doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.036

基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究

张　真[1]　迟瑞娟[1]　杜岳峰[1]　谢　斌[1]　邓晓杰[1]　韩科立[2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 玉米收获机作为玉米收获的主要机械,其工作性能直接影响作业效率和收获质量。针对我国玉米收获关键技术有待突破、智能控制技术不成熟且实用化程度低的问题,提出了一种基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统。根据玉米收获机摘穗损失控制、籽粒破碎控制、清选损失控制、自动对行以及故障诊断等智能收获关键控制技术的功能要求,基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统共设置 9 个 CAN 节点;通过对控制信号进行分析,并参考 SAE J1939,制定了应用层通讯协议;针对智能收获关键控制技术,建立了相应的控制策略,实现了多参数自适应联合调控、数据的实时采集与显示、跑偏校验与故障诊断;通过整机搭载和田间试验,验证了 CAN 通讯协议的合理性及控制策略的有效性,系统满足可靠性与实时性要求,工作性能良好,实用性强,是玉米收获机作业控制的有效解决方案。

关键词: 玉米收获机; 智能控制系统; 联合调控; CAN 总线
中图分类号: S225.5⁺1; TP273.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)S0-0275-07

Investigation on CAN-bus-based Corn Harvester Intelligent Control System

ZHANG Zhen[1]　CHI Ruijuan[1]　DU Yuefeng[1]　XIE Bin[1]　DENG Xiaojie[1]　HAN Keli[2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: As the main machinery of corn harvest, corn harvester directly affects the operational efficiency and the quality of harvest. In China, the key technology of corn harvest still needs to be broken through and the immature intelligence control technology has low practicability. Thus a design of intelligent control system was presented which was based on CAN-bus and this design would include the following aspects: according to the function of header loss control, seed damage control, grain separation loss control, automatic row-controlled and fault diagnosis, there were nine nodes set up in intelligence control system. The fundamental controller and the intelligent harvest controller were the core of intelligent control system, and intelligent harvest controller was based on the mechanism of harvest loss and multi-parameter joint control strategy to carry out intelligent control of corn harvester. According to the signal sent by the key board, handle, the angle sensor and the automatic row-controlled node, the fundamental controller controlled the manual operation, walking and steering. By analyzing the control signal and referring to SAE J1939, the protocol of application layer was formulated. Aiming at the key control technology of intelligent harvest, the corresponding control strategies were set up, which realized the multi-parameter adaptive joint control, the real-time data acquisition and display, deviation check and the fault diagnosis. The carrying and field experiments proved that control strategy of the system was effective and the system met the requirements of reliability and real-time, and also the strong practicability. The corn harvester had good performance, so it was an effective solution to collect data and control corn harvester.

Key words: corn harvester; intelligent control system; joint control; CAN-bus

收稿日期: 2018-07-15　修回日期: 2018-09-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701901)
作者简介: 张真(1993—),女,博士生,主要从事玉米收获机智能控制系统研究,E-mail: zhangzhen931210@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

玉米收获机的工作性能、作物状态以及驾驶员的操纵水平直接影响收获质量和作业效率。美国的 John Deere 公司、Case 公司、德国的 Mengle 公司、道依茨公司生产的玉米联合收获机,绝大部分是在小麦联合收获机上换装玉米割台,并通过调节脱粒滚筒的转速和脱粒间隙进行玉米收获[1]。发达国家已将电子技术、导航技术、遥感技术和地理信息系统等先进的智能技术运用到玉米收获机上,并朝着大型化、自动化、现代化和精准方向发展[2-3]。我国玉米收获关键技术有待突破、智能控制技术不成熟且实用化程度较低,目前大多针对部分控制功能进行研究。黑龙江八一农垦大学对谷物联合收获机进行了电子监视系统国产化的研究[4];魏新华等[5]构建了基于 CAN 总线的联合收获机智能监控系统的总体架构,并实现了清选夹带损失监测装置、负荷反馈控制装置、机械和液压系统故障监测装置和开机自检装置的系统集成;陈进等[6]设计了一种基于 PLC 和显示屏的联合收获机监控系统,能够准确显示故障报警点,实时显示工作状态,并能够及时调整前进速度。目前,国内外收获机自动控制研究的对象主要有喂入量、喂入深度、割茬高度、滚筒转速和负荷等[7-12]。但上述监测系统参数监测不完整、智能控制系统功能单一,系统各参数间联系不密切,且能够应用于实际的产品很少。本文提出一种基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统,该系统采用 CAN 总线集成技术,以实现玉米收获机作业过程中多参数自适应联合调控、收获质量参数监测和故障诊断等功能。

