

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.07.001

娄秀华, 李茂峰, 杜岳峰, 等. 玉米联合收获机清选控制系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 01-08

Lou Xiuhua, Li Maofeng, Du Yuefeng, et al. Design and experiment of cleaning control system for corn combined harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 01-08

玉米联合收获机清选控制系统设计与试验*

娄秀华, 李茂峰, 杜岳峰, 毛恩荣, 付磊

(中国农业大学工学院, 北京市, 100083)

摘要: 玉米联合收获机清选系统工况复杂, 存在收获质量差、效率不高等问题。基于此, 设计一套清选损失率控制为主同时兼顾含杂率的自动控制系统。首先分析以风机转速、振动筛转速和喂入量为影响因素, 损失率、含杂率为评价指标的正交试验数据, 获取影响损失率和含杂率的主次因素, 提出清选系统自动控制策略; 其次, 为开展控制策略和算法的研究, 建立清选系统中的风机转速、振动筛转速调节装置以及收获机纵向运动的数学模型, 设计离散化 PID 控制算法。最后, 基于 MATLAB/dSPACE 软硬件环境, 搭建清选控制系统的硬件在环仿真平台, 并进行控制器在环测试。试验证明: 本文设定的双目标联合控制策略和控制算法, 能够有效降低清选损失率、含杂率, 其中清选损失率降到 2.7% 左右, 含杂率为 2.8% 左右。

关键词: 玉米联合收获机; 清选系统; 智能控制; 损失率; 含杂率; 硬件在环

中图分类号: S225.5+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 07-0001-08

Design and experiment of cleaning control system for corn combined harvester

Lou Xiuhua, Li Maofeng, Du Yuefeng, Mao Enrong, Fu Lei

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

Abstract: The cleaning system of maize combined harvester is complicated and has the problems of poor harvest quality and low efficiency. Based on this, a set of automatic control system was designed, which mainly controlled the cleaning loss rate and simultaneously controlled the impurity content rate. Firstly, based on the orthogonal test data of fan speed, shaker speed and feeding amount as the influencing factors, loss rate and impurity content rate as the indicators, the primary and secondary factors affecting loss rate and impurity content rate were obtained, and the automatic control strategy of cleaning system was proposed. Secondly, in order to carry out the research of control strategy and algorithm, the mathematical models of the fan speed, the shaker speed regulating device and the longitudinal movement of the harvester in the cleaning system were established, and the discrete PID control algorithm was designed. Finally, based on the software and hardware environment of MATLAB/dSPACE, the hardware-in-the-loop simulation platform of the cleaning control system was built, and the controller in the loop test was carried out. The experimental results show that the dual-objective joint control strategy and control algorithm set in this paper can effectively reduce the cleaning loss rate and impurity content rate to the target range, in which the cleaning loss rate is about 2.7% and the impurity content rate is about 2.8%.

Keywords: corn combined harvester; cleaning system; intelligent control; loss rate; impurity rate; hardware in the loop

0 引言

清选装置是玉米联合收获机的重要工作部件, 其中清选损失率、含杂率是评价收获机清选装置工作性

能的重要指标^[1, 2]。受玉米联合收获机工作环境复杂、工况恶劣、作物生长状态多样等因素影响, 清选作业环节如何有效的降低损失率和含杂率一直没有得到很好地解决。因此, 如何通过有效控制, 提升玉米联合

收稿日期: 2022 年 8 月 28 日 修回日期: 2023 年 4 月 21 日

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52175258)

第一作者: 娄秀华, 女, 1970 年生, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授; 研究方向为农业装备数字化设计。E-mail: easyhh@cau.edu.cn

通讯作者: 杜岳峰, 男, 1984 年生, 山东泰安人, 博士, 副教授; 研究方向为农机装备数字化设计与自动控制技术。E-mail: dyf@cau.edu.cn

收获机清选系统的作业质量和作业效率,是当前及未来的研究热点^[3]。

关于玉米联合收获机的清选控制系统,国内外有大量学者展开研究^[4-6]。Hiregoudar 等^[7]通过田间试验及相关数据处理,将人工神经网络应用到损失率评估中,并建立了基于粮食损失率和含水率为参数的收获机速度控制模型;Omid 等^[8]根据检测的逐草器和上筛的损失量,建立了模糊控制器来实现收获机的自动化调控,使损失率降低;张华培^[9]将模糊控制与遗传算法相结合,建立了以喂入量和含水率为输入,滚筒转速和行驶速度为输出的模糊控制器,并利用遗传算法进行优化,得出最优的工作参数。

本文建立清选系统的数学模型,设计一套双目标联合控制策略,在保证玉米籽粒损失率低于阈值的基础上,同时兼顾籽粒含杂率的控制。通过硬件在环试验平台测试,验证模型的准确性和控制方法的有效性。

