

玉米收获机低损脱粒智能控制系统半实物仿真平台设计

朱晓龙 迟瑞娟 杜岳峰 班超 马悦琦 黄修炼

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要: 针对玉米籽粒收获机低损脱粒智能控制系统开发受场地和季节影响较大的问题,设计了一套低损脱粒智能控制系统半实物仿真平台。该仿真平台由仿真平台控制器、操作面板、演示面板、扶手箱、显示器和上位机组成。分析了玉米籽粒收获机低损脱粒智能控制系统的组成和收获控制器的测试需求,建立了玉米籽粒收获机关键作业参数调节过程的数学模型,基于 STM32F407 型单片机搭建了硬件在环仿真测试系统,并完成了试验台设计。进行了仿真平台和玉米籽粒收获机在空载条件下的作业参数调节开环对照试验,其中,滚筒转速仿真误差的数学期望为 0.126 r/min,标准差为 0.776 r/min;作业速度仿真误差的数学期望为 -0.022 km/h,标准差为 0.094 km/h;凹板间隙仿真误差的数学期望为 0.041 mm,标准差为 0.147 mm,验证了仿真平台对执行机构调节过程模拟的有效性。进行了信号模拟测试和收获控制器自动控制策略仿真测试,结果证明了仿真平台可用于玉米籽粒收获机智能控制系统的开发和控制策略的测试,提高了系统开发效率,缩短了开发周期。

关键词: 玉米籽粒收获机;低损脱粒;硬件在环仿真;智能控制系统

中图分类号: S225.5⁺1; TP337 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0114-09

OSID:



Design of Hardware in Loop Simulation Platform for Intelligent Control System of Corn Kernel Harvester

ZHU Xiaolong CHI Ruijuan DU Yuefeng BAN Chao MA Yueqi HUANG Xiulian
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem that the development of a low loss threshing intelligent control system for corn kernel harvester is greatly affected by the experiment site and season, a set of hardware in loop simulation platform for low loss threshing intelligent control system was designed and developed. The simulation platform was composed of a simulation platform controller, operation panel, demonstration panel, armrest box, display, and upper computer. The composition of the intelligent control system for low loss threshing of the corn kernel harvester and the test requirements of the harvest controller was analyzed. The mathematical model of the adjustment process of the key operating parameters of the corn kernel harvester was established. The hardware in the loop simulation test system was built based on an STM32F407 single-chip microcomputer, and the testbed design was completed. The open-loop contrast test of operation parameter adjustment of the simulation platform and the corn grain harvester under no-load conditions was carried out. The mathematical expectation of the simulation error of the cylinder speed was 0.126 r/min, and the standard deviation was 0.776 r/min. The mathematical expectation of operating speed simulation error was -0.022 km/h, and the standard deviation was 0.094 km/h. The mathematical expectation of the concave clearance simulation error was 0.041 mm, and the standard deviation was 0.147 mm, which verified the effectiveness of the simulation platform for the adjustment process of the actuator of the corn harvester was verified. The signal simulation test and the automatic control strategy simulation test of the harvest controller were carried out. The results showed that the simulation platform can be used for the development of an intelligent control system for corn kernel harvester and the test of control strategy, which improved the system development efficiency and shortened the development cycle.

Key words: corn kernel harvester; low loss threshing; hardware in loop simulation; intelligent control system

收稿日期: 2022-04-02 修回日期: 2022-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701901)和国家自然科学基金项目(52172396)

作者简介: 朱晓龙(1994—),男,博士生,主要从事玉米收获机智能控制系统研究,E-mail: zxlcau@163.com

通信作者: 迟瑞娟(1969—),女,副教授,博士生导师,主要从事车辆机电控制及智能化研究,E-mail: chiruijuan@cau.edu.cn

0 引言

玉米是我国的重要粮食作物,2021 年种植面积(43 320 万 hm^2)和产量(27 255 万 t)均高于小麦和水稻,位居第一^[1]。据农业农村部统计数据,2021 年玉米机收率为 79%,与小麦(98%)和水稻(94%)相比,仍处于较低水平,同时玉米收获机普遍存在损失率较高、智能化水平较低的问题^[2]。玉米收获作业环境复杂多样,特别是玉米籽粒收获,极易造成收获损失(籽粒破碎和籽粒损失)^[3-6]。前人研究表明,玉米籽粒收获机的结构设计、作业参数(滚筒转速、凹板间隙和风机转速等)不同均会导致不同的收获损失^[7-9]。国外玉米籽粒收获机大多搭载了较为先进的智能控制系统^[10-12],而国内在玉米籽粒收获机智能控制技术方面的研究尚不深入。近年来,我国也开始在玉米收获机智能控制方面进行大量研究^[13-15],智能控制系统的开发需要大量的试验来测试验证,而玉米属于季节性作物,收获期短,这使得玉米籽粒收获机智能控制系统的开发存在试验困难、周期较长等问题。

在降低试验难度、缩短控制系统开发周期方面,工业领域已有较为完备的流程和方法,如 V 型开发、硬件在环、快速开发原型和数字孪生等^[16-20]。这些技术在农业领域的应用主要集中在拖拉机导航、转向控制、动力换挡和驱动转矩控制等方面^[21-23],在玉米籽粒收获机控制系统开发的应用较少^[24]。因此,本文以玉米籽粒收获机为开发对象,以降低试验难度、缩短智能控制系统开发周期为开发目的,以硬件在环仿真为技术手段,设计一套低损脱粒智能控制系统半实物仿真平台。分析玉米籽粒收获机智能控制系统的组成和对开发测试环境的需

