

高含水率玉米低损脱粒智能控制系统设计与试验

朱晓龙 迟瑞娟 杜岳峰 邓晓杰 张 真 董乃希
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对我国玉米收获机智能化水平较低,玉米收获机参数的调节多通过机械操纵杆,玉米收获时含水率较高,高含水率玉米收获籽粒破碎率和夹带损失率较高等问题,对国内某纵轴流籽粒收获机进行了智能化改装,并设计了基于 CAN 总线的高含水率玉米低损脱粒智能控制系统。根据玉米收获机工作过程的需要,设计了手动控制和自动控制两种控制模式,提出了自动控制策略,并结合离散化 PID 控制算法实现了高含水率玉米低损脱粒。对系统进行了控制策略测试和田间试验,系统测试结果表明,各工作参数可按控制策略调节并稳定在设定的阈值内;田间试验结果表明,在高含水率玉米收获时,本系统可使籽粒破碎率和夹带损失率达到国家标准要求,其中籽粒破碎率最低为 3.35%,最高为 4.05%,平均为 3.75%,夹带损失率最低为 1.56%,最高为 2.08%,平均为 1.77%。

关键词: 玉米收获机; 高含水率玉米; 低损脱粒; 智能控制系统; CAN 总线

中图分类号: S225.5*1; TP272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0009-10

Design and Experiment of Intelligent Control System for Low Loss Threshing of High Moisture Content Corn

ZHU Xiaolong CHI Ruijuan DU Yuefeng DENG Xiaojie ZHANG Zhen DONG Naixi
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In China, the intelligent level of corn harvesters is low, and the parameters of corn harvesters are mostly adjusted through mechanical levers, the moisture content of corn is high during harvest in most areas, and the corn broken rate and entrainment loss rate of high moisture content corn are high. Thus, a longitudinal axial flow corn harvester was refit intelligently, and an intelligent control system for corn threshing with high moisture content and low loss based on CAN-bus was designed. According to the need of working process of corn harvester, two control modes, manual control and automatic control, were designed, the automatic control strategy was designed, and the discrete PID control algorithm was used to realize the low loss threshing of high moisture content corn. The control strategy test and field experiment of the system were carried out, the control strategy test showed that the working parameters can be adjusted according to the control strategy and were stable in the set threshold value, the field experiment showed that the system can make the broken rate and the loss rate of entrainment meet the national standard, Among them, about the broken rate of corn, the lowest was 3.35%, the highest was 4.05%, and the average was 3.75%; about the entrainment loss rate of corn, the lowest was 1.56%, the highest was 2.08%, and the average was 1.77%.

Key words: corn harvester; high moisture content corn; low loss threshing; intelligent control system; CAN-bus

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物,据 2020 年国家统计局数据显示,我国玉米种植面积为 41 264 万 hm²、总产量为 26 067 万 t^[1]。玉米当前的收获方式主要分两种:果穗收获和籽粒直收,前者仍是我国目前玉

收稿日期: 2021-07-12 修回日期: 2021-09-03
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701901)
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

米收获的主要方式,但是受晾晒场地、天气等的影响较大,降低了玉米的品质和产量^[2-4]。玉米籽粒直收一直是欧美等国家的主要收获方式^[5]。近年来,我国也在逐渐采取籽粒直收的方式,但是由于我国大多数地区,特别是黄淮海地区,受气候的影响采用冬小麦-夏玉米的种植模式,因此玉米收获时籽粒含水率较高,通常在 25% ~ 35%^[6-9],籽粒直收极易产生籽粒破碎和夹带损失^[10-13],严重影响籽粒的耐储藏性和经济性。因此,高含水率玉米低损脱粒是当前我国玉米收获领域亟待解决的问题之一。

