

# 玉米低损籽粒直收机自动控制系统设计与试验

栗晓宇, 杜岳峰<sup>\*</sup>, 刘磊, 毛恩荣

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对玉米籽粒直收机收获过程中无法自主调整工作参数, 导致极端作业条件下收获后籽粒破碎率偏高的问题, 该研究以降低籽粒破碎率为目标, 设计了一种玉米籽粒直收低损收获自动控制系统。以 4LZ-8 型玉米籽粒直收机为研究对象, 建立了脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度控制模型, 并基于收获参数对籽粒破碎率的回归模型, 设计了低损收获自动控制策略。此外, 针对传统 PID 控制系统存在的响应时滞、超调量大、精度差的问题, 设计了基于改进粒子群算法的自动控制系统, 利用非线性惯性权重递减算法融合布谷鸟算法的随机游走策略, 不断更新粒子群的速度和位置, 并对改进粒子群算法进行了性能测试, 结果表明该算法有效改善了标准粒子群算法容易陷入局部最优值的问题。对低损收获自动控制系统进行的仿真对比试验和田间验证试验结果表明, 改进粒子群算法对脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度具有较好的控制精度、响应速度和稳定性, 超调量和超调时间较小, 当脱粒滚筒转速为 380 r/min、凹板间隙为 42 mm、行车速度为 2.5 km/h 时, 自动控制系统在 3 s 以内调整籽粒直收机作业参数, 将籽粒破碎率最终稳定在 3.80% 左右, 满足标准要求。研究成果可为其他作物生产机械的自动化发展提供参考。

**关键词:** 收获; 玉米; 自动控制; 籽粒破碎率; 粒子群算法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210210

中图分类号: S226.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-02-0034-09

栗晓宇, 杜岳峰, 刘磊, 等. 玉米低损籽粒直收机自动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 34-42.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210210 <http://www.tcsae.org>

LI Xiaoyu, DU Yuefeng, LIU Lei, et al. Design and experiment of the automatic control system for low damage corn grain direct harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 34-42. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210210 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

目前, 中国农业机械的自动化程度相比机械、航天、工业等领域还存在很大差距, “强化农业技术和装备支撑”列入国家“十四五”规划和二〇三五年远景目标<sup>[1]</sup>, 对农机装备全程机械化、自动化发展提出了更高的要求。在玉米收获机的实际生产过程当中, 收获环境十分复杂恶劣, 需要驾驶员一边观察收获情况一边手动调整收获机的作业参数, 驾驶员极易疲劳, 且存在调整频繁、准确度低的问题, 缺乏收获作业工作参数的自动控制系统, 限制了农机装备生产力。另外, 由于收获机的脱粒系统采用液压驱动方式, 液压系统的非线性特性会导致控制收获机的工作参数时出现响应迟钝、故障率高和控制复杂的问题, 对玉米收获的质量造成不利影响。

处于适收期的玉米果穗含水率较高, 收获过程中玉米籽粒不可避免地受到外界因素(脱粒元件和脱粒凹板)的冲击和摩擦作用, 籽粒表面容易发生破损, 甚至籽粒被完全破坏, 这都会导致玉米籽粒在运输和存贮环节发生大面积霉变、腐烂, 对农民造成巨大经济损失<sup>[2]</sup>。研究

表明, 脱粒滚筒转速是影响玉米收获时籽粒破碎率的最主要影响因素, 目前脱粒滚筒转速大多以恒定速度进行收获, 然而玉米收获环境复杂且恶劣, 加之玉米植株生长密度不均、种植农艺差异等因素, 收获时玉米果穗摄入量出现骤增, 从而造成脱粒装置内堵塞, 导致籽粒破碎率偏高。因此, 对收获作业参数进行适时调控是解决这一问题的理想方案。

国外发达国家的收获控制系统等相关研究开展较早, 并形成了十分成熟的技术体系。根据调研, 美国 CASE 公司的联合收获机配备了 AFS 智能化收获系统, 实时获取谷物含水率和产量等信息并加以反馈, 自动调节收获机各个参数按照预定程度进行; 德国 CLASS 公司通过图像处理技术对谷物含杂率和破碎率进行实时监测; CRAESSAERTS 等<sup>[3]</sup>设计了基于模糊 PID 控制的联合收获机清选装置的自动控制系统, 优化了小麦收获性能和鲁棒性; OMID 等<sup>[4]</sup>利用人类专家知识设置了适用于小麦联合收割机清选系统的模糊逻辑控制器, 有效降低了小麦收获损失。

张认成等<sup>[5]</sup>建立了联合收割机脱粒滚筒的仿真模型和模糊控制器, 监控脱粒滚筒转速的变化, 通过降低行走速度以减小喂入量, 达到消除堵塞和籽粒破碎的问题。李国栋等<sup>[6]</sup>设计了脱粒滚筒的 PID 恒速控制器, 将脱粒滚筒的转速始终维持在一个恒定值。宁小波等<sup>[7]</sup>分析了联合收获机工作参数对脱粒装置的影响, 提出了控制性能和收获性能的优化目标函数, 利用多目标遗传算法优化模

收稿日期: 2022-10-26 修订日期: 2023-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175258)

作者简介: 栗晓宇, 博士生, 研究方向为智能农机装备。

Email: b20193070595@cau.edu.cn

\*通信作者: 杜岳峰, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为农机装备数字化设计。Email: dyf@cau.edu.cn

糊 PID 控制系统参数, 实现了收获机作业速度自动控制。朱晓龙等<sup>[8]</sup>研究了基于 CAN 总线的玉米低损脱粒智能控制系统, 利用 PID 算法作为调控脱粒装置工作参数的技术手段, 提高了玉米籽粒直收机的工作性能。张亚伟<sup>[9]</sup>设计了联合收获机作业信息检测系统, 并提出基于模糊控制的自动控制策略。刘林鹤<sup>[10]</sup>设计了单纵轴流玉米脱粒试验台, 设计了基于 STM32 的试验台参数自动控制系统, 根据收获效果自动调节倾角、凹板间隙、转速等作业参数。上述研究为玉米收获机工作参数控制提供了参考, 但 PID 控制存在响应时滞、超调量大和精度低的问题。在极端工作条件下, 玉米籽粒直收机的参数控制因作业环境等因素的干扰存在非线性和控制时滞的特点, 并且收获时作业速度一般不能轻易调整, 因此通过调节行走速度来调整滚筒转速的控制策略难以真正实现降低籽粒破碎率的目的, 不适用现代化玉米籽粒直收机的要求。

近年来, 基于粒子群算法的 PID 控制器优化得到研究人员的广泛关注<sup>[11-12]</sup>, 粒子群算法具有结构简单、效率高的优点, 然而该算法在运算过程中容易出现陷入局部最优的问题, 因此衍生出一系列粒子群优化算法。其中, 布谷鸟算法是效仿布谷鸟的寄生育雏行为来求解最优化问题的算法, 采用局部随机游走和 Levy 飞行策略提高算法的搜索能力。TAIEB 等<sup>[13]</sup>研究了粒子群优化布谷搜索算法的自适应模糊预测控制技术, 实现最佳控制信号的优化。KUMAR 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于高级布谷搜索算法和自适应高斯量子行为粒子群算法的混合算法来解决一阶和二阶函数的初值和边值的边界问题。