求,在仿真平台控制器内建立玉米籽粒收获机关键作业参数的数学模型,采用数值模拟的方法生成智能控制系统开发测试过程中所需的常规车电信号(手油门、发动机转速、点火开关、制动信号等)、作业质量传感器(籽粒破碎率传感器和夹带损失率传感器)信号和作业状态传感器(滚筒转速传感器、凹板间隙传感器和作业速度传感器)信号等。可在玉米收获机进行田间试验之前对玉米籽粒收获机智能控制策略进行仿真测试,以减小玉米籽粒收获机智能控制系统开发对季节和场地的依赖,缩短开发周期。

1 仿真平台总体设计要求与结构组成

为了确定半实物仿真平台的设计要求,首先对玉米籽粒收获机低损脱粒智能控制系统的组成进行分析。如图 1 所示,玉米籽粒收获机低损脱粒智能控制系统由收获控制器、扶手箱、显示器、信息采集模块和执行机构组成^[25]。扶手箱、显示器和籽粒破碎传感器通过 CAN 总线与收获控制器通讯。收获控制器智能控制策略分为手动控制和自动控制,在手动控制模式下,收获控制器接收扶手箱的操作指令对作业参数(作业速度、滚筒转速和凹板间隙)进行调节;在自动控制模式下,收获控制器接收作业质量传感器(籽粒破碎传感器、夹带损失传感器)、作业状态传感器(滚筒转速传感器、作业速度传感器和凹板间隙传感器)和常规车电信息,通过控制策略计算后发出控制指令调节作业参数,作业参数调节过程通过显示器实时显示。其中,通过改变比例电磁阀开度调节作业速度;通过改变驱动电机正转或反转的时长改变 CVT 的传动比,进而调节滚筒转速;通过改变电推杆伸长和缩短的时间改变凹板间隙。

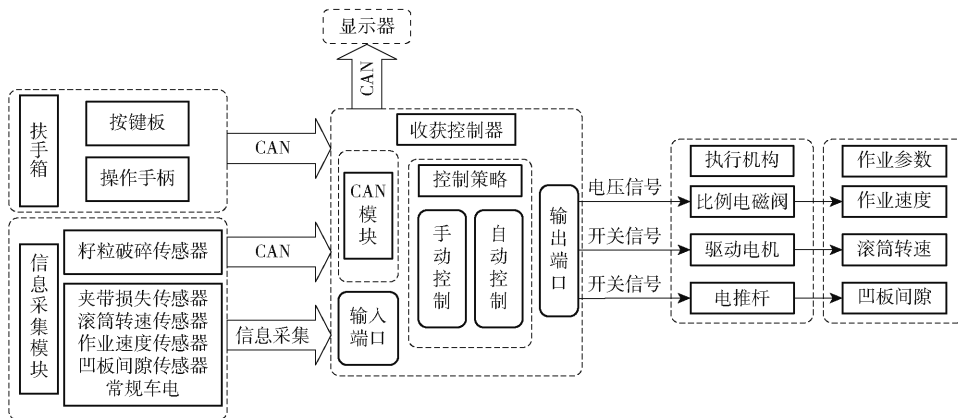


图 1 低损脱粒智能控制系统组成框图

Fig. 1 Composition block diagram of low loss threshing intelligent control system

1.1 仿真平台总体设计要求

根据玉米籽粒收获机智能控制系统的组成和功

能,确定半实物仿真平台的设计要求为:①可以对玉米籽粒收获机的常规车电、作业状态传感器和作业

质量传感器等信号进行模拟。②具备 CAN 总线收发功能,可以对玉米籽粒收获机上相关 CAN 节点的数据进行收发模拟。③可以接收收获控制器对执行机构的控制信号,并对关键作业参数(滚筒转速、凹板间隙和作业速度)的调节过程进行模拟,同时将模拟过程通过作业状态传感器反馈给收获控制器。④可以将作业参数的调节过程在演示面板上进行模拟

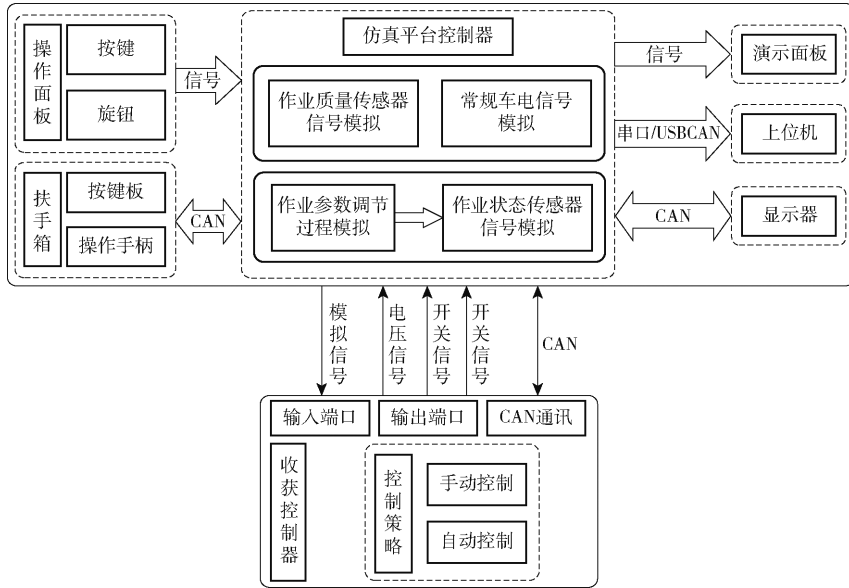


图2 玉米籽粒收获机智能控制系统半实物仿真平台总体结构框图

Fig.2 Overall structure of hardware in loop simulation platform for intelligent control system of corn kernel harvester