1 玉米收获机智能控制系统总体方案设计

1.1 智能控制系统功能

我国目前的玉米收获机型主要有籽粒直收、穗茎兼收、鲜食玉米和种穗玉米收获机。玉米收获机智能控制系统主要用于解决收获过程产生的摘穗损失、籽粒破碎、清选损失等收获质量问题以及跑偏问题,不同玉米收获机型具有不同的控制功能。其中,籽粒直收收获机主要控制功能包括摘穗损失控制、玉米低损脱粒控制、清选损失控制、自动对行、CAN 总线集成技术以及常规车电与故障诊断。本文以纵轴流玉米籽粒直收机型为例进行智能控制系统的设计。

1.2 CAN 总线网络拓扑结构设计

控制系统采用 CAN 总线进行数据的采集和传输,CAN 总线可以有效地降低智能控制系统中的数据流量,提高参数的传输效率[13]。结合国内某企业籽粒收获机的结构特点,将系统网络分为标准帧和扩展帧两个子网,行车控制器作为网关。CAN 总线的网络拓扑结构如图 1 所示。网络共设置了 9 个节点,其中,摘穗损失传感器通过图像法采集断穗信息,用于检测收获过程中的摘穗损失率;CAN 按键板用于手动操作模式,可进行模式选择和控制割台、主离合、过桥离合、卸粮离合等工作部件动作;操纵手柄用于控制玉米收获机行走以及工作部件的手动操作;显示屏用于参数设置、数据存储以及显示作业参数、常规车电、故障诊断和报警等信息;行车控制器是玉米收获机的基本控制器,主要用于完成玉米收获机启停、行走和转向的基本控制以及传统的手动控制;发动机控制系统,提供发动机转速信号,测量冷却液温度与报警,测量机油压力与报警,检测瞬时油耗,检测发动机故障并报警;智能收获控制器可实现玉米收获机工作部件的自适应控制,以减少收获损失;籽粒破碎传感器通过图像法采集破碎信息,用于检测收获过程中的籽粒破碎率;自动对行研究玉米植株与导向器偏离角度在线检测方法、检测信号实时传输与整机转向控制,采用激光雷达检测边界条件,以及一对接触式传感器连续采集多根玉米植株,进而通过比例阀自适应调整转向油缸行程,从而实现玉米收获机的自动对行作业。

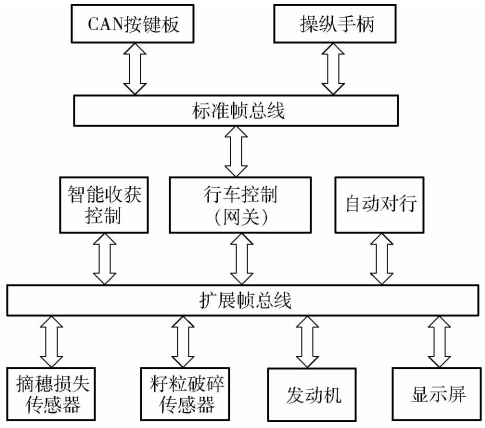


图 1 基于 CAN 总线的智能控制系统网络拓扑结构图

Fig. 1 Network topology of intelligent control system based on CAN-bus

1.3 主要 CAN 节点功能与结构

在图 1 的 9 个节点中,行车控制器和智能收获控制器是玉米收获机智能控制系统的核心,本文重点对行车控制器和智能收获控制器进行设计。如图 2 所示,智能收获控制器根据摘穗损失、籽粒破碎、清选损失的影响机理,以及多参数联合调控策略,进行玉米收获机的智能化控制。摘穗损失传感器、超声波传感器、籽粒破碎传感器、夹带损失传感器、电推杆位移传感器以及滚筒转速、拉茎辊转速、风机转速等测速传感器将采集到的信号传送到智能收获控制器,控制器按照既定的控制策略做出决策,