1 清选环节影响因素分析

1.1 正交试验设计

为了分析研究各工作参数对损失率和含杂率的交互作用和影响规律,建立损失率和含杂率与工作参数之间的数学模型,开展了玉米籽粒清选作业参数正交试验研究。根据前期理论分析和试验经验的结果,选取清选装置中风机转速范围为 800~1 000 r/min,振动筛转速为 220~280 r/min,喂入量选取范围为 7~9 kg/s。以风机转速、振动筛转速和喂入量为影响因素,损失率 y_1 和含杂率 y_2 为考察指标。2021 年 10 月在山东五征集团试验田,受限于场地的规模,仅开展风机转速为 800 r/min,振动筛转速为 220 r/min,喂入量为 8 kg/s 的试验组合,收获机每次试验前进 20 m 为一组,分别将粮仓收集到的和尾筛抛出的混合物进行人工选取和称量,计算得到籽粒含杂率和损失率,试验重复三次后取平均值;并通过借鉴部分前期研究数据^[10-14],展开三因素三水平正交试验分析。试验因素水平如表 1 所示,正交试验结果如表 2 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of test

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | 风机转速 ($r \cdot \min^{-1}$) | 振动筛转速 ($r \cdot \min^{-1}$) | 喂入量 ($kg \cdot s^{-1}$) |
| -1 | 800 | 220 | 7.0 |
| 0 | 900 | 250 | 8.0 |
| 1 | 1 000 | 280 | 9.0 |

表 2 正交试验方案及结果

Tab. 2 Scheme and results of orthogonal test

| 编号 | X_1 | X_2 | X_3 | 损失率/% | 含杂率/% |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 3.48 | 0.74 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 4.08 | 0.96 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 3.24 | 0.66 |
| 4 | -1 | 1 | 0 | 2.76 | 0.77 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 3.34 | 0.93 |
| 6 | -1 | -1 | 0 | 2.98 | 1.19 |
| 7 | 0 | -1 | -1 | 3.16 | 1.05 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 3.82 | 0.72 |
| 9 | 0 | -1 | 1 | 3.16 | 1.45 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 3.78 | 1.07 |
| 11 | -1 | 0 | 1 | 2.88 | 0.89 |
| 12 | 1 | 0 | -1 | 3.64 | 0.61 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 4.36 | 0.86 |
| 14 | 1 | -1 | 0 | 2.88 | 0.66 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 3.16 | 0.69 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 3.8 | 0.7 |
| 17 | 0 | 1 | 1 | 3.76 | 1.09 |

1.2 回归数学模型与分析

利用 Design Expert 软件对试验数据进行分析,得到三元二次回归拟合数学模型^[15],建立清选过程各因素与损失率、含杂率之间的数学关系模型。方差分析结果见表 3,模型如式(1)、式(2)所示。

表 3 方差分析结果

Tab. 3 Variance analysis results

| 来源 | 损失率 | | 含杂率 | |
|-----------|---------|---------|-------|----------|
| | F 值 | P 值 | F 值 | P 值 |
| 模型 | 6.20 | 0.012 6 | 55.65 | <0.000 1 |
| X_1 | 20.93 | 0.002 6 | 36.21 | 0.000 5 |
| X_2 | 14.31 | 0.006 9 | 23.85 | 0.001 8 |
| X_3 | 0.003 7 | 0.953 1 | 40.53 | 0.000 4 |
| $X_1 X_2$ | 13.44 | 0.008 0 | 58.47 | <0.000 1 |
| $X_1 X_3$ | 3.77 | 0.093 4 | 23.14 | 0.001 9 |
| $X_2 X_3$ | 0.001 9 | 0.966 8 | 21.96 | 0.002 2 |
| X_1^2 | 1.08 | 0.332 9 | 14.31 | 0.006 9 |
| X_2^2 | 1.48 | 0.263 0 | 150.9 | <0.000 1 |
| X_3^2 | 0.823 1 | 0.394 4 | 124.2 | <0.000 1 |
| 失拟项 | 0.000 7 | 1.000 0 | 2.84 | 0.170 0 |

注: $P < 0.05$ 为显著, $P > 0.1$ 为不显著。

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 32.82 - 0.029X_1 - 0.039X_2 - 3.63X_3 + \\
 & 1.4 \times 10^{-4} X_1 X_2 + 2.3 \times 10^{-3} X_1 X_3 + \\
 & 0.11X_3^2 - 1.7 \times 10^{-4} X_2 X_3 - 1.2 \times \\
 & 10^{-5} X_1^2 - 1.5 \times 10^{-4} X_2^2 \quad (1) \\
 y_2 = & 13.09 - 0.0028X_1 - 0.055X_2 - 1.23X_3 + \\
 & 1.8 \times 10^{-5} X_1 X_2 + 3.4 \times 10^{-4} X_1 X_3 +
 \end{aligned}$$

$$0.077X_3^2 - 0.0011X_2X_3 - 2.62 \times 10^{-6}X_1^2 + 0.95 \times 10^{-4}X_2^2 \quad (2)$$