本文结合玉米籽粒直收机研究现状和用户的使用需求, 提出低损收获自动控制方法和改进的粒子群控制算法, 以项目组研发的籽粒破碎率传感器采集的破碎率为调控依据, 通过 Simulink 仿真试验对比不同激励下算法的有效性和精确性, 并通过田间试验验证算法的可靠性。

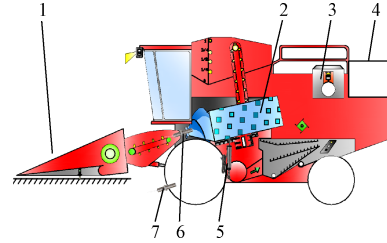
## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

以山东五征集团和中国农业大学联合研制的 4LZ-8 型玉米低损籽粒直收机为基础<sup>[15]</sup>, 设计玉米低损籽粒直收机自动控制系统, 由割台、脱粒装置、行走装置、籽粒破碎率检测传感器和自动控制系统构成, 如图 1 所示。其中, 自动控制系统由脱粒滚筒转速控制系统、凹板间隙控制系统和行车速度控制系统组成, 该系统结构如图 2 所示。

以脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度为辅助检测对象, 以籽粒破碎率检测传感器的测量值为反馈, 自动调节各作业参数。脱粒滚筒转速和行车速度通过齿轮转速传感器 (上海传振电子科技有限公司, CZ400, 0~15 kHz) 检测, 传感器分别安装在脱粒滚筒主轴从动齿轮一侧和轮轴从动齿轮一侧; 凹板间隙通过直线位移传感器 (深圳市米朗科技有限公司, KPM12R1-100 mm, 精度±0.05%) 检测, 安装在凹板间隙推杆上<sup>[16]</sup>; 籽粒破

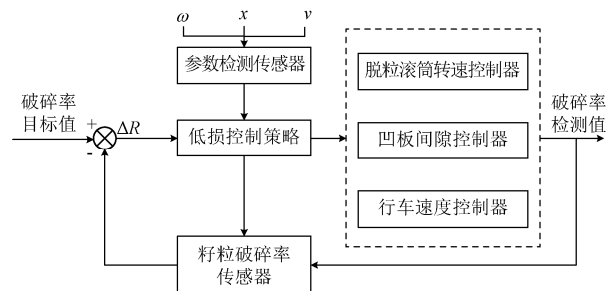
碎率检测传感器采用中国农业大学自研籽粒破碎率检测传感器进行实时检测, 传感器安装在收获机粮仓内, 脱粒后的玉米籽粒通过螺旋输送机运输至喂入口上方, 落入检测装置内, 然后经过工业相机实时采集籽粒单层图像, 该传感器田间试验检测精度为 93.4%<sup>[17]</sup>, 能够准确地检测玉米籽粒的破碎情况, 满足田间使用需求。



1.割台 2.脱粒滚筒 3.行走系统驱动 4.籽粒破碎率检测传感器 5.直线位移传感器 6.脱粒滚筒转速检测传感器 7.车速检测传感器  
1.Header 2.Threshing cylinder 3.Driving of walking system 4.Detecting sensor of broken kernel rate 5.Linear displacement sensor 6.Detecting sensor of threshing cylinder rotational speed 7.Detecting sensor of car speed

图 1 玉米低损籽粒直收机自动控制系统示意图

Fig.1 Diagram of automatic control system for the low-damage corn kernel direct harvester



注:  $\Delta R$  为破碎率目标值与籽粒破碎率检测传感器检测值的差值, %;  $\omega$  为脱粒滚筒转速,  $r \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $x$  为凹板间隙, mm;  $v$  为行车速度,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。  
Note:  $\Delta R$  is difference between target value of broken kernel rate and detecting value of broken kernel rate, %;  $\omega$  is threshing cylinder rotational speed,  $r \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $x$  is concave clearance, mm;  $v$  is car speed,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

图 2 低损收获自动控制系统示意图

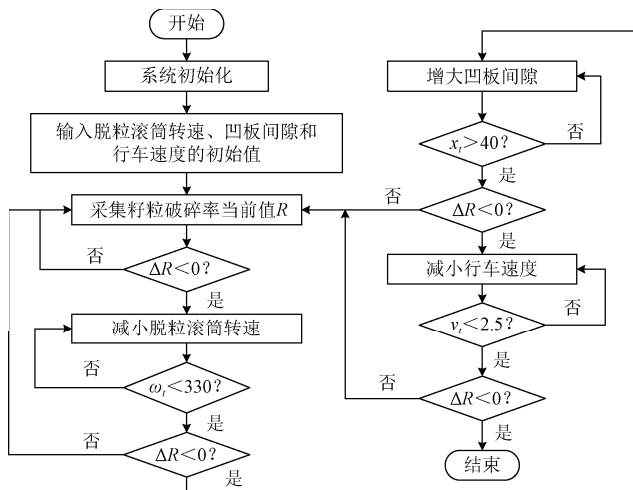
Fig.2 Diagram of low damage harvesting automatic control system

### 1.2 工作原理

根据前期试验, 籽粒破碎率水平的高低主要与脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度相关<sup>[15]</sup>, 产生影响的主要顺序为脱粒滚筒转速、凹板间隙、行车速度, 其中行车速度直接影响果穗喂入量, 喂入量较大时会导致脱粒滚筒堵塞, 造成籽粒破碎, 考虑到喂入量为间接因素, 无法直接对其进行控制, 因此本研究通过改变行车速度的方式达到改变喂入量的目的。玉米籽粒低损脱粒控制算法流程图如图 3 所示。

玉米籽粒直收机工作时, 脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度均具有初始值, 该值可根据实际情况进行设置, 此时籽粒破碎率传感器检测将实时籽粒破碎率  $R_0$  反馈至系统, 与破碎率目标值对比得到差值  $\Delta R$ , 并将其输入低损收获自动控制算法, 当差值  $\Delta R > 0$  时说明籽粒破碎率高于国家标准 (5%), 脱粒滚筒转速控制器、凹板间隙控制器和行车速度控制器分别调整脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度, 使各工作参数紧密协调配合, 满

足不同收获作业环境和玉米种植状态,提高收获质量和作业效率。



注:  $\omega_t$  为脱粒滚筒转速实时反馈值,  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $x_t$  为凹板间隙实时反馈值,  $\text{mm}$ ;  $v_t$  为车速实时反馈值,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ .  $\Delta R$  为实时籽粒破碎率的值与目标值的差值, %。  
Note:  $\omega_t$  is real-time feedback value of threshing cylinder rotational speed,  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_t$  is real-time feedback value of car speed,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ .  $\Delta R$  is difference between the real-time grain broken rate value and the target value, %.