关于玉米低损脱粒技术国内外学者进行了大量的研究,大多集中在脱粒机理分析和脱粒元件设计上,采用智能控制的手段降低脱粒损失提高脱粒质量的研究相对较少^[14-17]。同时,发达国家目前已经将信息电子技术、导航技术、遥感技术和地理信息系统等先进的智能化控制技术运用到了玉米收获机上^[18-19]。但是,国内玉米收获机起步较晚,技术相对比较薄弱,智能控制技术在玉米收获机上的应用近乎空白,尚处于技术研发阶段。因此,本文以纵轴流玉米籽粒直收机为研究对象,以高含水率玉米的低损脱粒为研究目标,以智能化控制技术为实现手

段,对国内某纵轴流籽粒直收玉米收获机样机进行智能化改装设计,并设计一套适用于高含水率玉米收获的低损脱粒智能控制系统。该系统以籽粒破碎率和夹带损失率反馈收获质量,融合信息技术、传感器技术、智能监测技术、自适应控制技术、CAN 总线集成技术,以实现我国玉米籽粒收获机脱粒参数的电控调节和智能监测。

1 系统方案设计

1.1 系统总体方案设计

根据玉米收获机的工作需求,设计了手动控制模式和自动控制模式。手动控制模式下,驾驶员根据显示器显示的籽粒破碎率和夹带损失率通过操作手柄和按键板向控制器发送控制指令,控制器响应控制指令并控制执行机构,从而调节各工作参数;自动控制模式包括低损脱粒控制和高效收获控制两种控制方法,由控制器根据籽粒破碎传感器和夹带损失传感器的测量值计算籽粒损失率,自动控制各执行机构,从而调节各工作参数以最佳组合工作,自适应田间环境的变化。驾驶员可根据实际作业需要切换两种工作模式,系统总体方案如图 1 所示。

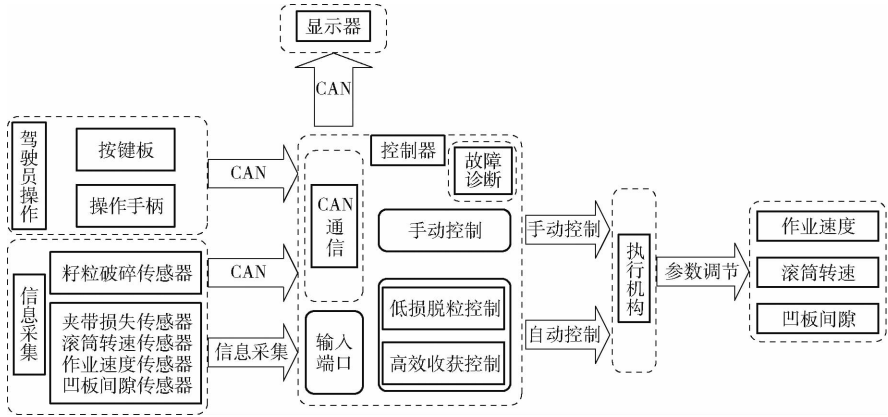


图 1 系统总体方案
Fig. 1 Overall scheme of system

1.2 CAN 总线网络拓扑结构设计

CAN 总线以其数据传输的快速性、稳定性、可靠性和极高的总线利用率成为汽车电子领域广泛采用的数据传输手段^[20]。根据控制对象、传感器类型以及控制方案的整体结构将整个控制系统分为 6 个 CAN 节点,分别为操作手柄、按键板、控制器、显示器、发动机、籽粒破碎传感器。其系统网络拓扑结构图如图 2 所示。

1.3 CAN 信号分析与应用层协议制定

信号分析是制定 CAN 通信协议的前提,根据信号类型以及信号的发送接收节点设计 CAN 网络的应用层协议,部分 CAN 节点信号如表 1 所示。

CAN 网络之间的信号传输需要遵守相应的网

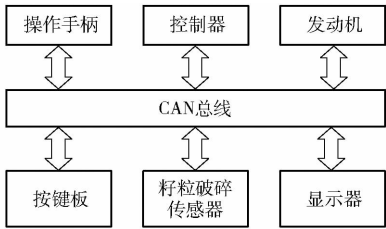


图 2 CAN 网络拓扑结构图
Fig. 2 CAN network topology diagram

络通信协议,CAN 通信协议一般包括物理层、数据链路层和应用层,应用层协议需要用户根据自己的需要制定。本系统根据 SAEJ1939 和 ISO11783 协议模型并依据表 1 对 CAN 网络中各节点数据的分析定义了应用层协议,采用 CAN2. 0B 通信规范,同时