选用 STM32F407 型单片机作为仿真平台控制器,在仿真平台控制器内建立了滚筒转速、凹板间隙和作业速度调节过程的数学模型,模拟作业参数的调节过程,并将作业参数值转化为作业状态传感器信号输出;通过仿真平台控制器的 AD 转换、DA 转换、脉冲输出等功能实现常规车电信号和作业质量传感器信号模拟。

操作面板用于设置常规车电信号和作业质量传感器信号。扶手箱用于控制模式选择和作业参数设置。演示面板用于作业参数调节过程演示,增加直观性。上位机用于信号采集和保存,便于分析。显示器用于常规车电信号显示、作业信息监测和相关参数设置。

收获控制器接收作业质量传感器、作业状态传感器和常规车电等信号并根据控制策略发出作业参数调节指令,对控制策略进行测试验证。为方便系统移植,收获控制器、扶手箱和显示器均与玉米籽粒收获机选择相同型号,CAN 通讯协议与玉米籽粒收获机保持一致^[25-26]。

根据仿真平台的功能需求和总体结构组成,完成了仿真平台的结构设计,如图3所示,在演示面板上对作业参数调节过程进行演示,其中滚筒转速采用直流电机带动金属滚筒转动演示,作业速度采用

呈现,提高系统开发的直观性,具有充足的扩展接口。

1.2 仿真平台总体结构组成和结构设计

仿真平台的总体结构组成如图2所示,主要由仿真平台控制器、操作面板、演示面板、收获控制器、扶手箱、显示器和上位机组成,可接收收获控制器控制信号并模拟出收获控制器测试过程中所需的各种信号,同时具备 CAN 通讯功能。

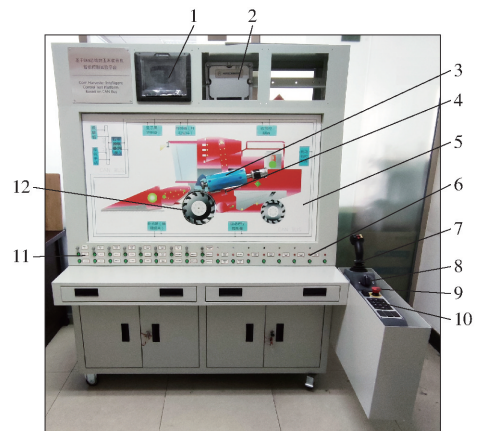


图3 仿真平台实物图

Fig.3 Physical drawing of simulation platform

1. 显示器 2. 收获控制器 3. 脱粒滚筒 4. 凹板 5. 演示面板
6. 信号输入输出 7. 操作手柄 8. 手油门 9. 急停按钮
10. 按键板 11. 操作面板 12. 车

直流电机带动车轮转动演示,凹板间隙采用舵机带动标识物上下移动演示。

2 仿真平台软件设计

本仿真平台以勇猛股份有限公司 4YZ-6 (ZL2150)型自走式玉米籽粒收获机为原型,选取滚筒转速、凹板间隙和作业速度为作业参数,建立作业参数调节过程的数学模型。模拟输出作业状态传感

器(滚筒转速传感器、凹板间隙传感器和作业速度传感器)信号、作业质量传感器(籽粒破碎率传感器和夹带损失率传感器)信号和常规车电(手油门、发动机转速、点火开关状态、制动信号等)信号。

2.1 作业参数调节过程模型设计

玉米籽粒收获机是一个复杂的系统,为简化模型,在建模时做出如下假设:①发动机具有良好的调速性且具备充足的后备功率,即发动机转速在仿真过程中不因作业状态发生变化。②执行机构间不存在交互作用。③忽略减速换向器、行走变量泵、变速箱等动力传递部件内部的转动惯量和机械损失。

2.1.1 滚筒转速调节系统模型

滚筒转速调节系统组成如图 4 所示,发动机动力经主离合器、减速换向器进行减速增扭后,通过 V 带式无级变速轮传递到脱粒滚筒。发动机到无级变速轮之间可看作是比例环节,脱粒滚筒的加速和减速很显然是一个惯性环节^[27]。控制信号通过驱动电机改变无级变速轮的传动比,控制信号为开关信号,决定无级变速轮传动比的变化方向,控制信号的作用时间决定无级变速轮传动比的变化量。因此,无级变速轮的传动比为驱动电机转速的积分,滚筒转速调节过程的传递函数为

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

式中 N_d ——滚筒转速, r/min
 f_d ——驱动电机转速, r/min
 N_E ——发动机转速, r/min
 K_1 ——减速换向器的传递系数
 T_1 ——驱动电机的积分时间常数
 T_2 ——脱粒滚筒的惯性时间常数
 s ——拉普拉斯算子