由表 3 可知,清选损失率 y_1 和含杂率 y_2 的拟合回归数学模型的 P 值(显著性水平)都低于 0.02,结果说明两个回归模型的显著性均较高,失拟项的显著性水平 P 值都超过 0.1,说明拟合效果较好。根据方差 F 值的大小可以判断各因素对清选损失率和含杂率的影响程度,对于清选损失率,三个清选影响因素的影响程度从大到小依次为风机转速、振动筛转速和喂入量^[16]。同理,对于清选含杂率,三个清选影响因素的影响程度依次为喂入量、风机转速和振动筛转速。

2 清选系统建模

为了对清选控制系统的控制策略和算法展开研究,以及硬件在环试验的开展打下基础,需要建立清选系统的模型。

2.1 风机转速调节模型

风机转速调节系统是典型的阀控液压马达速度控制系统,主要是由电液比例阀、转速传感器、液压马达、传动装置和风机等组成。电液比例阀中的电磁铁将控制器输出的电信号转化为电磁信号,驱动比例阀中的阀芯产生位移,成比例的控制系统的流量与压力的输出^[17, 18]。风机转速调节过程为:控制器接收速度偏差信号,发送控制指令,经电液比例流量阀来改变液压马达的转速,从而驱动风机负载改变转速,如图 1 所示。为实现良好的控制效果,反映控制系统的性能,需要对电液比例阀、液压马达进行建模分析。

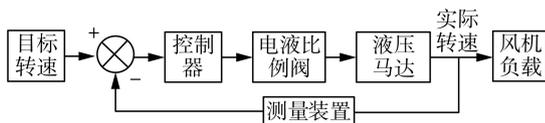


图 1 风机转速调节系统

Fig. 1 Fan speed regulation system

2.1.1 电液比例阀的数学模型

电液比例阀的流量增益

$$K_{sv} = \frac{Q_m}{I_m} \quad (3)$$

式中: K_{sv} ——比例阀的流量增益, m^3/A ;

Q_m ——比例阀的空载流量, m^3/s ;

I_m ——比例阀的额定电流, A 。

一般情况下,电液比例阀的动态响应速度大于动力元件的动态响应速度,可以优化系统的动态特性分析,阀的传递函数可以用二阶振荡环节表示,比例流量阀的传递函数为

$$\frac{Q_0}{\Delta I} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \quad (4)$$

式中: Q_0 ——比例阀的流量, m^3/s ;

ΔI ——比例阀的电流增量, A ;

ω_{sv} ——比例阀的固有频率, rad/s ;

ξ_{sv} ——比例阀的阻尼比。

2.1.2 液压马达的数学模型

输出轴上的总惯量

$$J_t = J_m + J_L \quad (5)$$

式中: J_m ——液压马达的转动惯量, $kg \cdot m^2$;

J_L ——负载的惯量, $kg \cdot m^2$;

J_t ——总惯量, $kg \cdot m^2$ 。

$$\begin{cases} Q_L = K_q X_v - K_{ce} P_L \\ Q_L = D_m s \theta_m + C_{tm} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \\ P_L D_m = J_t s^2 \theta_m + B_m s \theta_m + G \theta_m + T_L \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_m ——液压马达转角, rad ;

K_{ce} ——总流量—压力系数, $m^5/N \cdot s$;

D_m ——液压马达的排量, m^3/rad ;

G ——负载的扭转弹簧刚度, $N \cdot s/rad$;

B_m ——黏性阻尼系数, $(N \cdot m \cdot s)/rad$;

C_{tm} ——总泄露系数, $m^3/s \cdot Pa$;

T_L ——外负载力矩, $N \cdot m$;

P_L ——负载压力, Pa ;

V_t ——总的压缩体积, m^3 ;

Q_L ——负载流量, m^3/s ;

K_q ——流量系数, $m^3/(s \cdot A)$;

X_v ——滑阀阀芯位移, m 。

以阀控液压马达 3 个基本方程的拉式变换式(6)为基础,进行变换和简化处理得

$$\dot{\theta}_m = \frac{\frac{K_q X_v}{D_m}}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1} \quad (7)$$

阻尼比

$$\xi_h = \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_t}} \quad (8)$$

式中: β_e ——有效体积弹性模量, Pa 。

液压固有频率

$$\omega_h = 2D_m \sqrt{\frac{\beta_e}{V_t J_t}} \quad (9)$$

电液比例阀以空载流量 $Q_0 = K_q \cdot X_v$ 为输出参量,液压马达的负载传递函数为

$$\frac{\dot{\theta}_m}{Q_0} = \frac{1}{D_m} \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1} \quad (10)$$

2.2 振动筛转速调节模型

振动筛转速调节系统主要是由定量液压马达、变量泵和液压缸等组成。调节系统在工作时,通过控制变量泵斜盘角来改变变量泵的排量,来控制马达的转速,再通过连杆传动带动振动筛转动,是典型的泵控液压马达速度调节系统,如图 2 所示。