表 1 部分 CAN 节点信号分析

Tab.1 Partial signal analysis of CAN node

信号名称	发送 CAN 节点	接收 CAN 节点	数据长度/bit
速度升高/降低	操作手柄	控制器	2
凹板间隙增大/减小	按键板	控制器	2
滚筒转速升高/降低	按键板	控制器	2
作业模式	按键板	控制器	2
主离合结合/分离	按键板	控制器	2
籽粒破碎率	籽粒破碎传感器	控制器/显示器	8
滚筒转速	控制器	显示器	16
凹板间隙	控制器	显示器	16
作业速度	控制器	显示器	16
CAN 掉线故障	控制器	显示器	2
发动机转速	发动机	控制器/显示器	16
发动机故障码	发动机	控制器/显示器	8

表 2 PDU 格式

Tab.2 PDU format

名称	优先权	保留位	数据页	PDU 格式	PDU 细节	源地址	数据域
符号	P	R	DP	PF	PS	SA	DATA
占用位	ID28 ~ ID26	ID25	ID24	ID23 ~ ID16	ID15 ~ ID8	ID7 ~ ID0	8B

表 3 源地址分配表

Tab.3 Source address allocation

节点	发动机	控制器	显示器	籽粒破碎 传感器	按键板	操纵 手柄
源地址	00	F4	F6	F7	6D	6C

智能化水平,适应智能控制系统的搭载,对国内某纵轴流籽粒收获机的脱粒滚筒、行走系统和凹板进行了智能化改装设计。

2.1.1 滚筒转速

滚筒转速控制系统主要由滚筒转速传感器、控制器、显示器、驱动电机、传动机构、无级变速轮和滚筒等组成。滚筒转速调节过程为:控制器发送控制指令,通过开关电磁阀的开启和闭合控制驱动电机的正转和反转,驱动电机通过传动机构改变无级变速轮的直径从而改变滚筒转速,开关电磁阀开启和闭合的时间决定驱动电机的转动时间,显示器实时显示滚筒转速和调节过程,滚筒转速调节范围为 250 ~ 1 000 r/min。

2.1.2 作业速度

作业速度控制系统主要由作业速度传感器、控制器、显示器、行走变量泵、电液比例阀和行走马达等组成。电液比例电磁阀是一种能够根据输入电信号使磁铁动作,完成与输入电信号成比例的流量和压力输出的元件^[21-23]。作业速度调节过程为:控制器发送控制指令,控制电液比例阀改变行走变量泵的流量,通过行走马达驱动变速箱转动,从而改变作

采用标准的 11 位标识符和扩展的 29 位标识符来描述报文的全部特征,具体协议数据单元 (Protocol data unit, PDU)格式如表 2 所示。其中,按键板、操作手柄、显示器、发动机采用标准帧传输数据,籽粒破碎传感器采用扩展帧传输数据,波特率设置为 250 Kb/s,根据信息的优先级分配源地址,源地址如表 3 所示。

2 控制系统硬件设计

2.1 控制参数调节机构设计

本系统控制参数主要包括滚筒转速、喂入量、凹板间隙,其中喂入量的调节通过改变作业速度实现,针对现有玉米籽粒收获机智能化水平低,多数操作系统采用传统的机械式操纵杆进行控制,为提高