图3 低损脱粒自动控制算法流程图

Fig.3 Flowchart of low damage threshing automatic control algorithm

低损脱粒自动控制算法具体步骤如下:

1) 根据前期试验结果,满足玉米收获需求的脱粒滚筒转速输出范围为[330, 380]、凹板间隙输出范围为[40, 50]、行车速度范围为[2.5, 3.5]<sup>[15-16]</sup>;

2) 如果差值  $\Delta R > 0$ ,说明当前籽粒破碎率满足标准要求,无需改变任何工作参数,继续进行收获,否则进入步骤3);

3) 如果差值  $\Delta R < 0$ ,说明当前籽粒破碎率不满足标准要求,按照各个因素的影响主次顺序,首先降低脱粒滚筒转速(减幅 10  $\text{r}/\text{min}$ ),然后返回步骤1)执行判断,如果调整后籽粒破碎率仍不满足条件,再执行凹板间隙增大命令(增幅 2  $\text{mm}$ ),再次返回步骤1)执行判断,如果仍不满足条件,最后执行行车速度减小命令(减幅 0.2  $\text{km}/\text{h}$ );

4) 进入下一次循环检测。

## 2 低损收获自动控制系统设计

### 2.1 脱粒滚筒控制系统设计

脱粒滚筒是实现玉米籽粒快速脱粒的核心部件。脱粒滚筒调速机构采用无极变速装置,速度调节范围为 150~1 200  $\text{r}/\text{min}$ ,如图4所示。脱粒滚筒调速机构主要包括发动机、减速换向器、主离合器、无极变速装置和调速电机等。其中调速电机与无极变速装置通过链传动链接;无极变速装置的主动变速轮和被动变速轮通过皮带链接,主动变速轮与传动箱连接,传动箱与发动机连接,由发动机为脱粒滚筒提供动力;被动变速轮与脱粒滚筒的主轴连接,通过改变调速电机的正反转调节无极变速装置的传动比,从而实现脱粒滚筒转速的改变<sup>[8]</sup>。

发动机到无极变速装置之间为比例环节,脱粒滚筒

加减速为惯性环节,当调速电机接收到系统传递的控制信号时,控制变速轮传动比的变化方向实现加减速,同时控制时间决定传动比的变化量,发动机转速对调速电机输出轴转速的传递函数如式(1)所示<sup>[18-20]</sup>。

$$G_1(s) = \frac{N_e K_1}{T_1 s (1 + T_2 s)} \quad (1)$$

式中  $N_e$  为发动机转速,  $\text{r}/\text{min}$ ,收获状态下取 2 000  $\text{r}/\text{min}$ ;  $K_1$  为减速换向器的传递系数,  $\text{A}/\text{V}$ ,取 0.11  $\text{A}/\text{V}$ ;  $T_1$  为电机的积分时间常数,  $\text{s}$ ,取 87  $\text{s}$ ;  $T_2$  为脱粒滚筒的惯性时间常数,  $\text{s}$ ,取 190  $\text{s}$ ;  $s$  为传递函数进行拉普拉斯变换后的复数合变量,无量纲;  $H$  为传递函数的负反馈环节。

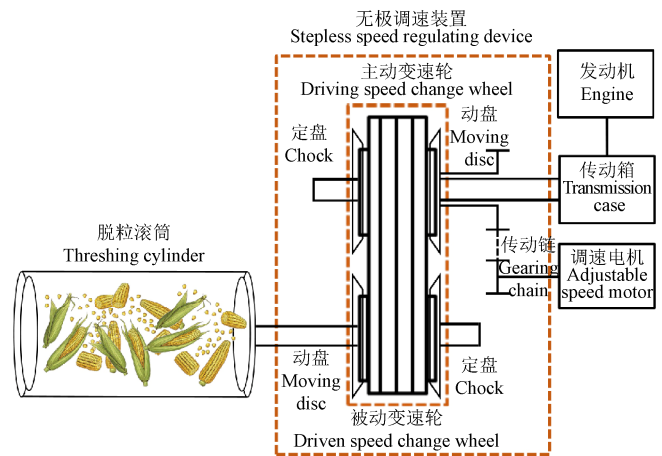


图4 脱粒滚筒调速机构示意图

Fig.4 Diagram of threshing cylinder rotational speed regulating mechanism

### 2.2 凹板间隙控制系统数学模型的建立

凹板间隙调节机构利用电动推杆实现凹板间隙的调节,电动推杆由开关量信号控制启停,由电磁阀控制推杆移动方向,电磁阀的通电时间决定推杆的移动距离,因此凹板间隙为电动推杆伸缩速度的积分。参考朱晓龙等<sup>[8]</sup>和张江伟<sup>[21]</sup>提出的直流电动推杆电机调速模型构建方法,凹板间隙对电动推杆的传递函数  $G_2(s)$  如式(2)所示。

$$G_2(s) = \frac{2.132}{0.277s} \quad (2)$$

### 2.3 行走控制系统数学模型的建立

玉米籽粒直收机的行走系统采用闭式静液压驱动,发动机与变量泵连接,通过液压马达驱动变速箱改变行走轮速度;变量泵提供压力和液压油,通过改变液压泵斜盘倾角以改变泵的排量,从而改变泵的输出流量和压力;液压马达实现机械能与液压能的转换,通过改变供油流向和流量,实现马达正反转<sup>[22]</sup>。液压马达输出轴转速对变量泵摆角的传递函数如式(3)所示,对外负载力矩的传递函数如式(4)所示<sup>[23]</sup>。

$$\frac{\theta(s)}{\gamma(s)} = \frac{K_q}{D_m} \frac{s^2}{\omega_n^2 + \frac{2\xi_n}{\omega_n} s + 1} \quad (3)$$

$$\frac{\theta(s)}{T_L(s)} = \frac{-\frac{C_l}{D_m^2} \left(1 + \frac{V_0}{\beta_e C_l} s\right)}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_n}{\omega_n} s + 1} \quad (4)$$

式中  $\theta$  为马达转角, rad;  $\gamma$  为变量泵摆角, rad;  $K_q$  为变量泵的流量增益,  $1.78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/(\text{rad} \cdot \text{s})$ ;  $D_m$  为马达排量, mL/r, 取  $1.27 \times 10^{-5} \text{ mL/r}$ ;  $\omega_n$  为液压固有频率, Hz;  $\xi_n$  为液压阻尼比, 无量纲;  $T_L$  为外负载力矩,  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ;  $C_l$  为液压马达总泄露系数,  $\text{m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$ , 取  $4.9 \times 10^{-12} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$ ;  $V_0$  为泵和马达的工作腔内的总容积,  $\text{m}^3$ , 取  $5.89 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ;  $\beta_e$  为油液有效体积的弹性模量,  $\text{N/m}^2$ , 取  $7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

行车速度控制系统中液压固有频率和阻尼比计算公式如式 (5) 所示<sup>[24]</sup>。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{\beta_e D_m^2}{V_0 J_m}} \approx 60 \\ \xi_n = \frac{C_l}{2D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_m}{V_0}} + \frac{B_m}{2D_m} \sqrt{\frac{V_0}{\beta_e J_m}} \approx 0.58 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $J_m$  为马达和负载的总转动惯量,  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$ , 取  $0.052 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$ ;  $B_m$  为马达和负载折算到马达轴上总的黏性阻尼系数,  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ , 取  $3.26 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。