控制相应执行机构动作。行车控制器根据 CAN 按键板与操纵手柄发送的信号，控制主离合、过桥离合、卸粮离合、模式切换以及行走等手动操作；根据转角传感器和自动对行节点发送的信号，控制玉米收获机的行驶方向，完成自动对行作业。行车控制器采用 IMC T3654 构建，智能收获控制器采用 IMC T2840 构建。IMC T 系列控制器以 32 位的 Tricore 平台为内核，时钟频率为 180 MHz，该系统控制器响应速度快，具备灵活的 I/O 端口配置，且端口数量多，满足可靠性需求。软件开发采用 CoDeSys 3.5 开发环境。CoDeSys 3.5 是一种与设备无关的 PLC 编程系统，可完全支持所有符合 IEC61131－3 标准的编程语言。

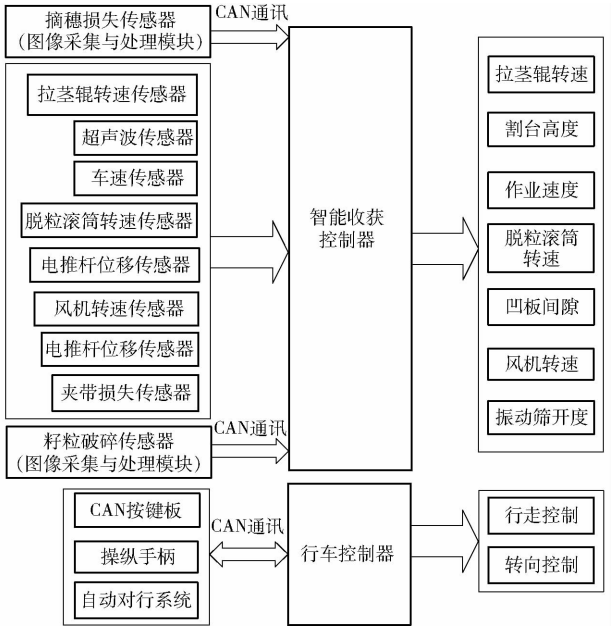


图 2　控制器功能示意图

Fig. 2　Controller function diagram

1.4　应用层协议的制定

根据图 1 中的 CAN 网络拓扑结构，对各节点的传输信号进行分析，信号分析如表 1 和表 2 所示。参考 SAE J1939 和 ISO11783 协议制定控制系统应用层协议。CAN 总线通讯采用扩展帧报文格式，波特率设定为 250 kb/s。行车控制器和智能收获控制器作为主控制器设置较高的优先级。各节点源地址分配如表 3 所示。

表 1　行车控制器部分信号分析

Tab. 1　Partial signal analysis of driving controller

	管脚	控制部件	电信号	信号类型
输入	23	急停	高电平	开关信号
	86	粮箱料位仪	低电平	开关信号
	102	过桥转速	频率	脉冲
	15	燃油液位	电阻(Ω)	A/D
	55	手油门	0.38～1.92 V	A/D
	42	踏板油门	0.75～3.84 V	A/D
输出	11	卸粮筒打开	高电平	开关信号
	105	倒车继电器	低电平	开关信号
	114	拨禾轮加速	MO＋	电机 H 桥
	115	拨禾轮减速	MO－	电机 H 桥
	6	左转比例阀	电流(0～2 A)	A/D
	10	前进比例阀	电流(0～2 A)	A/D
其他	65	CAN1_H		
	66	CAN1_L		
	67	CAN1 电阻与 CAN1_H 连接		

表 2　智能收获控制器部分信号分析

Tab. 2　Partial signal analysis of intelligent harvest controller

	管脚	控制部件	电信号	信号类型
输入	101	脱粒滚筒转速传感器	频率	脉冲
	30	拉茎辊转速传感器	频率	脉冲
	31	冲击板脉冲传感器	频率	脉冲
	53	超声波传感器	电流信号(4～20 mA)	A/D
	56	凹板间隙电推杆位移传感器	0.5～4.5 V	A/D
	58	下筛片开度电推杆位移传感器	0.5～4.5 V	A/D
输出	9	割台下降	高电平	开关信号
	11	凹板间隙增大	0.5～4.5 V	开关信号
	27	上筛片开度减小	高电平	开关信号
	26	滚筒转速加速控制	高电平	开关信号
	14	拉茎辊转速比例阀控制	电流范围(0～2 A)	A/D
	98	下筛片开度增大	电流范围(0～2 A)	开关信号
其他	65	CAN1_H		
	66	CAN1_L		
	67	CAN1 电阻与 CAN1_H 连接		