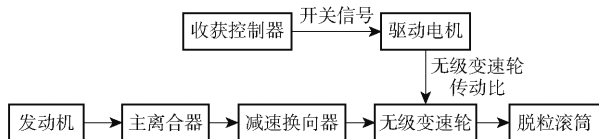


图 4 滚筒转速调节系统组成

Fig. 4 Composition of cylinder speed adjustment system

为了在仿真平台控制器建模,将传递函数离散化并转化为差分方程。则滚筒转速调速过程的差分方程为

$$N_d(n) =$$

$$\frac{N_E K_1 \Delta t^2 f_d(n) + (\Delta t T_1 + 2T_1 T_2) N_d(n-1) - T_1 T_2 N_d(n-2)}{\Delta t T_1 + T_1 T_2} \quad (2)$$

式中 n ——采样序列

Δt ——采样间隔, s

2.1.2 凹板间隙调节系统模型

凹板间隙调节系统组成如图 5 所示,凹板间隙的调节由电动推杆通过调节机构带动凹板上下移动实现,电动推杆由开关信号控制,开关电磁阀的开启和闭合决定凹板间隙的调节方向,开关电磁阀的通电时间决定凹板间隙的调节量。即凹板间隙为电动推杆伸缩速度的积分。同时,在实车试验过程中发现,凹板间隙的调节过程较慢,因此此处忽略凹板间隙调节过程中的惯性,即凹板间隙调节过程的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\delta_c(s)}{f_e(s)} = \frac{1}{T_3 s} \quad (3)$$

式中 δ_c ——凹板间隙, mm

f_e ——电动推杆伸缩速度, mm/s

T_3 ——电动推杆的积分时间常数

则凹板间隙调节过程的差分方程为

$$\delta_c(n) = \frac{1}{T_3} f_e(n) \Delta t + \delta_c(n-1) \quad (4)$$

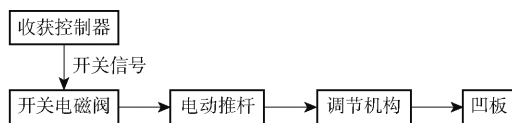


图 5 凹板间隙调节系统组成

Fig. 5 Composition of concave clearance adjustment system

2.1.3 作业速度调节系统模型

作业速度调节系统组成如图 6 所示,玉米籽粒收获机的底盘采用静液压驱动,发动机带动行走变量泵转动,通过行走马达驱动变速箱改变行走轮速度,收获控制器通过电压型比例电磁阀改变行走变量泵排量比,从而改变行走马达转速,达到控制作业速度的目的。因此,作业速度调节系统的传递函数由伺服阀的传递函数与行走马达的传递函数组成,由文献[28-29]可知,当负载恒定时,行走马达角速度与行走变量泵排量之间的传递函数为一个比例环节和一个振荡环节,即

$$\frac{\omega_M(s)}{V_p(s)} = \frac{\omega_p}{V_M(T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1)} \quad (5)$$

式中 ω_M ——行走马达角速度, rad/s

V_M ——行走马达排量, mL/r

V_p ——行走变量泵排量, mL/r

ω_p ——行走变量泵角速度, rad/s

T ——系统固有角频率的倒数

ζ ——系统阻尼比

由于忽略行走变量泵内部结构的转动惯量,则控制信号与行走变量泵排量比(变量泵排量与最大排量的比值)之间可看作比例环节,同时,行走变量泵角速度与发动机转速成比例,因此,作业速度调节

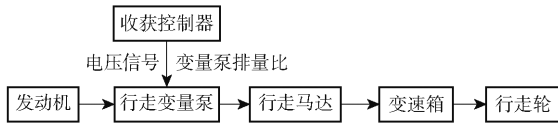


图6 作业速度调节系统组成

Fig. 6 Composition of operating speed adjustment system

过程的传递函数为

$$G_3(s) = \frac{v_c(s)}{V_s(s)} = \frac{N_E K_2 K_3 K_4}{V_M (T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1)} \quad (6)$$

式中 v_c ——作业速度, km/h

V_s ——比例电磁阀控制电压

K_2 ——发动机角速度与行走变量泵角速度的传递系数

K_3 ——控制信号与行走变量泵排量比的传递系数

K_4 ——变速箱的传递系数

则作业速度调节过程的差分方程为

$$\frac{V_s(n) \Delta t^2 N_E \frac{K_2 K_3 K_4}{V_M} + v_c(n-1) (2T^2 + 2\zeta T + \Delta t) - v_c(n-2) T^2}{T^2 + 2\zeta T + \Delta t^2} v_c(n) = \quad (7)$$

2.2 信号输出模拟

输出信号包括作业状态传感器信号、作业质量传感器信号和常规车电信号。其中,常规车电信号类型包括开关信号、电压信号和 CAN 信号,仿真平台采集操作面板控制指令后计算输出与真实玉米籽粒收获机相同的常规车电信号。

2.2.1 作业状态传感器信号模拟

玉米籽粒收获机滚筒转速传感器和作业速度传感器均为霍尔传感器,信号类型为脉冲信号,玉米籽粒收获机凹板间隙传感器为直线位移传感器,信号类型为电压信号。仿真平台控制器将 $N_d(n)$ 和 $v_c(n)$ 转换为对应的脉冲信号,将 $\delta_c(n)$ 转换为对应的电压信号,转换公式为

$$\begin{cases} p_d = \frac{N_d j}{60} \\ p_c = \frac{i v_c j}{7.2 \pi r} \\ U_\delta = \frac{\delta_c - b}{a} \end{cases} \quad (8)$$