#### 2.4 参数标定

自动控制系统需要对转速传感器和直线位移传感器开展标定试验<sup>[9]</sup>, 标定的目的是为了获得传感器测量值与系统中调速电机或马达换向电磁阀的反馈电压值之间的数学关系, 以实现籽粒破碎率的闭环控制, 标定试验结果如式 (6) 所示, 脱粒滚筒转速与调速电机输出电压、凹板间隙与电推杆输出电压、行车速度与行车变量泵之间存在良好的线性关系。

$$\begin{cases} u_1 = 0.01\omega \\ u_2 = 45x - 450 \\ u_3 = 48.6v + 75 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  分别为脱粒滚筒调速电机的电压反馈值, V。

### 3 低损收获自动控制算法的设计

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种基于随机和群体的智能优化方法, 用粒子群寻优来模拟鸟群觅食。传统 PSO 算法的缺点在于在全局寻优时, 容易陷入局部最小值, 在局部寻优时能够避开局部最小值, 但同时降低了搜索速度, 影响算法的计算精度。因此本研究结合布谷鸟算法的局部游走随机策略, 提出一种 PSO-CS Fuzzy PID 算法, 来改进 PSO 算法固有限制。影响 PSO 算法的主要因子包括惯性权重  $w$ 、个体认知因子  $c_1$  和群体认知因子  $c_2$ , 惯性权重越大越有利于全局优化, 反之越有利于局部优化<sup>[25]</sup>。

PSO-CS Fuzzy PID 控制算法包括 4 个模块: 1) 评价指标 ITAE 评价的目标函数的输出; 2) PSO-CS 主程序的输出部分, 用于将优化算法计算得到的结果赋值给相应

参数, 利用函数 Sim 编写目标函数程序, 完成仿真模型与粒子群优化算法的链接; 3) 模糊控制器, 包括制定好的模糊控制规则表; 4) PID 控制器, 通过模糊控制模块输出的模糊量, 经过解模糊后对  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的值进行修正, 将最优的参数组合传递给仿真模型。

#### 3.1 评价指标 ITAE 模块

在 PSO 算法的初始化参数中, 利用时间乘以误差绝对值积分作为适应度函数, 如式 (7) 所示。

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (7)$$

式中  $e$  为误差, 无量纲;  $t$  为时间, s。

设置 PSO-PID 的种群规模大小, 每一个个体分别可以表示三个参数, 确定其可行域, 并在可行域内通过 PSO-PID 算法对种群进行初始化, 得到 ITAE 适应度的值, 同时将得到的值返回, 作为算法的适应度函数, 迭代寻优, 从而找出全局最优值<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.2 PSO-CS 算法设计

##### 3.2.1 算法改进

PSO 算法中的两个核心参数为粒子的速度和位置信息, 分别用  $v_i$  和  $x_i$  表示, 计算边界范围为  $[-x_{max}, x_{max}]$  和  $[-v_{max}, v_{max}]$ 。每次迭代需要参考粒子全局最优位置  $p_g$  和粒子个体最优位置  $p_i$  两个极值, 每个粒子的位置和补偿信息的更新如式 (8) 所示, 其中粒子的个数和维度范围分别为  $i=[1, m]$ ,  $d=[1, D]$ 。

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd} - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $v_{id}^k$  为粒子  $i$  在进行  $k$  次迭代时的补偿信息在第  $d$  维的分量;  $p_{gd}$  为粒子全局最优位置  $P_g$  在第  $d$  维的分量;  $p_{id}$  为粒子个体历史最优位置  $P_i$  在第  $d$  维的分量;  $x_{id}^k$  为粒子  $i$  的当前位置;  $w$  为惯性权重;  $c_1$  为个体认知因子;  $c_2$  为群体认知因子;  $r_1$  和  $r_2$  为两个  $[0, 1]$  区间内的随机数。

为了提高粒子群算法的局部搜索能力, 采用非线性动态更新惯性权重的方法对粒子群算法进行改进。非线性递减惯性权重是对惯性权重进行非线性变换, 这种方法能够稳定惯性权重值的收敛速度, 使粒子以恒定的速度逼近全局最优值, 通过非线性变换, 粒子的全局搜索能力和局部搜索能力能够得到很好的平衡, 如式 (9) 所示。

$$w^d = w_{start} - \left[ \frac{2d}{K} - \left( \frac{d}{K} \right)^2 \right] \cdot (w_{start} - w_{end}) \quad (9)$$

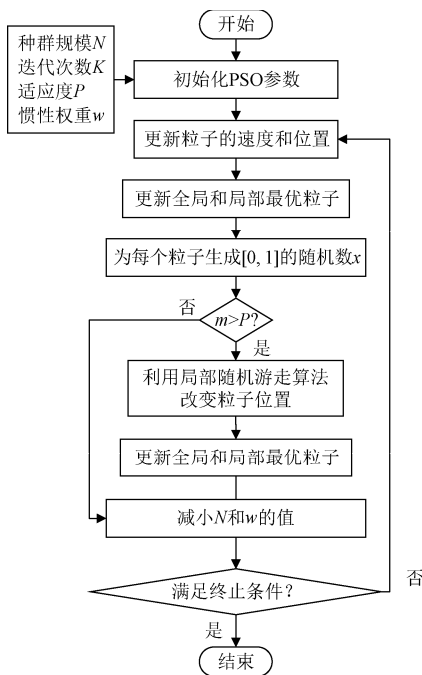
式中  $w^d$  为惯性权重的最大递减量;  $w_{start}$  为初始的最大惯性权重;  $d$  为递减循环当前次数;  $K$  为递减循环的总次数;  $w_{end}$  为惯性权重最终值。

布谷鸟算法的特点在于其搜索寻优方式为 Levy-flights 模式, 可以在未知的环境中最大限度的提高搜索效率, 且每一代都参考当前最优鸟巢, 使得它具有高效的寻优能力。Levy-flights 是一种由低频长距离和高频短距离组成的随机游走过程, 它的游走主要由游走的方向和步长控制<sup>[28-30]</sup>, 其方向通常为一个服从均匀分布的数, 步长则服从 Levy 分布, 其选择方法有很多, CS 算法中采用了 Mantegna 算法来选择, 改进的 PSO-CS 算法如图 5



所示, 具体步骤如下:

- 1) 初始化种群规模、迭代次数、惯性权重等参数, 设置粒子搜索范围和速度范围;
- 2) 输入粒子位置和速度, 计算适应度函数值;
- 3) 根据适应度函数值评估个体最优粒子  $p_{best}$  和全局最优粒子  $g_{best}$ ;
- 4) 利用非线性递减算法更新惯性权重, 布谷鸟算法的随机游动方式更新粒子的速度和位置, 计算新的适应度函数;
- 5) 更新个体最优粒子  $p_{best}$  和全局最优粒子  $g_{best}$  的值;
- 6) 达到最大迭代次数, 输出全局最优粒子  $g_{best}$ , 否则返回步骤 4)。



注:  $m$  为粒子位置的随机数。  
Note:  $m$  is the random number of the particle position.