表 3　源地址分配表

Tab. 3　Source address allocation

节点	发动机	行车控制器	智能收获控制器	摘穗损失传感器	显示屏	籽粒破碎传感器	自动对行系统
源地址	00	F3	F4	F5	F6	F7	F8

2　智能控制系统软件设计

2.1　控制器软件总体设计

玉米收获机智能控制系统不仅需要控制玉米收获机完成传统的手动操作，还需对关键作业部件进行智能化控制，即在收获过程中根据机器运行状况及作物状态做出决策，驱动玉米收获机相关部件动作，以提高收获质量和作业效率。根据行车控制器

与智能收获控制器的功能设计程序模块,两控制器的程序模块如图 3 所示。

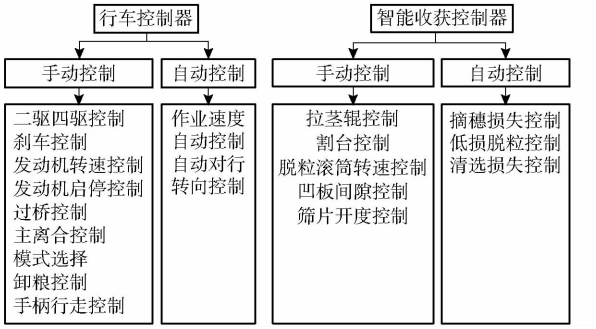


图 3 控制器程序模块

Fig. 3 Controller program module

2.2 关键控制技术的控制策略

玉米收获是一个受土壤、谷物状态变化影响的过程,实时调节作业参数到最优范围内有利于提高玉米收获机的收获质量。本文根据摘穗损失、籽粒破碎、清选损失的影响机理,建立玉米收获机智能收获系统关键控制技术的控制策略,包括摘穗损失控制、籽粒破碎控制及清选损失控制。控制系统组成如图 4 所示。