式中 p_d ——滚筒转速传感器脉冲信号频率, Hz

p_c ——作业速度传感器脉冲信号频率, Hz

U_δ ——凹板间隙传感器电压, V

j ——玉米籽粒收获机转速传感器磁钢数量

r ——行走轮半径, m

i ——行走主减速比

a, b ——系数

2.2.2 作业质量传感器信号模拟

玉米籽粒收获机籽粒破碎传感器采用工业相机采集籽粒破碎率信息,经工控机计算后通过 CAN 总线发送给收获控制器;夹带损失率传感器采用冲击板传感器记录玉米籽粒收获机苞叶排出口处的籽粒数量,信号类型为脉冲信号。仿真平台采集操作面板旋钮产生的模拟电压并处理为对应的籽粒破碎率和夹带损失率,其中,籽粒破碎率信息通过 CAN 模块发送至 CAN 网络,夹带损失率信息转换为对应的脉冲信号,由仿真平台控制器输出。转换公式为

$$p_m = \frac{S_b l_1 l_h v_c G}{35.964 w_z l_2} \quad (9)$$

式中 p_m ——夹带损失传感器脉冲信号频率, Hz

S_b ——夹带损失率, %

w_z ——平均单粒玉米籽粒质量, g

l_1 ——粮食损失传感器长度, m

l_2 ——苞叶排出口宽度, m

l_h ——玉米籽粒收获机割台宽度, m

G ——每公顷产量, kg

2.3 仿真平台工作流程

仿真平台为收获控制器的调试和测试提供控制对象和传感器信息反馈,仿真平台控制系统程序流程如图7所示,具体步骤为:①进行参数初始化和系统自检,若出现异常则通过蜂鸣器警示工作人员。②通过操作面板设置玉米籽粒收获机常规车电信号,收获控制器判断是否具备作业条件,作业条件根据点火开关 ON 状态、制动和急停、主离合结合到位、挡位和发动机转速等判断。③收获控制器选择手动模式或自动模式,并根据控制策略将控制指令发送至仿真平台。④仿真平台根据控制指令对玉米籽粒收获机执行机构调节过程和作业状态传感器进行模拟,同时将执行机构的调节过程在演示面板上模拟呈现,显示器实时显示常规车电和作业信息。

2.4 收获控制器自动控制策略

由于作业参数对收获质量的影响为非线性^[30],且收获质量变化相对于作业参数的调节具有较大的迟滞性,因此收获控制器的自动控制策略包括两部分:①收获控制器每隔一个时间周期接收一次收获质量传感器反馈并结合作业状态传感器信号确定下一时间周期的作业参数目标值。②收获控制器将作业参数调节并稳定到相应的目标值。其中,作业参数目标值的确定主要依据前期研究成果和专家经验,作业参数调节采用离散化 PID 算法。

3 仿真平台功能测试与结果分析

为了验证仿真平台的功能,分别对试验台进行

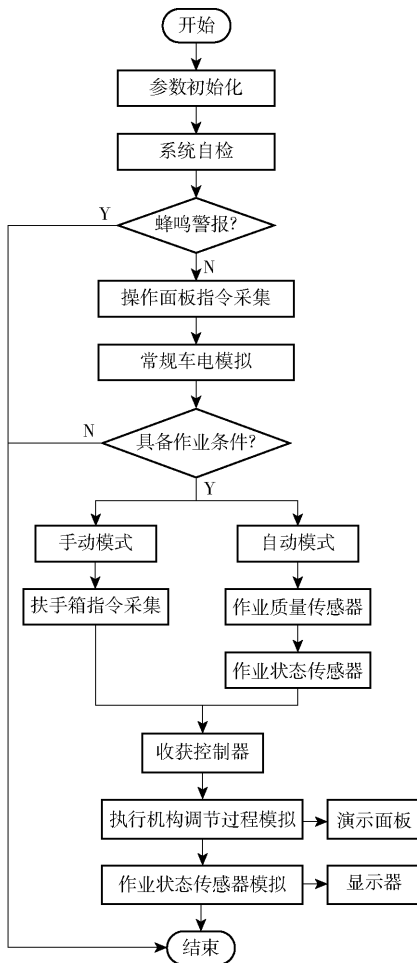


图 7 仿真平台控制系统程序流程图

Fig. 7 Program flow chart of simulation platform control system

了信号模拟功能测试和控制策略仿真测试。

3.1 信号模拟功能测试

信号模拟功能的测试方法为:通过仿真平台操作面板和扶手箱对常规车电信号、作业参数和作业质量传感器数值进行设置,通过上位机采集的相关信号如图 8、9 所示。

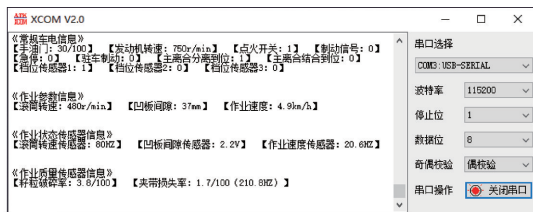


图 8 仿真平台上位机信息采集结果

Fig. 8 Information collection results of upper computer of simulation platform

3.2 控制策略仿真测试

3.2.1 脱粒参数调节模型有效性测试

对仿真平台和玉米籽粒收获机进行作业参数调节开环对照试验,验证仿真平台作业参数调节模型的有效性。试验在玉米籽粒收获机空载时进行,分别调节滚筒转速、凹板间隙和作业速度,记录作业参