图 5 PSO-CS 算法流程图

Fig.5 Flowchart of PSO-CS algorithm

### 3.2.2 算法性能测试

为了证明本研究提出的 PSO-CS 算法的优越性, 开展算法性能测试<sup>[11]</sup>, 与标准 PSO 算法进行对比, 测试函数为 Sphere 函数、Rastrigin 函数和 Rosenbrock 函数, 其理论适应度全局最小值均为 0, 其中 Rosenbrock 是一种很难极小化的病态函数。仿真时 3 种算法设置条件相同, 测试函数维度  $D=10$ , 群体数量  $N=30$ , 迭代次数  $K=100$ , 个体认知因子和群体认知因子相等, 即  $c_1=c_2=1.49618$ , 惯性因子最大值  $\omega_{max}=0.9$ , 最小值  $\omega_{min}=0.4$ , 粒子最大速度  $v_{max}=6$ 。3 种函数的测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 对于 Sphere 函数, PSO 和 PSO-CS 算法的适应度最优值均达到理想极小值 0, PSO-CS 算法的最差值为  $1.38 \times 10^{-7}$ , 远小于标准 PSO 算法的 1.62; 对于 Rastrigin 算法, 标准 PSO 算法的最优值为 0.126, 最差值为 8.67, 说明算法中出现了粒子陷入局部最优解的现象, PSO-CS 算法则达到理想值, 最差值仅 0.18, 说明 PSO-CS 算法有效解决了这一问题; 对于病态函数 Rosenbrock,

标准 PSO 算法的最优值能够达到 0.008, PSO-CS 算法的最优值为  $1.43 \times 10^{-4}$ , 已经十分接近理想极小值, 说明 PSO-CS 算法比标准 PSO 算法更能解决极端问题。性能测试结果表明 PSO-CS 算法的性能比 PSO 算法有很大的改进, PSO-CS 算法在迭代过程中粒子种群有向全局最优聚集的趋势, 当种群集中在邻域时会被驱散开, 而标准 PSO 算法后期种群多样性骤减, 极易陷入局部最优值, 参数寻优效果较差, PSO-CS 很好地解决了在迭代过程中存在的上述问题。

表 1 算法性能测试结果

Table 1 Algorithm performance test results

函数 Function	PSO 算法适应度 Fitness of PSO algorithm			PSO-CS 算法适应度 Fitness of PSO-CS algorithm		
	平均值 Average	最优值 Best value	最差值 Worst value	平均值 Average	最优值 Best value	最差值 Worst value
Sphere	0.85	0	1.62	0	0	$1.38 \times 10^{-7}$
Rastrigin	4.75	0.126	8.67	0.04	0	0.18
Rosenbrock	2.67	0.008	5.14	0.32	$1.43 \times 10^{-4}$	0.79

### 3.3 PSO-CS-Fuzzy PID 算法

在常规 PID 算法中, 最优参数整定是一项具有挑战性的任务, 由于比例调节系数  $k_p$ 、积分调节系数  $k_i$  和微分调节系数  $k_d$  的值在常规 PID 中是定值, 系统调节时间长, 超调量大, 扰动处理能力有限, 无法精确控制收获参数如脱粒滚筒转速、凹板间隙和行进速度。如果参数波动过大, 会导致籽粒破碎率过高, 直接影响玉米籽粒的收获质量。模糊控制器是通过制定模糊规则对 PID 的  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  进行实时优化, 与传统 PID 算法相比, 可用于在控制系统在线模式下调整 PID 的参数<sup>[31-32]</sup>。

基于 Matlab Simulink 搭建 PSO-CS-Fuzzy PID 控制模型, 如图 6 所示。以脱粒滚筒转速控制模型为例, 其中 fun\_abcd 为关于脱粒滚筒转速的 PSO-CS 算法 s\_function 函数; 参数标定模型基于式 (7) 搭建, 其作用是将上述脱粒滚筒转速的值转换为对应电压值  $u_1$ ; 脱粒滚筒转速控制模型基于文献[16]进行搭建, 用于模拟玉米籽粒直收机的作业效果, 籽粒破碎率  $R$  与各因素间关系如式 (10) 所示。

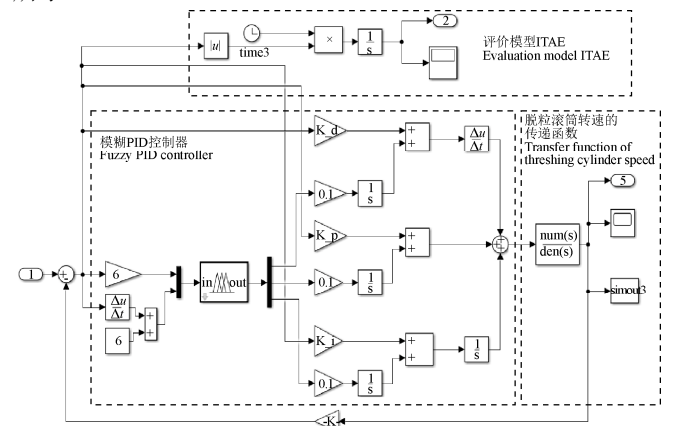


图 6 脱粒滚筒控制模型

Fig.6 Threshing cylinder controlling model

$$R=1.92+1.44\omega-0.54x+0.34v+1.01\omega^2+0.59v^2 \quad (10)$$

该系统以阶跃信号输入模拟籽粒破碎率目标值, 初始值分别为  $\omega=365$  r/min、 $x=48$  mm 和  $v=2.7$  km/h。PID 控制器的初始比例调节因子  $k_p=2.36$ , 积分调节因子  $k_i=0.15$ , 微分调节因子  $k_d=0.11$ , 仿真总时长设置为 100 s。

### 3.4 仿真结果与分析

为验证 PSO-PID、Fuzzy PID 和 PSO-CS-Fuzzy PID 控制算法的性能, 利用 Matlab/Simulink 对上述三个控制器参数进行对比仿真试验。各个执行机构在 3 种控制器下的仿真曲线, 结果如图 7 所示。

由图 7a 可知, PSO-PID、Fuzzy PID 和 PSO-CS Fuzzy PID 对脱粒滚筒转速控制结果存在较大差异。在 0~20 s 仿真时间内, PSO-PID 算法的峰值为 417.92 r/min, 稳定值为 365 r/min, 超调量为 14.5%, 稳定时间为 8.71 s, 同理, Fuzzy PID 算法的超调量为 1.64%、稳定时间为 18.58 s, PSO-CS Fuzzy PID 算法的超调量为 0.54%、稳定时间为 13.62 s; 脱粒滚筒转速分别在 20、40 和 60 s 时依次减小 10 r/min 后达到目标值, 但 PSO-PID 算法仍然具有较大的超调量, 而 Fuzzy PID 算法表现出具有较快的响应速度和控制精度, 但相比于 PSO-CS Fuzzy PID 算法平顺性不足, 降低脱粒滚筒转速的过程中可能会出现明显的“卡顿”现象, 这是由于标准 PSO 算法导致籽粒出现局部最优的情况, 将非最优值输入到 PID 算法中, 从而造成较大的超调量, 而 Fuzzy PID 算法具有实时调节  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的功能, 但调节时间较长, 优化后 PSO-CS Fuzzy PID 算法的超调量远小于 Fuzzy PID 算法和 PSO-PID 算法, 对控制脱粒滚筒转速的调速电机具有较快的响应速度和更高的控制精度, 在实际收获过程中能够迅速达到