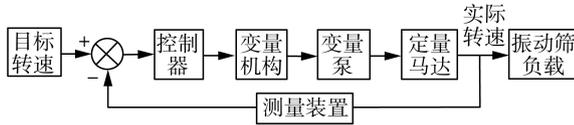


图 2 振动筛转速调节系统

Fig. 2 Vibrating screen speed regulation

比例流量阀和阀控液压缸环节的谐振频率往往远大于泵控马达谐振频率,其动态特性可以简化,比例流量阀环节的数学模型简化为增益系数 K_{bv} ,传感器增益为 K_{v2} ,放大器增益为 K_{a2} 。液压缸环节数学模型简化为

$$\frac{x_p(s)}{x_{v1}(s)} = \frac{K_{q1}}{A} \cdot \frac{1}{s} \quad (11)$$

式中: x_p ——液压缸活塞位移量, m;

K_{q1} ——比例阀的流量增益, m^3/s ;

x_{v1} ——比例阀芯的位移量, m;

A ——液压缸活塞有效面积, m^2 。

变量泵摆角对液压缸活塞位移的函数为

$$\frac{L(s)}{x_p(s)} = K_{\varphi} \quad (12)$$

式中: K_{φ} ——变量泵斜盘角系数, rad/m ;

L ——变量泵摆角, $(^\circ)$ 。

按照经验公式,马达角速度 $\dot{\theta}_n$ 对变量泵摆角的传递函数为

$$\frac{\dot{\theta}_n(s)}{L(s)} = \frac{\frac{K_{\varphi p}}{D_{m1}}}{\frac{s^2}{\omega_{h1}^2} + \frac{2\xi_{h1}}{\omega_{h1}}s + 1} \quad (13)$$

式中: $K_{\varphi p}$ ——变量泵的流量增益, $m^3/(rad \cdot s)$;

D_{m1} ——定量马达的排量, m^3/rad ;

ω_{h1} ——液压系统的固有频率, rad/s ;

ξ_{h1} ——液压系统阻尼比, $(N \cdot m \cdot s)/rad$ 。

振动筛转速 n_1 与液压马达转速 n_2 之间通过连杆传动,其传动比

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$

式中: i ——传动比。

2.3 喂入量调节模型

玉米收获机的行驶速度与喂入量有紧密关系,喂入量与收获机行驶速度之间的数学关系为

$$q = H \cdot \rho \cdot v \quad (15)$$

式中: q ——喂入量, kg/s ;

H ——割幅宽度, m;

ρ ——农作物密度, kg/m^2 ;

v ——收获机行驶速度, m/s 。

建立一个车辆纵向动力学模型是实现收获机行走速度控制的基础,针对车辆纵向运动控制的特点,同时为了便于分析,建立包含马达、轮胎和整车状态等的简化数学模型。

2.3.1 轮胎的数学模型

轮胎的受力如图 3 所示,其中 F_N 为地面对轮胎的反作用力,数学模型可表示为

$$J_w \dot{\omega}_2 = T_e - rF_f \quad (16)$$

式中: J_w ——轮胎的转动惯量, kg/m^2 ;

F_f ——受到地面的摩擦力, N;

ω_2 ——车轮的角速度, rad/s ;

T_e ——驱动力矩, $N \cdot m$;

r ——轮胎半径, m。

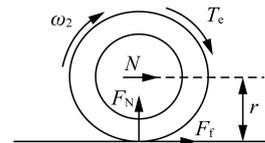


图 3 轮胎受力模型简图

Fig. 3 Schematic diagram of tire stress

2.3.2 收获机整车的数学模型

整车的受力如图 4 所示,忽略轮胎滑移、载荷转移和风速在行驶方向上分量对风阻力的影响等因素。车辆在纵向方向上的运动数学模型为

$$\begin{cases} M\dot{v} = F_f - F_R - F_L \\ F_R = f_R Mg \\ F_L = \frac{1}{2} \rho_a S C_a v^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_R ——滚动阻力, N;

g ——重力系数, N/kg ;

F_L ——风阻力, N;

M ——收获机的整车质量, kg ;

f_R ——滚动阻力系数;

S ——收获机的正面迎风面积, m^2 ;

ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ;

C_a ——空气阻力系数。

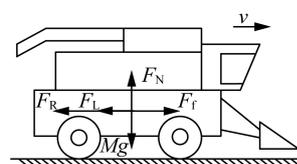


图 4 收获机整车受力简图

Fig. 4 Harvester vehicle stress diagram

2.3.3 动力马达的数学模型

为了便于分析,本文不考虑马达的非线性问题,只分析其动态响应过程。根据经验公式^[19],可将马达的动态响应模型简化为下面的一阶惯性模型

$$\frac{T_{ed}}{T_w} = \frac{1}{k_\tau s + 1} \quad (18)$$

式中: T_{ed} ——动态输出力矩, $N \cdot m$;
 T_w ——期望输出力矩, $N \cdot m$;
 k_τ ——时间常数。

2.3.4 收获机行驶速度控制的模型

为了简化模型分析过程,假设变速器与马达输出轴之间是刚性连接,则驱动力矩 T_e 与输出力矩 T_{ed} 之间的转矩比为

$$R_d = \frac{T_{ed}}{T_e} \quad (19)$$

假定 $X = [v \quad T_e]^T$, $Z = T_w$, 结合式(16)~式(18),可以得到收获机速度控制模型为

$$\begin{cases} \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & B_{12} \\ 0 & B_{22} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ R_d/k_\tau \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} W \\ 0 \end{bmatrix} \\ Y = [1 \quad 0] X \end{cases} \quad (20)$$