序号	时间/秒	速度	轴ID	周期(s)	帧数量	CAN类型	方向	长度	距离
0	5.724100	1	0x1F00400	0.000572	3144	CAN	Rx	8	00 00 92 3D 00 00 00 00
1	9.621400	1	0x18FE21F7	0.000568	6656	CAN	Rx	8	62 1B 00 00 00 00 00 00

图 9 CAN 发送测试结果(序号 0 为发动机转速, 序号 1 为籽粒破碎率)

Fig. 9 CAN sending test results (NO. 0 referred to be engine speed, and NO. 1 referred to be grain crushing rate)

数调节过程并与仿真平台所模拟的作业参数调节过程进行对比,试验过程如图 10 所示。



图 10 试验过程

Fig. 10 Experiment process

对玉米籽粒收获机进行作业参数调节,为保证玉米籽粒收获机的控制指令与仿真平台的一致性,玉米籽粒收获机的控制指令通过收获控制器根据测试程序自动发出,按下测试按钮即开始执行测试程序。仿真平台的作业参数调节指令与玉米籽粒收获机调节过程相同。

仿真平台和玉米籽粒收获机的滚筒转速、凹板间隙和作业速度调节过程对比如图 11 所示,误差的统计学分析如表 1 所示。其中,结合应用场景,凹板间隙传感器的分辨率为 1 mm,因此,凹板间隙的实际调节过程为阶梯状,为方便处理,仿真平台将凹板间隙的调节过程模拟为连续变化的曲线,其误差为实际凹板间隙阶跃时与模拟值的差。仿真平台对作业参数调节过程的模拟与真实玉米籽粒收获机作业参数调节过程基本相同,但仍存在较小的误差,误差产生的原因可能为玉米籽粒收获机震动等原因导致的传感器漂移。

3.2.2 自动控制策略仿真测试

控制策略仿真测试是通过改变籽粒破碎率和夹带损失率验证收获控制器对作业参数的调节策略。玉米籽粒收获机作业环境复杂,在实际作业工况下受到的影响因素较多且具有时变性,难以用确切的模型描述实际作业工况。在控制系统实际搭载过程中发现,对于实际作业工况,仅需对空载工况下标定的 PID 参数做适当的修改即可满足控制要求。因此,仿真平台以空载时的作业参数调节模型代替实际工况下的作业参数调节过程。设置收获控制器接收收获质量传感器反馈的时间周期为 15 s,设定标准籽粒破碎率 Z_s 为 5%,标准夹带损失率 S_s 为 2%。

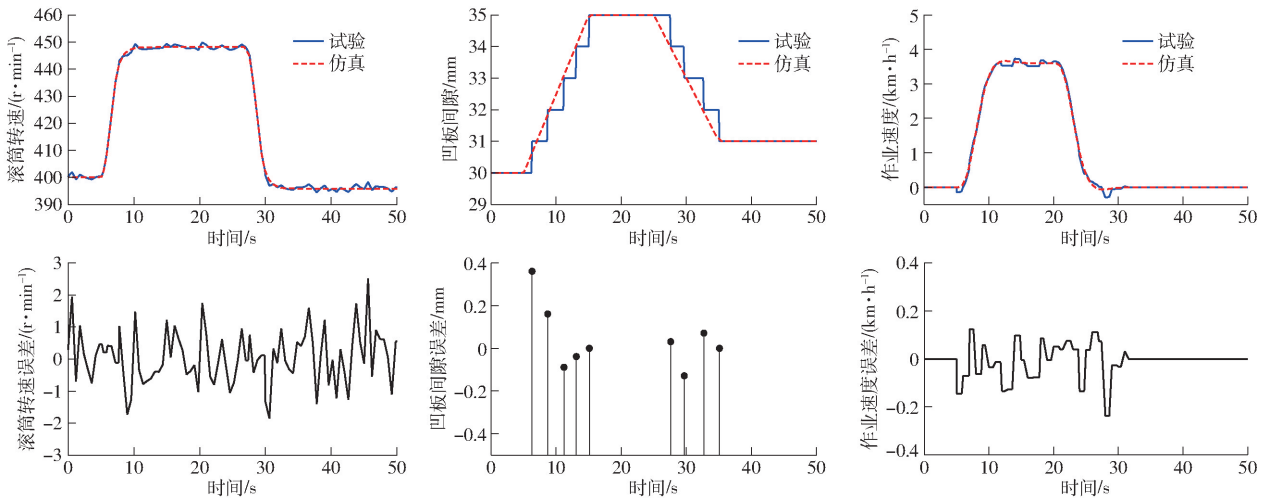


图 11 仿真误差变化曲线

Fig. 11 Simulation error variation curves

表 1 仿真误差分析

Tab. 1 Simulation error analysis

参数	误差的数学期望	误差的标准差
滚筒转速/($r \cdot \min^{-1}$)	0.126	0.776
作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	-0.022	0.094
凹板间隙/mm	0.041	0.147