目标转速, 有利于实现籽粒破碎率的快速控制。由图 7b 可知, 当脱粒滚筒转速达到最小限位不能继续减小时, 系统判断凹板间隙在初始值为 48 mm 的条件下籽粒破碎率不满足要求, 因此执行凹板间隙增大的命令, 由初始值 48 mm 增大至 50 mm, 0~10 s 内 PSO-PID 算法的稳定时间为 4.59 s、Fuzzy PID 算法和 PSO-PID 算法的超调量分别为 1.46% 和 1.04%; 80~90 s 内 PSO-CS Fuzzy PID 算法在 0.5 s 内能够将凹板间隙调整为 50 mm, 具有较好的控制效果。由图 7c 所示对行车速度泵控马达的控制结果可知, 当 80 s 之后籽粒破碎率检测到满足标准要求的 5% 时, 不再调整行车速度, 此时 PSO-PID 算法控制曲线存在“振荡”现象, 模糊控制器的引入改善了这一问题, 但系统稳定时间较大, PSO-CS Fuzzy PID 算法加快了最优结果搜寻速度, 2 s 左右达到目标车速 2.7 km/h 后始终保持稳定, 其控制效果优于 Fuzzy PID 和 PSO-PID 算法。综合图 7d 籽粒破碎率的仿真结果来看, PSO-CS Fuzzy PID 算法对目标值的跟踪效果最为理想, 设计的自动控制策略能够迅速将籽粒破碎率控制在标准范围内。

总的来说, PSO-PID 算法的控制效果明显具有超调量大、反应迟缓的不足, 这是由于 PSO 自身具有容易陷入局部最优解的缺点所导致的, Fuzzy PID 控制有效缓解了超调程度, 同时加快了系统的稳定速度。PSO-CS-Fuzzy PID 以 Fuzzy PID 控制器为优化基础, 结合了 Fuzzy PID 的优点, 在控制效果上得到进一步提升, 比前两种控制方法明显降低了超调量, 提高了稳定速度。改进粒子群算法在控制精度、响应速度和稳定性均具有良好的表现, 能够满足低损玉米收获的要求。

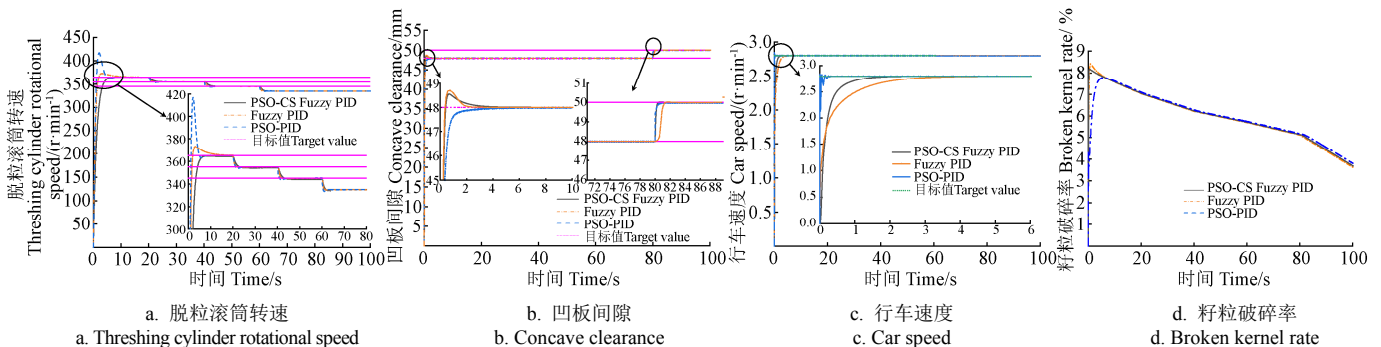


图 7 不同算法的低损脱粒自动控制系统仿真结果

Fig. 7 Simulation results of low-damage corn threshing automatic control system under different algorithms

## 4 田间验证试验

### 4.1 试验材料

试验用玉米品种为齐单 109 号, 广泛种植于黄淮海地区, 平均株高 280 cm, 穗位高约 105 cm, 果穗长约 17 cm, 百粒质量为 743 g, 该品种处于收获期时的含水量在 30%~33% 之间, 属于高含水率玉米收获作业。试验田要求玉米植株无倒伏, 行距、株距均匀。

### 4.2 试验方法

试验参照《GB/T 21961—2008 玉米收获机械实验方法》和《GB/T 21962—2020 玉米收获机械》进行, 标准要求收获后籽粒破碎率在 5% 以下。收获机试验区包括准

备区、测试区和停车区, 其中准备区和停车区的长度均为 10 m, 测试区长度为 20 m, 同工况下试验过程中不进行换挡和作业速度的变化, 试验现场如图 8 所示。试验后在粮箱内随机称取不少于 2 000 g 的玉米籽粒, 再从中重复 3 次且随机取 500 g 玉米籽粒计算破碎籽粒的质量  $m_p$ , 根据式 (11) 计算籽粒破碎率  $R_p$ 。

$$R_p = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{m_{pi}}{500}, i=1,2,3 \quad (11)$$

式中  $R_p$  为玉米收获机的籽粒破碎率, %;  $m_p$  为每次称取样本后得到的破碎的玉米籽粒的质量, g;  $i$  为随机抽取的次数。



图8 田间试验  
Fig. 8 Field test

### 4.3 田间验证试验

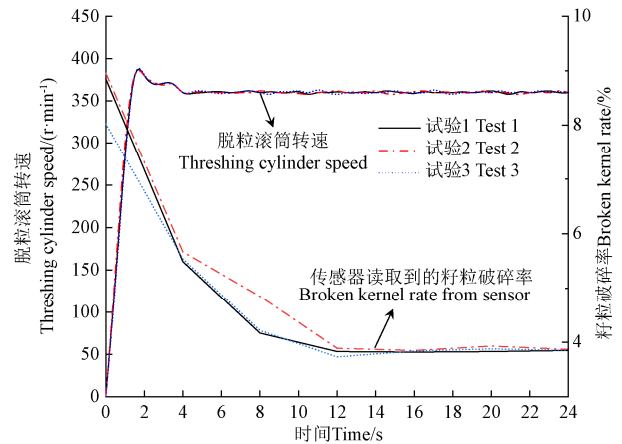
将基于改进粒子群算法的低损收获自动控制系统安装在4LZ-8型玉米籽粒直收机上,开展玉米籽粒直收机田间试验,试验时间为2021年9月,试验地点为山东省即墨市五征集团玉米试验田。参考文献[33]中通过对比分析开启/未开启自适应控制算法的水稻脱粒装置作业性能参数指标变化情况的方法。

为了验证自动控制系统的有效性,关闭/开启自动控制系统时的玉米籽粒直收机工作参数的初始值均设置为:脱粒滚筒转速380 r/min、凹板间隙42 mm和行车速度2.5 km/h,试验以籽粒破碎率为评价指标开展对照试验。关闭自动控制系统时,试验后人工统计籽粒破碎率 $R_p$ ,试验重复3次,取平均值;启动自动控制系统时,同时启动籽粒破碎率检测传感器,每间隔2 s读取一次籽粒破碎率的值,试验结果如图9所示。