$$B_{12} = \frac{r}{Mr^2 + J_w}, B_{22} = -\frac{1}{k_\tau} \quad (21)$$

$$W = -\frac{2f_R r^2 Mg + \rho_a SC_a r^2 v^2}{2(Mr^2 + J_w)} \quad (22)$$

3 控制策略和算法

3.1 系统控制策略

玉米收获工作的质量和效率的评价标准就是玉米籽粒的损失率和含杂率,为了使玉米收获时的含杂率和损失率均降到合理的区间范围内,对整个工作系统就需要一个合适的控制策略和算法。依据 NY/T 1355—2007《玉米收获机作业质量》^[20]内容,国家标准要求玉米籽粒收获损失率不超过 5%,含杂率不超过 3%。为了满足实际生产需要,本研究以损失率控制为基础,同时兼顾含杂率的双目标调控,设定损失率阈值为 3%,含杂率阈值为国家标准 3%。在控制系统中,当损失率超出设定的阈值区间范围内时,执行损失率控制策略;当损失率处于设定阈值范围时,则采用含杂率调控策略,同时为了保证各工作参数在调节过程中处于一个合理的范围内,也需要设定阈值,图 5 为控制策略流程示意图。

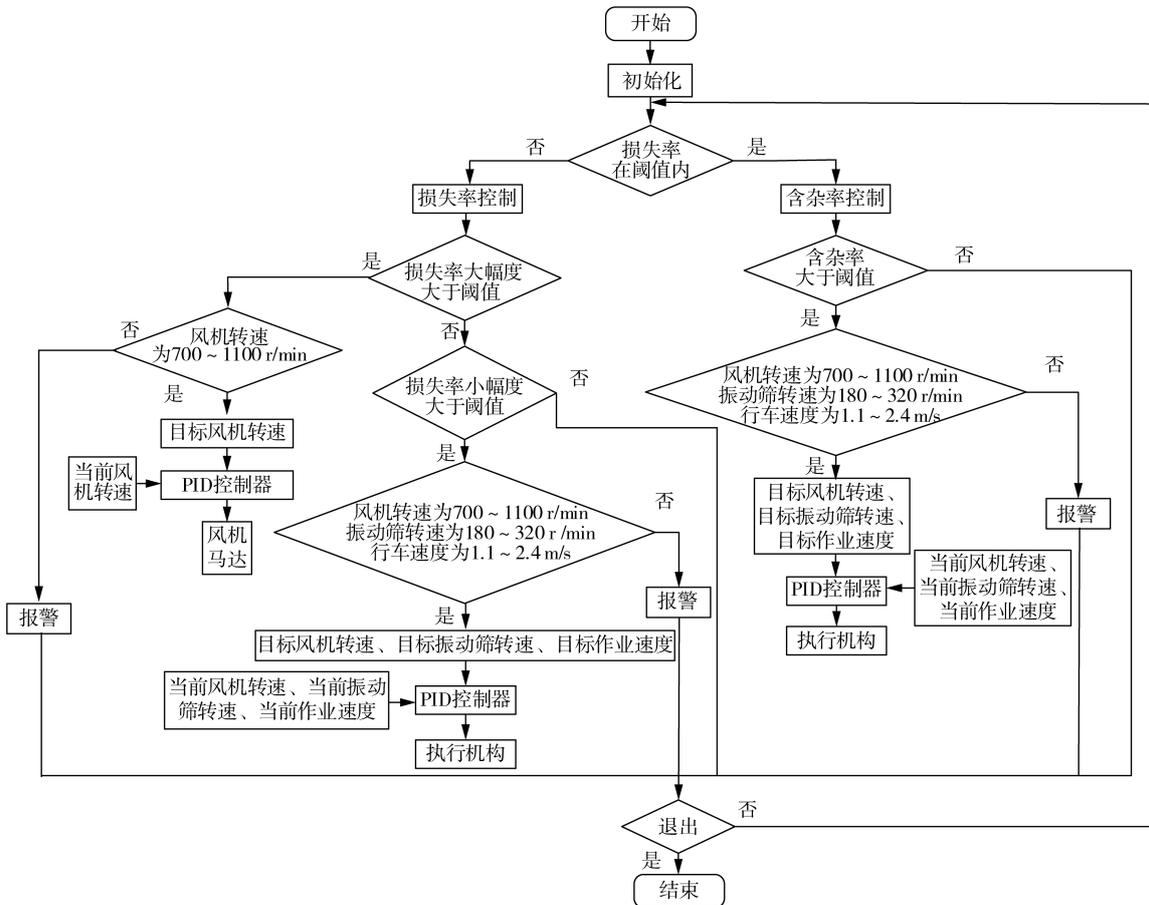


图 5 控制策略示意图

Fig. 5 Control strategy diagram

根据前文的正交试验分析结果,对籽粒损失率影响最大的影响因素是风机转速,其次是振动筛转速和喂入量,因此在损失率控制系统中,以调解风机转速为主,振动筛转速和行车速度为辅,当损失率大幅度超过阈值($\geq 3.6\%$)时,只调节风机转速,使损失率快速下降,风机转速每次下调 50 r/min;当损失率小幅度超过阈值时,则小幅度同时调节风机转速、振动筛转速和行车速度,风机转速每次下调 25 r/min,振动筛转速每次下调 25 r/min,行车速度每次上升 0.2 m/s。在含杂率控制系统中时,从正交试验数据分析,由于风机转速、振动筛转速和行车速度这三个因素均对含杂率有显著的影响,因此当含杂率超出阈值时,对风机转速、振动筛转速和行车速度三个工作参数进行同时调节,风机转速每次上调 20 r/min,振动筛转速每次上调 20 r/min,行车速度每次下降 0.1 m/s。考虑到实际收获过程中,传感器对籽粒损失、含杂率的监测环节以及控制器对工作参数调节环节等存在的时间滞后问题,将损失率和含杂率的监测传感器数据采集周期规定为 4 s。控制器从损失率和含杂率传感器采集得到的信息并结合各工作参数目前的状态,根据控制策略综合计算出风机转速、振动筛转速和行车速度的目标值。并输入到 PID 控制器里进行收获机各项工作参数的调节,使各项工作参数相互配合,满足实际生产需要,提高玉米收获的质量和效率。