自动控制策略仿真过程如图 12 所示,通过仿真平台操作面板设置籽粒破碎率和夹带损失率,15 s 时,收获控制器接收到 $Z_s > 5\%$ 、 $S_2 = 2\%$,籽粒破碎率大于标准值,收获控制器发出控制指令降低滚筒转速和作业速度,增大凹板间隙;30 s 时,收获控制器接收到 $Z_s = 5\%$ 、 $S_2 = 2\%$,收获控制器对作业参数不调节;45 s 时,收获控制器接收到 $Z_s < 5\%$ 、 $S_2 = 2\%$,籽粒破碎率低于标准值,收获控制器适当增加滚筒转速和作业速度提高作业效率;60 s 时,收获控制器接收到 $Z_s = 5\%$ 、 $S_2 = 2\%$,收获控制器对作业参数不调节;75 s 时,收获控制器接收到 $Z_s = 5\%$ 、 $S_2 > 2\%$,夹带损失率大于标准值,收获控制器增加滚筒

转速以增大脱粒滚筒对玉米果穗的脱粒分离作用,降低作业速度以减小喂入量,降低凹板间隙以增加脱粒元件对玉米果穗的挤搓作用,进一步增大脱粒滚筒对玉米果穗的脱粒分离作用;90 s 时,收获控制器接收到 $Z_s = 5\%$ 、 $S_2 = 2\%$,收获控制器对作业参数不调节;105 s 时,收获控制器接收到 $Z_s = 5\%$ 、 $S_2 < 2\%$,夹带损失率小于标准值,收获控制器降低滚筒转速以减小脱粒滚筒对籽粒的损伤,同时增加作业速度提高作业效率。

由仿真平台功能测试结果可知,仿真平台能够对玉米籽粒收获机的各种信号和作业参数调节过程进行模拟,可为玉米籽粒收获机智能控制系统的开发和控制策略的测试验证提供硬件基础和试验对象,缩短开发周期。

4 结论

(1)从玉米籽粒收获机智能控制系统开发受季节和场地影响大的实际情况出发,设计了一套低损

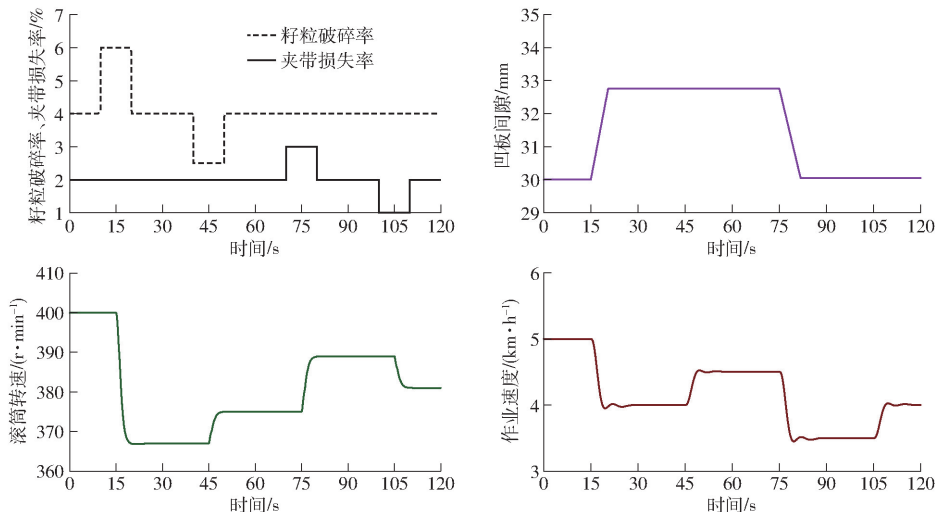


图 12 控制策略调试结果

Fig. 12 Control strategy commissioning results

脱粒智能控制系统半实物仿真平台,为玉米籽粒收获机智能控制系统的开发提供了硬件基础和试验对象。

(2)分析了国内某单纵轴流玉米籽粒收获机的常规车电信号、收获质量传感器信号和作业状态传感器信号的信号类型和信号特性,建立了关键作业参数调节过程的数学模型,并基于STM32F407型单片机搭建了硬件在环仿真测试系统,实现了对玉米