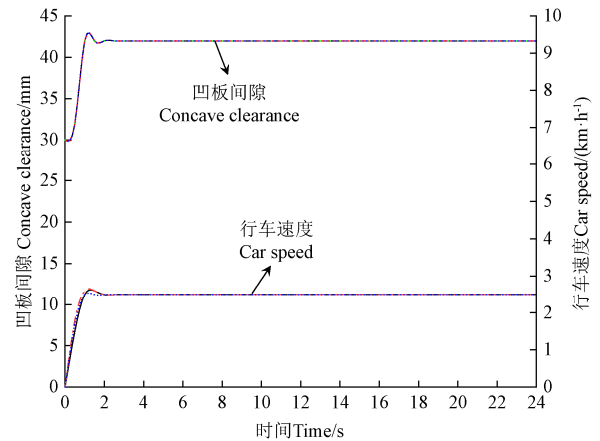
关闭自动控制系统时的3次试验籽粒破碎率结果经过人工统计为8.62%、8.27%和7.31%,平均值为8.07%,超过标准要求的5%,这是因为试验地粮食种植模式为小麦复种玉米,这种模式可以最大程度发挥农业机械的利用率,为了不耽误小麦种植,大多采取“抢农时”的方法直接收获适收期的玉米,此时籽粒含水率偏高,玉米籽粒直收机不合理的脱粒滚筒转速、凹板间隙和行车速度严重影响收获机的脱粒效果。试验中的脱粒滚筒为380 r/min,达到最大临界值,为极端作业条件,该条件下果穗受到脱粒滚筒较大的冲击作用,从而造成了较高的籽粒破碎率,因此有必要引入自动控制系统进行辅助收获,实现自主调整作业参数。

由图9可知,启动自动控制系统后,脱粒滚筒转速在2 s左右达到初始值380 r/min,同时凹板间隙和行车速度逐渐达到42 mm和2.5 km/h(其中,凹板间隙的复位值为30 mm)。滚筒转速有一定的超调,但超调量能够控制在5 r/min以内,且超调时间很小,籽粒破碎率传感器检测到当前籽粒破碎率超过5%,执行脱粒滚筒降低指令,脱粒滚筒转速降低至370 r/min,随后传感器检测到籽粒破碎率仍高于5%,再次降低滚筒转速至360 r/min,第三次检测值低于5%,达到标准要求,不再调整其他作业参数,3次重复试验的结果一致,收获机工作参数可以实现随着籽粒破碎率传感器采集的数据快速调整,最终籽粒破碎率稳定在3.80%左右,且波动较小,收获机整体运行稳定。对比关闭/开启低损收获自动控制系统时的作业性能,籽粒直收机通过自动控制系统调整作业参数后,

在3 s左右达到标准要求,籽粒破碎率比关闭自动控制系统时降低了4.27个百分点,说明该系统具有较好的降低籽粒破碎的能力,保证了籽粒直收机在极端收获条件下自主调整作业参数,从而将籽粒破碎率维持在标准要求。



a. 启动自动控制系统时脱粒滚筒转速和籽粒破碎率  
a. Threshing cylinder rotational speed and broken kernel rate when opening automatic control system



b. 启动自动控制系统时凹板间隙和行车速度  
b. Concave clearance and car speed when opening automatic control system

图9 玉米籽粒直收机田间试验结果

Fig. 9 Field test results of corn direct harvester

## 4 结论

针对玉米籽粒直收机低损收获的自动控制方案缺失的问题,以液压驱动的4LZ玉米联合收获机作为研究对象,采用非线性递减权重系数,融合布谷鸟算法的随机游走策略不断更新粒子群的位置和速度,有效避免了传统粒子群算法容易陷入局部最优的问题。得到以下结论:

1) 仿真结果表明,当籽粒直收机初始工作条件为脱粒滚筒转速365 r/min、凹板间隙48 mm和行车速度2.7 km/h时,PSO-CS Fuzzy PID算法比PSO-PID算法和Fuzzy PID算法表现出良好的性能,超调量为0.54%、稳定时间为13.62 s。

2) 玉米籽粒直收机田间试验结果表明,在极端作业条件下(脱粒滚筒转速达到最大临界值380 r/min),关闭自动控制系统时的籽粒破碎率为8.07%,开启自动控制系统时籽粒破碎率稳定在3.80%左右,满足玉米收获的标准要求,比关闭自动控制系统时降低了4.27个百分点,



控制系统对脱粒滚筒、凹板间隙和行车速度具有较好的控制精度和稳定性。

#### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和二零三五年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2022-01-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)
- [2] XIE R Z, MING B, GAO S, et al. Current state and suggestions for mechanical harvesting of corn in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(3): 892-897.
- [3] CRAESSARETS G, BAREDEMAEKER J D, MISSOTTEN B, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(2): 103-111.
- [4] OMID M, LASHGARI M, MOBLI H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. *Expert Systems with Applications*. 2010, 37(10): 7080-7085.
- [5] 张认成, 桑正中. 轴流脱粒滚筒模糊控制仿真[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(2): 45-48.  
ZHANG Rencheng, SANG Zhengzhong. Simulation research on the fuzzy logic control of an axial threshing cylinder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, 32(2): 45-48. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李国栋, 李勇智, 张际先, 等. 联合收割机脱粒滚筒的 PID 恒速控制[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(1): 48-50.  
LI Guodong, LI Zhiyong, 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 with English abstract)
- [7] 宁小波. 基于关联规则联合收获机全论域作业速度自适应控制系统[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
NING Xiaobo. Whole-range Self-adaptive Control System of Combine Harvester Operating Speed Based on Association Rules[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [8] 朱晓龙, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 高含水率玉米低损脱粒智能控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(S1): 9-18.  
ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of intelligent control system for low loss threshing of high moisture content corn[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(S1): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张亚伟. 联合收割机脱粒分离质量影响机理及控制策略研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.  
ZHANG Yawei. Mechanisms and Control Strategies Research on Threshing and Separating Quality of Combine Harvester[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘林鹤. 单纵轴流玉米脱粒试验台及其控制系统设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
LIU Linhe. Maize Test Bench and Its Control System for Single Longitudinal Axial Flow Threshing Cylinder[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨智, 陈志堂, 范正平, 等. 基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器整定[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(10): 1345-1352.  
YANG Zhi, CHEN Zhitang, FAN Zhengping, et al. Tuning of PID controller based on improved particle-swarm-optimization[J], 2010, 27(10): 1345-1352. (in Chinese with English abstract)
- [12] CHIOU J S, TSAI S H, LIU M T. A PSO-based adaptive fuzzy PID-controllers[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 26: 49-59.
- [13] TAIEB A, SALHI H, CHAARI A. Adaptive TS fuzzy MPC based on Particle Swarm Optimization-Cuckoo Search algorithm[J]. *ISA Transactions*, 2022, 131: 598-609.
- [14] KUMAR N, SHAIKH A A, MAHATO S K, et al. Applications of new hybrid algorithm based on advanced cuckoo search and adaptive Gaussian quantum behaved particle swarm optimization in solving ordinary differential equations[J]. *Expert System with Applications*, 2021, 172, 114646.
- [15] LI X Y, DU Y F, et al. Design, simulation, and test of a new threshing cylinder for high moisture content corn[J]. *Applied Science-BASEL*, 2020, 10(14), 4925.
- [16] 杜岳峰, 栗晓宇, 胡亮, 等. 一种具备智能控制系统的玉米脱粒清选试验台: 中国专利, 112825681A[P]. 2021-05-25.
- [17] LI X Y, DU Y F, WU J, et al Design and experiment of a broken corn kernel detection device based on the Yolov4-tiny algorithm[J]. *Agriculture*, 2021, 11(12), 1238.
- [18] 姚会敏. 一种联合收割机的无级调速系统改进[J]. *农机化研究*, 2021, 43(7): 47-50, 57.  
YAO Huimin. Improvement of stepless speed control system to a combine harvester[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(7), 47-50, 57. (in Chinese with English abstract)
- [19] 卢文涛, 张东兴, 邓志刚. 联合收获机脱粒滚筒的 PID 恒负荷控制[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5): 49-51, 55.  
LU Wentao, ZHANG Dongxing, DENG Zhigang. Constant load PID-control of threshing cylinder in combine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5): 49-51, 55. (in Chinese with English abstract)
- [20] FAN C L, ZHANG D X, YANG L, et al. Power consumption and performance of a maize thresher with automatic gap control based on feed rate monitoring[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 216, 147-164.
- [21] 张江伟. 直流电动推杆同步控制系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.  
ZHANG Jiangwei. Study on the Synchronous Control System of DC Electric Actuator[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邱铭军, 郭星良, 宁博, 等. 基于 MATLAB 的液压马达行走驱动控制原理仿真与应用[J]. *液压气动与密封*, 2017, 37(2): 12-15.  
QIU Mingjun, GUO Xingliang, NING Bo, et al. Simulation and application of hydraulic motor travelling control system based on MATLAB[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2017, 37(2): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王雪芝, 贺尚红. 泵控马达调速液压系统的建模与仿真[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 9(1): 73-77.  
WANG Xuezhi, HE Shanghong. Modeling and simulation of pump control motor speed control system[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, 9(1): 73-77. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邓晓杰. 高含水率玉米低损脱粒智能控制系统的研究[D].