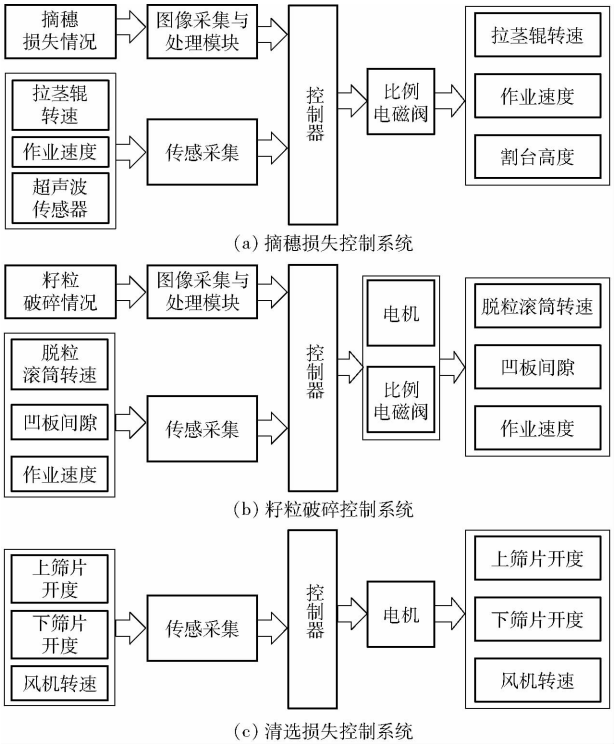


图 4 控制系统组成

Fig. 4 Control system composition

多行玉米收获机大多采用摘穗板式摘穗机构[14]。板式摘穗装置效率高、对玉米穗咬伤率小,掉粒和籽粒破碎现象较轻,但由于板式摘穗装置是强制拉断茎秆,易产生断茎秆,含杂率较高[15]。故针对摘穗过程中产生丢穗、断穗或断茎秆的问题,进行摘穗损失控制。摘穗损失智能控制以减少丢穗、断穗和落粒等损失为目标,摘穗损失手动控制系统(断茎秆控制系统)用于解决断茎秆问题。根据研究表明[16-18],摘穗损失的主要影响因素有拉茎辊转速、割台高度以及作业速度。摘穗损失控制系统由断穗检测系统、控制器、显示屏、电液比例阀、液压马达、液压油缸等组成。摄像头获取断穗百分比信息,传递给控制器,经控制器比对摘穗损失当量值,计算是否超标,并发出控制信号,显示屏显示断穗损失率,电液比例阀与液压马达执行拉茎辊转速的升降,控制拉茎辊转速到允许范围内后,再调整割台高度到允许范围内,最后控制作业速度,最终实现摘穗损失自适应调控。断茎秆控制依据驾驶员观察断茎秆获取信息,通过手动按键,控制拉茎辊转速以减少断茎秆。摘穗损失控制流程如图 5 所示。

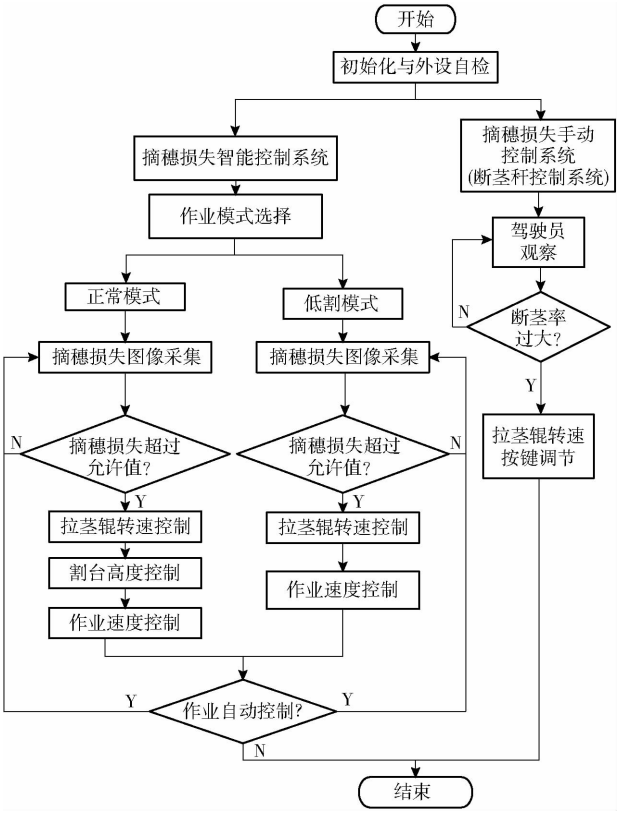


图 5 摘穗损失控制流程图

Fig. 5 Flow chart of pulling stem control

传统减少籽粒破碎的控制方法,多是将脱粒滚筒转速控制在最佳范围内,即滚筒转速的恒速控制[10,19-20]。本文籽粒破碎控制采用图像法采集籽粒破碎信息,通过探索脱粒滚筒转速、凹板间隙和作业速度等参数对籽粒损伤的影响机理,实现多参数联合调控。籽粒破碎控制系统由籽粒破碎检测系统、控制器、显示屏、电液比例阀、变量泵、液压马达、电机等组成。摄像头获取破碎籽粒百分比信息,传递给控制器,经控制器比对籽粒损失允许值,计算是否超标,并发出控制信号,显示屏显示籽粒破碎率,通

过电推杆改变凹板间隙到相应范围内，再驱动电机改变滚筒转速，最后控制行走速度，实现籽粒破碎控制。

梁振伟等[21-22]通过试验研究了清选损失籽粒在清选筛尾筛后部的分布规律，建立了清选损失籽粒量与清选筛尾部不同区域内籽粒量之间的数学模型。其研究表明，不同风机转速下损失籽粒质量比例沿 X 轴正向的分布概率模型为