3.2 系统控制算法设计

分别计算风机转速、振动筛转速和行车速度的实际值与输入目标值之间的偏差,PID 控制器通过比例、积分和微分环节的线性组合,将计算出的控制量输出给被控对象。PID 控制原理如图 6 所示。

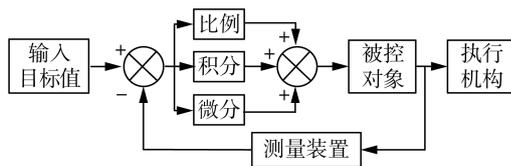


图 6 PID 控制原理图

Fig. 6 PID control schematic diagram

参考目标值与实际输出值之间在 t 时刻的偏差计算公式为

$$\begin{cases} e_1 = Y_1(t) - f_1(t) \\ e_2 = Y_2(t) - f_2(t) \\ e_3 = Y_3(t) - f_3(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中： e_1, e_2, e_3 ——风机、振动筛转速和行车速度偏差；
 Y_1, Y_2, Y_3 ——风机、振动筛转速和行车速度实际值；
 f_1, f_2, f_3 ——风机、振动筛转速和行车速度目标值。

常规 PID 控制器数学模型的表达形式为

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (24)$$

式中： $u(t)$ ——控制器输出；

K_P ——比例系数；

T_I ——积分时间常数；

T_D ——微分时间常数。

由于采用的是基于采样机制的控制原理,控制器采集到的均为离散信号,无法直接使用常规 PID 算法,所以需要离散化处理^[21]。以 T' 为采样周期,用矩形法数值积分代替精确积分,对式(25)处理得到离散 PID 控制规律

$$\begin{cases} u_1(k) = K_{P1} e_1(k) + K_{I1} \sum_{j=0}^k e_1(j) + K_{D1} [e_1(k) - e_1(k-1)] \\ u_2(k) = K_{P2} e_2(k) + K_{I2} \sum_{j=0}^k e_2(j) + K_{D2} [e_2(k) - e_2(k-1)] \\ u_3(k) = K_{P3} e_3(k) + K_{I3} \sum_{j=0}^k e_3(j) + K_{D3} [e_3(k) - e_3(k-1)] \end{cases} \quad (25)$$

$$K_{Ii} = \frac{K_{Pi} T'}{T_{Ii}}, K_{Di} = \frac{K_{Pi} T_{Di}}{T'}, i = 1, 2, 3$$