业速度,显示器实时显示作业速度,作业速度的调节范围为 0 ~ 8 km/h。

2.1.3 凹板间隙

凹板间隙控制系统主要由控制器、显示器、开关电磁阀、电动推杆、调节机构和凹板等组成。凹板间隙调节过程为:控制器发送控制指令,控制凹板间隙调节电机的转动方向,从而改变电动推杆的长度,电动推杆通过调节机构改变凹板相对于滚筒的位置,从而调节凹板间隙,显示器实时显示凹板间隙和调节过程,凹板间隙的调节范围为 20 ~ 50 mm。

2.2 控制器设计

控制器是玉米收获机低损脱粒智能控制系统的运算和控制中心,承担着传感器信号采集与计算的工作,并控制各执行机构以调节各工作参数。控制器采用徐州威卡 IMC2840 控制器,采用 CoDesys3.5 软件开发环境,有两路 CAN 信号收发功能,可同时发送和接收标准帧和扩展帧 CAN 数据。控制器功能如图 3 所示。

凹板间隙传感器、作业速度传感器、滚筒转速传感器、夹带损失传感器和其他信号等通过控制器信号输入端口传入控制器,其中其他信号主要包括:急停、点火开关、制动、驻车、踏板油门、卸粮筒马达等;籽粒破碎传感器、按键板、操作手柄、显示器、发动机通过 CAN 总线与控制器通信。控制器对所接收的各种信息进行运算处理,根据控制策略控制执行机构,从而调节玉米收获机滚筒转速、作业速度、凹板

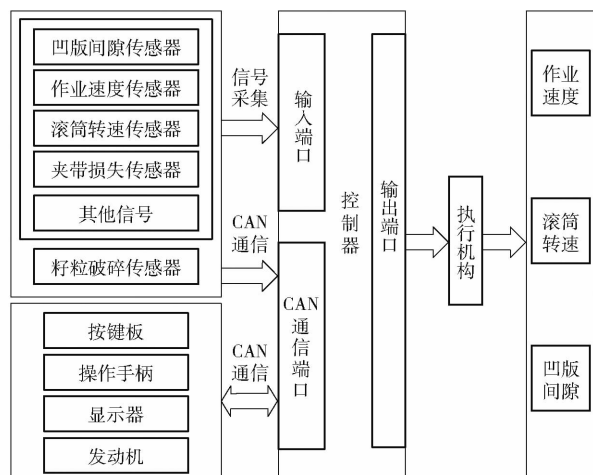


图3 控制器功能示意图

Fig.3 Controller function diagram

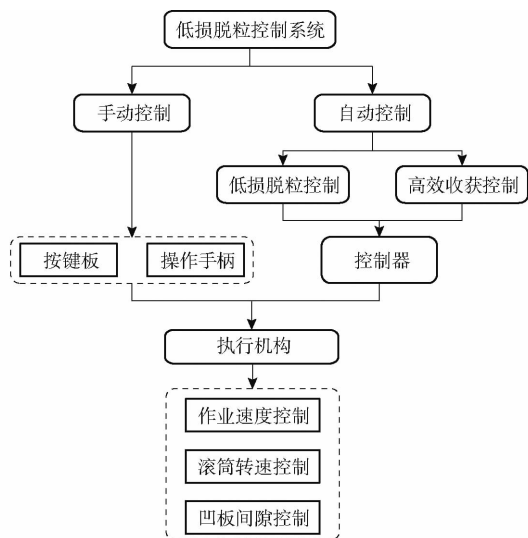


图4 整体控制方案

Fig.4 Overall scheme of control system

间隙等工作参数,实现玉米籽粒收获机的智能化控制,其中执行机构主要包括:滚筒转速加速/减速电磁阀、凹板间隙调节电磁阀、主离合、前进比例阀、后退比例阀、转向比例阀、卸粮筒和卸粮马达等。