- 北京: 中国农业大学, 2019.
- DENG Xiaojie. Research on Intelligent Control System for Low Loss and Threshing of High Moisture Content Corn[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [25] LIANG H T, KANG F H. Adaptive mutation particle swarm algorithm with dynamic nonlinear changed inertia weight[J]. Optik, 2016, 127(19): 8036-8042. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.002>
- [26] 谭顿, 陶建峰, 王旭永. 基于改进粒子群算法的双液压马达同步控制策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 254-261. TAN Dun, TAO Jianfeng, WANG Xuyong. Synchronous control strategy of dual hydraulic motors based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 254-261. (in Chinese with English abstract)
- [27] HAKLI H, UGUZ H. A novel particle swarm optimization algorithm with Levy flight[J]. Applied Soft Computing, 2014, 23: 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.06.034>
- [28] MAO X J, SONG S J, DING F. Optimal BP neural network algorithm for state of charge estimation of lithium-ion battery using PSO with Levy flight[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 104139. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104139>
- [29] YANG R, LIU Y B, YU Y, et al. Hybrid improved particle swarm optimization-cuckoo search optimized fuzzy PID controller for micro gas turbine[J]. Energy Reports, 2021, 7: 5446-5454. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.120>
- [30] FENG H, MA W, YIN C B, et al. Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller[J]. Automation in Construction, 2021, 127: 103722.
- [31] JIN X, CHEN K K, ZHAO Y, et al. Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller[J]. Measurement, 2020, 164: 108023.
- [32] SOMWANSHI D, BUNDELE M, KUMAR G, et al. Comparison of Fuzzy-PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW[J]. Procedia Computer Science, 2019, 152: 252-260.
- [33] SU Z, DING Z, TIAN L Q, et al. Design and performance test of variable diameter threshing drum of combine harvester[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(8): 4322-4334.

## Design and experiment of the automatic control system for low damage corn grain direct harvesters

LI Xiaoyu, DU Yuefeng<sup>\*</sup>, LIU Lei, MAO Enrong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A direct harvester is seriously limited for the high broken kernel rate with the high moisture during harvesting. The harvest quality can significantly dominate the yield and quality. Among them, corn threshing is one of the most essential links in the corn harvesting process. The corn ears can usually be harvested, when the moisture content of the kernel is in the range of 20%-40%. Then, the corn kernel is threshed after the moisture content reduced to about 15% after drying. However, the traditional treatment cannot meet the high requirements of modern corn production, due to the long working period, high labor intensity, and high operating costs. Furthermore, it is necessary to manually adjust the operating parameters of the harvesters when observing the harvest situation, particularly under the very complicated and harsh harvesting environment in the actual production. An automatic control system is still lacking on the harvesting operating parameters for the higher productivity of agricultural machinery and equipment. In addition, the blockage in the threshing device can result in the high broken kernel rate under the uneven growth density of corn plants and the different planting agronomy, as the feeding amount of corn ears increases sharply during harvesting. Therefore, it is a high demand to timely regulate the harvesting parameters for the better operational performance of agricultural machinery and equipment. The automatic control of corn grain harvester is of great significance for the smart agriculture and digital agriculture. Fortunately, the direct harvest mode of corn kernel can be used to improve the operation efficiency with the less harvest time. This study aims to design a set of automatic control solutions to the low damage corn kernel threshing. An automatic control system was proposed to reduce the high broken kernel rate and sluggish system response of corn kernel direct harvester for the high control precision using an improved particle swarm optimization-cuckoo algorithm. Firstly, the mathematical models were established for the threshing cylinder speed-regulating motor, concave clearance regulating electric push rod motor and driving speed regulating motor, as well as the harvesting model of corn ear. Then, the automatic control logic of low damage threshing was also established, according to the influence of corn kernel harvesting parameters on the broken kernel rate. The nonlinear decreasing algorithm was used to change the particle number and inertia weight. The random walk strategy of the Cuckoo algorithm was introduced into the particle swarm optimization. The speed and position of the particle swarm were constantly updated to effectively prevent the particle swarm optimization from falling into the optimal local solution. Simulink simulation was implemented to compare the control effects of Fuzzy PID, PSO-PID, and PSO-CS Fuzzy PID algorithms on the threshing cylinder rotational speed, concave clearance, car speed, and broken kernel rate. The results showed that the improved PSO algorithm performed the best in the control accuracy, response speed, and stability. The field test of the corn kernel direct harvester was carried out to verify the improved model. The broken kernel rate was counted with the automatic control system opening and closing. The automatic control system was effectively improved the operational performance of the harvester, while the kernel broken rate was stable at about 3.80%, indicating the higher stability and accuracy of automatic control system. The findings can also provide a strong reference for the automation development of crop production machinery.

**Keywords:** harvest; corn; automatic control; broken kernel rate; particle swarm optimization