式中： $u_1(k), u_2(k), u_3(k)$ ——风机、振动筛转速和行车速度的控制量；

T_{I1}, T_{I2}, T_{I3} ——风机、振动筛转速和行车速度的积分时间常数；

T_{D1}, T_{D2}, T_{D3} ——三者的微分时间常数；

K_{Pi}, K_{Ii}, K_{Di} ——PID 控制器参数。

4 硬件在环试验

4.1 硬件在环平台搭建

基于收获机清选控制系统的设计需求,搭建了硬件在环仿真平台,图 7 为平台架构原理示意图。通过 RTI,将基于 MATLAB/Simulink 搭建的被控对象仿真模型下载到 dSPACE 的控制板卡中,将搭建的控制模块传输到控制器中;基于 ControlDesk 软件的功能和控制系统测试对控制界面的需求,在上位机搭建人机交互界面,用于实时监测和在线参数调整;在 dSPACE 平台中运行风机、振动筛转速等被控对象模型;dSPACE 实时仿真平台通过 CAN 总线与控制器相连,进行数据信号的实时传输。搭建的硬件在环实物平台如图 8 所示。利用 ControlDesk 软件搭建了硬件在环虚拟试验信息采集界面,具有功能完善、适用性强和人机交互性好等特点。包括风机、振动筛转速、喂

入量、含杂率、损失率和行车速度等实时显示界面,如图 9 所示。

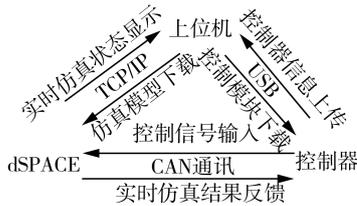


图 7 平台架构示意图

Fig. 7 Platform architecture diagram

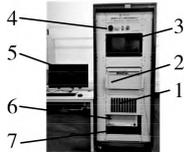


图 8 硬件在环试验平台

Fig. 8 HILS test platform

1. I/O 接口
2. 控制器放置处
3. 上位机显示器
4. 电源控制
5. PC 显示器
6. dSPACE 系统
7. PC 主机

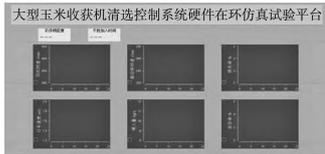


图 9 硬件在环仿真平台测控界面

Fig. 9 HIL simulation platform measurement and control interface

4.2 硬件在环实时仿真

为了验证控制策略和控制算法的实际控制效果,先设定风机转速初始状态为 900 r/min,振动筛转速初始值为 250 r/min,行车速度初始值为 1.53 m/s,待 4 s 各项工作参数稳定后再根据控制策略调节。同时考虑在实际收获工作过程中,由于机械振动、传动误差和路面随机激励等因素干扰,各项工作参数的实际值稳定时会有一定范围内波动。

仿真工况:当仿真进行到 15 s 时,此时工作参数调节完成,损失率、含杂率均降到阈值以内,此时假设当收获机在田间收获时由于农作物的含水率、密度和农作物长势等因素突然发生变化,使得损失率减少 14%,含杂率增加 14%,仿真结果如图 10 所示。

当各工作参数处于初始状态时,损失率在 3.7% 附近,大于设定阈值,含杂率在 2.3% 附近,低于设定阈值,此时进行损失率控制;当损失率控制调节完成后,损失率为 2.8% 左右和含杂率为 2.7% 左右,均处于阈值范围内,各工作参数无需进行调整,当 15 s 后进入仿真工况时,此时损失率低于阈值,含杂率高于阈值,当控制器采集到信息后,进入含杂率控制系统,调整之后损失率为 2.7% 左右,含杂率为 2.8% 左右。

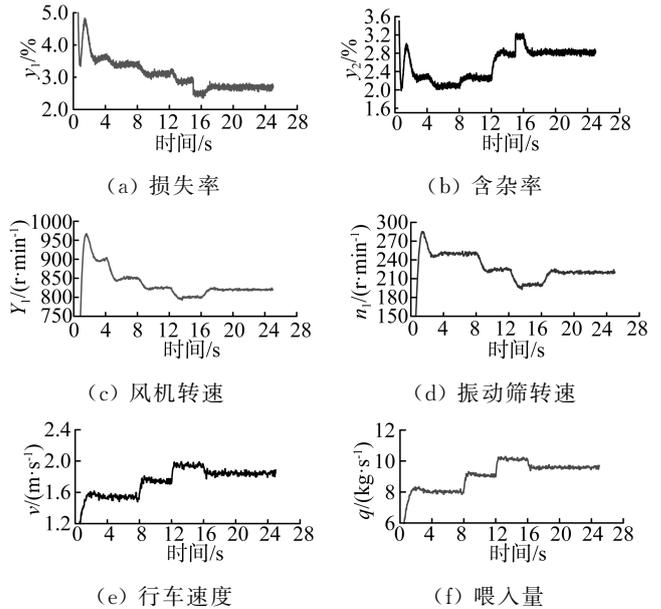


图 10 仿真结果

Fig. 10 Simulation results

5 结论

1) 通过建立的三因素三水平正交试验,可分析得到影响损失率的影响因素依次为风机转速、振动筛转速和喂入量;影响含杂率的影响因素依次为喂入量、风机转速和振动筛转速。并建立损失率、含杂率和各工作参数的数学关系模型。

