axial combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 26-31. (in Chinese)
- [7] 孙意凡,刘仁杰,欧颢,等. 基于功率测量的联合收获机喂入量检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):118-123. SUN Yifan, LIU Renjie, OU Hao, et al. Analysis and comparison of feed rate detection methods of combine harvester based on power detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 118-123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.012. (in Chinese)
- [8] SCHUELLER J K, MAILANDER M P, KRUTZ G W. Combine federate sensors[J]. Trans. of ASAE, 1985, 28(1): 2-5.
- [9] 张振乾,孙意凡,刘仁杰,等. 联合收获机喂入量监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):85-92. ZHANG Zhenqian, SUN Yifan, LIU Renjie, et al. Design and test of feed rate monitoring system for combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 85-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.009. (in Chinese)
- [10] 张振乾,彭程,孙意凡,等. 联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):73-78. ZHANG Zhenqian, PENG Cheng, SUN Yifan, et al. Signal analysis and processing of combine harvester feedrate monitoring system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 73-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.012. (in Chinese)
- [11] 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 Jiaxin, 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)
- [12] 尤惠媛, 卢文涛. 联合收获机喂入量模糊控制系统研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2015, 43(5): 229–234.
YOU Huiyuan, LU Wentao. Fuzzy control system for feed quantity of combine harvester[J]. Journal of Northwest A&F University, 2015, 43(5): 229–234. (in Chinese)
- [13] 邢高勇, 毛罕平, 王佳慧, 等. 小区谷物联合收获机作业速度智能调控算法设计与仿真[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 45–50.
XING Gaoyong, MAO Hanping, WANG Jiahui, et al. Design of intelligent control algorithm for working speed of plot grain combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 45–50. (in Chinese)
- [14] 郭辉, 高国民, 周伟, 等. 轮式自走方捆打捆机行走速度控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 107–114.
GUO Hui, GAO Guomin, ZHOU Wei, et al. Design and test of automatic control system for walking speed of wheeled self propelled square baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 107–114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.012. (in Chinese)
- [15] 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 87–91, 86.
CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 87–91, 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.014. (in Chinese)
- [16] 宁小波, 陈进, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度模糊控制系统多目标遗传优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 68–74.
NING Xiaobo, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Multi-objective genetic algorithm optimization of forward speed of fuzzy control system for combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 68–74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150511&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.011. (in Chinese)
- [17] 宁小波, 陈进, 李耀明, 等. 联合收获机脱粒系统动力学模型及调速控制仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 25–34.
NING Xiaobo, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Kinetic model of combine harvester threshing system and simulation and experiment of speed control[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 25–34. (in Chinese)
- [18] 苗中华, 李闯, 韩科立, 等. 基于模糊PID的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 9–14.
MIAO Zhonghua, LI Chuang, HAN Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 9–14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150402&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.002. (in Chinese)
- [19] 翁志坚, 邱晨杰, 邱福祥, 等. 基于马尔科夫优化的灰色GM(1,1)沉降预测模型及应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12065–12070.
WENG Zhijian, QIU Chenjie, QIU Fuxiang, et al. An optimized GM(1,1) grey prediction model based on Markov chain and its application[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12065–12070. (in Chinese)
- [20] 杨国华, 颜艳, 杨慧中. GM(1,1)灰色预测模型的改进与应用[J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(5): 575–582.
YANG Guohua, YAN Yan, YANG Huizhong. Application of improved GM(1,1) grey prediction model[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(5): 575–582. (in Chinese)
- [21] 张叶茂, 苏茜. 基于变论域自适应模糊PID的压铸机压射速度控制研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 68–72.
ZHANG Yemao, SU Qian. Research on die casting machine injection velocity control based on variable universe adaptive fuzzy PID[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(1): 68–72. (in Chinese)
- [22] 陈满, 鲁伟, 汪小昆, 等. 基于模糊PID的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71–76.
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.010. (in Chinese)
- [23] 龙祖强. 变论域模糊控制器的若干重要问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LONG Zuqiang. Research on some important issues of fuzzy controllers with variable universe of discourse[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [24] 李建勇. 模糊控制精度提高的策略研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
LI Jianyong. Study on the strategies to improve the accuracy of fuzzy control[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [25] 张童, 刘志刚, 杨龙, 等. 马铃薯联合收获机清洁装置液压系统设计与阀控液压马达数学建模[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 444–447.
ZHANG Tong, LIU Zhigang, YANG Long, et al. Design of hydraulic system for cleaning device of potato combine and mathematical modeling of valve controlled hydraulic motor[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(9): 444–447. (in Chinese)