$$S_f(x) = A[1 - e^{-k(x-x_c)}] \tag{1}$$

式中　A、x_c、k——待定常数

不同风机转速下清选损失籽粒质量比例沿 Y 轴分布概率模型为

$$S_r(y) = Ae^{-y/t_1} + y_0 \tag{2}$$

式中　t_1、y_0——待定常数

联立式(1)、(2)可得监测区域籽粒质量与总籽粒损失质量比例系数为

$$r = S_f(x)\big|_{x_2}^{x_1} S_r(y)\big|_0^b \tag{3}$$

式中　x_1、x_2——监测区域内 X 轴方向起始、结束位置，m

b——监测区域宽度，m

结合式(3)，可得监测区域籽粒量与总籽粒清选损失间关系为

$$V_s = \frac{V_0}{S_f(x)\big|_{x_0-a/2}^{x_0+a/2} S_r(y)\big|_0^b} \tag{4}$$

式中　V_s——籽粒清选损失总量

V_0——传感器监测值

x_0——传感器中心线到尾筛的水平距离，m

a——监测区域长度，m

根据式(4)将清选损失传感器的测量值转换为清选损失总量，进行清选损失控制。清选损失的影响因素为上、下筛片开度和风机转速[23]。清选损失控制系统由冲击板脉冲传感器、控制器、显示屏、电液比例阀、变量泵、液压马达、电机等组成。冲击板将冲击次数传递给控制器，经控制器判断籽粒回收允许值是否达标，并发出控制信号，显示屏显示夹带损失率，通过驱动电推杆改变上、下振动筛的筛片开度，再将风机速度调节到允许范围内，实现籽粒回收控制。

2.3　显示屏设计

显示屏界面分为主界面、作业质量界面、发动机信息界面、整机维保信息界面、报警故障代码和设置界面 6 个界面。主界面显示主要作业参数及常规车电图标；作业质量界面用于监控玉米收获机工作时的作业参数；发动机信息界面主要显示发动机的运转数据、保养信息及故障代码；整机维保信息界面监视整机是否需要维保；报警故障代码界面用于故障报警；设置界面用于恢复初始设定值、亮度调节、地形设置、作业参数设置。图 6 为主界面，图 7 为作业质量界面。



图 6　主界面

Fig. 6　Main interface



图 7　作业质量界面

Fig. 7　Operation quality interface

3　整机搭载与田间试验

整机搭载调试试验之前，首先进行了 CAN 节点数据收发试验。试验要求发送的数据如表 4 所示，通过 CAN 网络数据传输，试验结果如表 5。通过试验数据对比分析可得，两控制器间数据传输实时准确，验证了通讯协议的有效性，CAN 网络满足数据传输的可靠性和实时性要求。

表 4　应发数据

Tab. 4　Data should be sent

帧 ID	数据(HEX)
0x18fe27f4	07 00 70 00 00 07 00 70
0x18fe28f4	fc 7f 55 55 55 55 01 00
0x18fe29f4	08 00 80 00 00 00 00 00
0x18fe23f3	0b 00 b0 00 00 0b 00 b0
0x18fe24f3	0c 00 00 00 c0 00 00 00

表 5　数据发送结果

Tab. 5　Data transmission results

帧 ID	帧格式	数据长度	数据(HEX)
0x18fe27f4	数据帧	0x08	07 00 70 00 00 07 00 70
0x18fe28f4	数据帧	0x08	fc 7f 55 55 55 55 01 00
0x18fe29f4	数据帧	0x08	08 00 80 00 00 00 00 00
0x18fe23f3	数据帧	0x08	0b 00 b0 00 00 0b 00 b0
0x18fe24f3	数据帧	0x08	0c 00 00 00 c0 00 00 00

2018 年 1 月 17 日至 2018 年 5 月 18 日，以天津勇猛机械股份有限公司生产的 4YL－6 型单纵轴流玉米籽粒收获机为试验对象，根据上述设计方法将基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统搭载到玉