籽粒收获机收获控制器的开发和测试。

(3)进行了仿真平台和玉米籽粒收获机的作业参数调节开环对照试验,验证了仿真平台对执行机构调节过程模拟的有效性;并进行了信号模拟测试、CAN数据收发模拟测试和控制策略仿真测试,验证了仿真平台可用于玉米籽粒收获机智能控制系统开发,缩短开发周期。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于2021年粮食产量数据的公告[EB/OL]. [2021-12-06]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202112/t20211206_1825058.html.
- [2] 农业机械化管理司. 常抓不懈推进粮食作物机收减损[EB/OL]. [2021-11-09]. http://www.njhs.moa.gov.cn/gzdt/202111/t20211109_6381768.htm.
- [3] WANG K R, XIE R Z, MING B, et al. Review of combine harvester losses for maize and influencing factors[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(1): 1-10.
- [4] 王克如,李璐璐,鲁镇胜,等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 1-7. WANG Keru, LI Lulu, LU Zhensheng, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(7): 1-7. (in Chinese)
- [5] 王镇东,崔涛,张东兴,等. 玉米联合收获机纹杆式脱粒元件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 115-123. WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of rasp bar threshing element of corn combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 115-123. (in Chinese)
- [6] 王镇东,崔涛,张东兴,等. 玉米收获机低损变径脱粒滚筒设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 98-105. WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of low damage corn threshing drum with gradually changing diameter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 98-105. (in Chinese)
- [7] WAELTI H, BUCHELE W. Factors affecting corn kernel damage in combine cylinders[J]. *Transactions of the ASAE*, 1969, 12(1): 55-59.
- [8] CHOWDHURY M, BUCHELE W. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines[J]. *Transactions of the ASAE*, 1978, 21(4): 610-614.
- [9] 李少昆. 我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(3): 265-272. LI Shaokun. Factors affecting the quality of maize grain mechanical harvest and the development trend of grain harvest technology[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2017, 35(3): 265-272. (in Chinese)
- [10] SPECKMANN H, JAHNS G. Development and application of an agricultural BUS for data transfer[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1999, 23(3): 219-237.
- [11] CRAESSAERTS G, DE BAERDEMAEKER J, SAEYS W. Fault diagnostic systems for agricultural machinery[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(1): 26-36.
- [12] REID J, ZHANG Q, NOGUCHI N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1): 155-167.
- [13] 金诚谦,蔡泽宇,杨腾祥,等. 基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(5): 125-135. JIN Chengqian, CAI Zeyu, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of yield monitoring system of grain combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(5): 125-135. (in Chinese)
- [14] 李青林,宋玉莹,姚成建,等. 稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 92-101. LI Qinglin, SONG Yuying, YAO Chengjian, et al. Intelligent design and optimization system for cleaning device of rice and wheat combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 92-101. (in Chinese)
- [15] 王金武,汤天永,唐汉,等. 联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 143-152. WANG Jinwu, TANG Tianyong, TANG Han, et al. Design and experiment of on-line detection device for capacitive paddy rice moisture content of combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 143-152. (in Chinese)
- [16] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18. TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated*

- Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1–18. (in Chinese)
- [17] 邢杰,何洪文,孙逢春. 混合动力汽车控制策略硬件在环仿真开发平台[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(8): 887–890.
XING Jie, HE Hongwen, SUN Fengchun. Platform of hardware in the loop for hybrid control strategy test[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(8): 887–890. (in Chinese)
- [18] 朱庆林,王庆年,曾小华,等. 基于V模式的混合动力汽车多能源动力总成控制器开发平台[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1242–1246.
ZHU Qinglin, WANG Qingnian, CENG Xiaohua, et al. Development platform for HEV energy management system based on V-mode and its application[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(6): 1242–1246. (in Chinese)
- [19] 石琦文,孙晓民. 基于MATLAB的车用快速控制原型软件平台的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2005(13): 108–110.
SHI Qiwen, SUN Xiaomin. Research and implementation on MATLAB based rapid control prototype software platform for vehicle control[J]. Computer Engineering and Applications, 2005(13): 108–110. (in Chinese)
- [20] LI Jing, LI Youde, ZHAO Jian, et al. A hardware-in-the-loop test bench for traction control system[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(1): 64–67.
- [21] 徐广飞,逢焕晓,陈美舟,等. 拖拉机电液耦合转向试验平台设计与硬件在环试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 525–534.
XU Guangfei, PANG Huanxiao, CHEN Meizhou, et al. Design of hardware in loop tractor electro-hydraulic coupling steering test platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 525–534. (in Chinese)
- [22] 徐海龙,徐立友,刘晓慧,等. 电动拖拉机CAN通信网络设计及硬件在环测试[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(4): 1–5.
XU Hailong, XU Liyou, LIU Xiaohui, et al. Design of CAN communication network and HIL test for electric tractor[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(4): 1–5. (in Chinese)
- [23] 武仲斌,谢斌,迟瑞娟,等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 88–98.
WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving torque management model for electric tractor in field cruise condition[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 88–98. (in Chinese)
- [24] 秦云,赵德安,张超,等. 联合收割机负荷控制半实物仿真平台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 142–147.
QIN Yun, ZHAO Dean, ZHANG Chao, et al. Design of a hardware-in-loop simulation platform for combines load control[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 142–147. (in Chinese)
- [25] 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(增刊): 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(Supp.): 9–18. (in Chinese)
- [26] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于CAN总线的玉米收获智能控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 275–281.
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 275–281. (in Chinese)
- [27] 秦云,赵德安,李发忠,等. 基于RBF网络的联合收获机脱粒滚筒恒速控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 59–63.
QIN Yun, ZHAO Dean, LI Fazhong, et al. Constant palstance control of combine cylinder based on RBF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 59–63. (in Chinese)
- [28] 孙宝福,毛凯萍. 变量泵一定量马达容积调速回路的动态特性研究[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 53–55.
SUN Baofu, MAO Kaiping. Dynamic characteristics of variable displacement pump and fixed displacement motor volume speed-modulating system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(5): 53–55. (in Chinese)
- [29] 苑士华,魏超,张银彩. 液压机械无级变速器动态特性的影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 33–38.
YUAN Shihua, WEI Chao, ZHANG Yincui. Influencing factors for dynamic characteristics of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 33–38. (in Chinese)
- [30] ZHU X, CHI R, DU Y, et al. Experimental study on the key factors of low-loss threshing of high-moisture maize[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 23–31.