2) 风机转速、振动筛转速和喂入量是影响清选系统工作的重要因素。在基于控制清选损失率的目标基础上,同时兼顾含杂率的控制,并根据三个工作参数对清选损失率和含杂率的影响规律制定清选控制系统的控制策略,并选择适合控制器采样控制特性的离散 PID 控制算法。

3) 在对建立的清选系统调节装置模型的基础上,结合不同工况,进行硬件在环测试试验。试验结果:损失率为 2.7% 左右,含杂率为 2.8% 左右,均处于设定的 3% 阈值范围内,证明了控制策略和算法的合理性和有效性。

参 考 文 献

[1] 宁新杰, 金诚谦, 印祥, 等. 谷物联合收割机风筛式清选装置研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 5-10.
Ning Xinjie, Jin Chengqian, Yin Xiang, et al. Research status and development trend of air-and-screen cleaning device for cereal combine harvesters [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 5-10.

[2] 刘华伟, 张萍, 杨晓慧, 等. 国内谷物联合收割机割台智能化现状与发展研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 189-197.
Liu Huawei, Zhang Ping, Yang Xiaohui, et al. Research

- on status and development of grain combine harvester cutting table intelligence in China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(4): 189-197.
- [3] 耿端阳, 孙延成, 李华彪, 等. 履带式坡地玉米收获机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 11-19.
Geng Duanyang, Sun Yancheng, Li Huabiao, et al. Design and experiment of crawler corn harvester for sloping fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(13): 11-19.
- [4] 车东. 玉米籽粒联合收获机清选系统的控制及实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [5] Mirzazadeh A, Pour S A, Hakimzadeh M. Optimized mathematical model of a grain cleaning system functioning in a combine harvester using response surface methodology [J]. *Acta Technologica Agriculturae*, 2022, 25(1): 20-26.
- [6] 梁振伟. 多风道清选装置设计方法及清选损失监测与控制技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [7] Hiregoudar S, Udhaykumar R, Ramappa K T, et al. Artificial neural network for assessment of grain losses for paddy combine harvester a novel approach [J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, 140: 221-231.
- [8] 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): 7083-7085.
- [9] 张华培. 基于遗传模糊算法的半喂入联合收割机关键参数匹配优化设计[D]. 成都: 西华大学, 2015.
- [10] 李洋. 玉米风筛清选装置内气固两相运动规律研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [11] 马令然. 玉米脱粒清选仿真分析及过程参数优化[D]. 济南: 济南大学, 2018.
Ma Lingran. The simulation analysis and process parameter optimization of corn threshing cleaning [D]. Jinan: University of Jinan, 2018.
- [12] 王永刚. 高含水率玉米籽粒脱粒装置设计与试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
Wang Yonggang. Design and experimental study on corn threshing device with high moisture content [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.
- [13] 程超, 付君, 陈志, 等. 玉米籽粒收获机清选装置参数优化试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 151-158.
Cheng Chao, Fu Jun, Chen Zhi, et al. Optimization experiment on cleaning device parameters of corn kernel harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 151-158.
- [14] 栗晓宇, 杜岳峰, 牛兴成, 等. 玉米清选装置结构优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 233-242.
Li Xiaoyu, Du Yuefeng, Niu Xingcheng, et al. Optimization design and experiment of corn cleaning device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 233-242.
- [15] 程超, 付君, 陈志, 等. 收获机振动筛振动参数影响不同湿度脱出物粘附特性[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 29-36.
Cheng Chao, Fu Jun, Chen Zhi, et al. Effect of vibration parameters of vibrating screen for harvester on adhesion characteristics of threshed mixtures with different moistures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 29-36.
- [16] 耿端阳, 牟孝栋, 张国栋, 等. 小麦联合收获机清选机理分析与优化试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(1): 219-230.
Geng Duanyang, Mou Xiaodong, Zhang Guodong, et al. Analysis and optimization of cleaning mechanism of wheat combine harvester [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Science)*, 2022, 52(1): 219-230.
- [17] 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.
- [18] 雷晓顺, 侯帅, 秦璇, 等. 电液比例阀控液压马达系统的模糊PID恒速控制[J]. *流体传动与控制*, 2016(1): 42-46, 49.
Lei Xiaoshun, Hou Shuai, Qin Xuan, et al. Electro-hydraulic proportional valve-controlled hydraulic motor system of fuzzy PID constant speed control [J]. *Fluid Power Transmission and Control*, 2016(1): 42-46, 49.
- [19] 高锋, 李克强, 连小珉. 用于汽车纵向运动控制的传动系统模型简化与分析[J]. *汽车工程*, 2005(3): 326-329.
Gao Feng, Li Keqiang, Lian Xiaomin. Simplification and analysis of powertrain model for vehicle longitudinal motion control [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2005(3): 326-329.
- [20] NY/T 1355-2007, 玉米收获机作业质量[S].
- [21] 张硕, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 后轮驱动大功率拖拉机牵引力-滑转率联合自动控制方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 47-53.
Zhang Shuo, Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, et al. Integrated control method of traction & slip ratio for rear-driving high-power tractors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 47-53.