米收获机上,控制系统主要传感器安装位置如图 8 所示,驾驶室布置如图 9 所示。



图 8 主要传感器安装位置

Fig. 8 Installation position of main sensors

1. 触碰开关 2. 拉茎辊转速传感器 3. 电推杆位移传感器与冲击板脉冲传感器 4. 籽粒破碎传感器 5. 摘穗损失传感器 6. 激光雷达



图 9 驾驶室布置

Fig. 9 Cab arrangement

1. 行车控制器和智能收获控制器 2. 扶手箱总成 3. 显示屏

控制系统搭载完成后,进行调试和标定工作。将拉茎辊转速控制在 0 ~ 1 500 r/min 范围内可调;割台高度在 0 ~ 1 800 mm 范围内可调,到达最大高度平均上升时间为 14.6 s,平均下降时间为 12.8 s;最佳作业速度设定为 5 ~ 10 km/h;凹板间隙可调范围为 0 ~ 30 mm;调节上筛片开度的电推杆位移可调范围为 0 ~ 20 mm,调节下筛片开度的电推杆位移可调范围为 0 ~ 25 mm;完成转角传感器中位与极限位置的标定。参数标定完成后,进行程序逻辑的验证。经验证,手动控制中的各项操作均可实现;智能控制程序采用手动输入破碎率的方法验证。手动输入籽粒破碎率,当破碎率超过设定值,滚筒转速按照既定的控制策略降低,凹板间隙相应增大,车速降低。手动输入夹带损失率,当夹带损失率超过设定值,上、下筛片开度可相应减小,风机转速降低。输入摘穗损失率,当摘穗损失率超过设定值,拉茎辊转速降低,车速降低,割台可实现地面仿形功能。

为验证基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统的可行性和稳定性,2018 年 8 月 6 日,在天津乐善村进行田间试验,收获过程如图 10 所示。试验前



图 10 收获过程

Fig. 10 Harvesting process

测定玉米籽粒含水率为 30%。试验按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》进行,将试验区分为 20 m 稳定区、20 m 测定区和 15 m 停车区。收获前观察并记录每区的玉米种穗数及倒伏的玉米植株数,收获后记录每区未收获的玉米种穗数,并采集玉米籽粒样本。整个收获过程,玉米收获机运行正常,无电气故障,作业部件响应迅速,各参数显示无误,且各节点网络通讯准确可靠。收获后对摘穗损失、籽粒破碎和夹带损失情况进行统计,平均果穗损失率为 0.34%,平均饱满籽粒破碎率为 3.46%,平均含杂率 1.15%,搭载了智能控制系统的玉米收获机收获性能良好,收获损失低于国家标准值。

经搭载和田间试验验证,该智能控制系统数据传输准确可靠,操作方便,能够实现玉米收获机手动控制和自动控制中的各项功能。

4 结论

(1)玉米收获机在收获过程中的主要损失为摘穗损失、籽粒破碎和清选损失,本文针对收获损失问题,通过研究损失的影响机理,建立了控制策略,设计了摘穗损失控制、籽粒破碎控制、清选损失控制模块,实现了多参数联合调控。

(2)采用 CAN 总线通讯方式,实现了玉米收获机智能控制系统多项关键技术的集成。该系统监测信息完整,实现了参数的显示与设置、故障诊断和声光报警功能;可以进行手动控制和自动控制两种模式切换,自动控制部分可根据作业时的作物状态和收获质量做出决策,驱动相应工作部件动作;人性化的显示屏人机交互界面,方便操作。

(3)通过整机搭载和田间试验,验证了搭载基于 CAN 总线的智能控制系统的玉米收获机,工作性能良好,平均果穗损失率为 0.34%,平均饱满籽粒破碎率为 3.46%,平均含杂率 1.15%,收获损失低于国家标准值。系统运行故障率低,操作方便,满足预期设计要求。

参 考 文 献

1 朱纪春,陈金环. 国内外玉米收获机械的技术特点分析[J]. 农业技术与装备,2010(4):23 - 24.

2 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):251 - 257.

GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad[J]. Agricultural Mechanization Research, 2016,38(4):251 - 257. (in Chinese)

3 LIU Speckmann, JAHNS G. Development and application of an agricultural BUS for data transfer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1999, 23(3):219 - 237.

4 王熙,王新忠,王智敏. 电子技术在谷物联合收割机上的应用[J]. 现代化农业,2003(10):35 - 36.

5 魏新华,李耀明,陈进,等. 联合收割机工作过程智能监控装置的系统集成[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊 2):56 - 60.
WEI Xinhua, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. System integration of working process intelligent monitoring and controlling devices for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2):56 - 60. (in Chinese)

6 陈进,季园园,李耀明. 基于 PLC 和触摸屏的联合收割机监控系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2014(7):78 - 81.

7 姬江涛,王荣先,符丽君. 联合收获机喂入量灰色预测模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报,2008,39(3):63 - 66.
JI Jiangtao, WANG Rongxian, FU Lijun. Grey prediction fuzzy PID control of the feeding quantity in combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):63 - 66. (in Chinese)

8 高巍,陈进,李耀明. 作物高度自动测量装置的研制[J]. 农机化研究,2004,26(7):114 - 116.
GAO Wei, CHEN Jin, LI Yaoming. Research of the crop height automatic measuring system[J]. Agricultural Mechanization Research, 2004,26(7):114 - 116. (in Chinese)

9 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 Yongzhi, ZHANG Jixian, et al. PID control of constant palstance of a combine cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1):48 - 50. (in Chinese)

10 秦云,赵德安,张军. 联合收割机双闭环负荷控制系统的设计[J]. 机械工程学报,2012,48(2):165 - 171.
QIN Yun, ZHAO Dean, ZHANG Jun. Design of combine load control system based on double loop[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2):165 - 171. (in Chinese)

11 GLASBEY C A, MCGEHAN M B. Threshing loss stochastic variability on harvesters[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1983,28(2):163 - 174.

12 张认成,桑正中,张际先. 联合收割机自动控制研究现状与展望[J]. 江苏大学学报(自然科学版),1998,19(2):11 - 16.
ZHANG Rencheng, SANG Zhengzhong, ZHANG Jixian. State-of-art and prospect on combine automatic control[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 1998,19(2):11 - 16. (in Chinese)

13 王静,张倩,朱晓言,等. 基于 CAN 总线的联合收割机脱粒滚筒测控系统研究[J]. 农机化研究,2012,34(1):77 - 81.
WANG Jing, ZHANG Qian, ZHU Xiaoyan, et al. Control system of combine harvester threshing cylingder based on CAN bus [J]. Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1):77 - 81. (in Chinese)

14 河北省农业机械化研究所. 4YZ - 3 型玉米联合收获机鉴定技术资料[R]. 河北省农业机械化研究所,1999:4 - 5.

15 王优,张强,于路路. 玉米摘穗装置的应用现状与展望[J]. 农机化研究,2011,33(1):228 - 231.
WANG You, ZHANG Qiang, YU Lulu. The present situation of corn snapping device and its expectation[J]. Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1):228 - 231. (in Chinese)

16 范国昌,王惠新,张辉辰,等. 影响板式玉米摘穗机籽粒破碎和损失的因素分析[J]. 河北农业科学,2003,7(增刊):10 - 14.
FAN Guochang, WANG Huixin, ZHANG Huichen, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate in harvesting corn.[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2003, 7(Supp.):10 - 14. (in Chinese)

17 PISHGARKOMLEH S H, KEYHANI A, MOSTOFISARKARI M R, et al. Application of response surface methodology for optimization of picker-husker harvesting losses in corn seed[J]. Iranica Journal of Energy & Environment,2012, 3(2):134 - 142.

18 马晓光,贺俊林,赵秀全,等. 玉米收获机板式摘穗割台损失率和断茎杆率优化试验[J]. 农业工程,2015,5(4):1 - 4.
MA Xiaoguang, HE Junlin, ZHAO Xiuquan, et al. Optimization experiment on rate of snapping loss and broken stalk about plate type header of corn harvester[J]. Agricultural Engineering, 2015,5(4):1 - 4. (in Chinese)

19 张认成,桑正中. 轴流脱离滚筒功耗模型的研究[J]. 农业工程学报,1999,15(4):121 - 125.
ZHANG Rencheng, SANG Zhengzhong. Research on the power consumption model of axial threshing cylinder[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(4):121 - 125. (in Chinese)

20 徐立章,李耀明,李洪昌. 水稻谷粒脱粒损伤的影响因素分析[J]. 农业机械学报,2008,39(12):55 - 59.
XU Lizhang, LI Yaoming, LI Hongchang. Analysis on factors affecting performance of rice kernel damage during threshing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12):55 - 59. (in Chinese)

21 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 纵轴流联合收获机籽粒清选损失监测数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):106 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.016.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Monitoring mathematical model of grain cleaning losses on longitudinal-axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015, 46(1):106 - 111. (in Chinese)

22 ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011, 76(2):183 - 188.

23 GEERT C, JOSSEDE B, BART M, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2010,106(2):103 - 111.