3 控制系统软件设计

高含水率玉米收获籽粒破碎率高的主要原因是随着玉米含水率的增加,玉米籽粒抵抗冲击的能力降低,而果柄断裂力增加,即随着含水率的增加,玉米籽粒更难脱下且更易产生破碎^[24-25]。因此,在高含水率玉米收获过程中,极易因工作参数不匹配导致较高的籽粒损失率。同时,在田间收获作业时,作物含水率、果穗直径、植株密度、植株长势等均随着作业的进行而实时变化,更加剧了工作参数的匹配难度。现阶段的玉米收获仍主要依靠驾驶员的主观经验,且工作参数一经调校在整个收获季基本不再修改,不能适应高含水率玉米籽粒收获的需要。本系统通过对高含水率玉米籽粒收获过程的分析和玉米收获机工作过程的需要,设计了手动控制和自动控制两种模式分别对滚筒转速、作业速度、凹板间隙等关键工作参数进行控制,整体控制方案如图4所示。

3.1 信息采集模块

信息采集模块的作用是为手动控制和自动控制提供信息反馈,信息采集模块采集内容包括:作业速度、滚筒转速、凹板间隙、籽粒损失率、喂入量估计等。其中,籽粒破碎传感器采用图像采集的方式实时采集粮仓内的样本籽粒并计算籽粒破碎率,并将籽粒破碎率通过CAN总线发送给控制器。作业速度、滚筒转速、凹板间隙、夹带损失等信息通过控制器计算信号输入端口接收到的传感器信息得到,籽粒损失率和喂入量估计通过对采集数值进行进一步

计算得到。

3.1.1 速度信息采集

转速传感器采用电感式接近开关将旋转物体的转速转化为脉冲信号输出,控制器通过脉冲输入端口接收脉冲并计算相应的转速信息。滚筒转速传感器安装在滚筒一端。作业速度传感器安装在主减速箱。

3.1.2 凹板间隙信息采集

凹板间隙指凹板和脱粒滚筒之间的距离,采用直线位移传感器检测凹板间隙。本系统选用电压型直线位移传感器,传感器的输出电压和位移之间呈线性。

3.1.3 籽粒损失率计算

玉米脱粒过程中的籽粒损失包括籽粒破碎和夹带损失,采用冲击板传感器检测夹带损失,冲击板传感器安装在玉米收获机苞叶排出口,夹带损失率与籽粒损失率的计算公式为

$$S_b = \frac{111p_m g_z l_2}{9000l_1 l_g v_r G} \times 100\% \quad (1)$$

$$L_r = rS_b + (1-r)Z_s \quad (2)$$

式中 S_b ——夹带损失率, %

L_r ——籽粒损失率, %

Z_s ——籽粒破碎率, %

p_m ——粮食损失传感器单位时间脉冲数

g_z ——平均每颗玉米籽粒的质量, g

l_1 ——粮食损失传感器的长度, m

l_2 ——苞叶排出口的宽度, m

l_g ——玉米收获机割台的宽度, m

v_r ——玉米收获机作业速度, km/h

G ——单位公顷产量, kg

r ——夹带损失率权重

3.1.4 喂入量估计

玉米收获机的喂入量直接影响作业效率和作业质量,喂入量受作业速度、作物长势、植株密度和籽粒含水率等多种因素的影响,其中作业速度对喂入量的影响最大,因此采用作业速度对喂入量 Q 进行估计,其计算公式为

$$Q = \frac{v_c G_d S_z}{252\,000} \quad (3)$$

式中 G_d ——试验区平均单个果穗的质量, g
 S_z ——试验区果穗数量
 v_c ——作业速度, km/h

3.2 手动控制模式

3.2.1 滚筒转速控制

在手动控制模式下,驾驶员通过按键板发送控制指令实现滚筒转速升高或降低。首先,信息采集模块采集滚筒转速信息并通过显示器显示,驾驶员对当前收获过程判断后通过按键板发送控制指令,当滚筒转速小于 1 000 r/min(或高速限位,由高速限位开关决定)且大于 250 r/min(或低速限位,由低速限位开关决定)时,按下滚筒转速升高按键,无级变速轮直径调节电机上电正转,滚筒转速升高;按下滚筒转速降低按键,无级变速轮直径调节电机上电反转,滚筒转速降低。滚筒转速手动控制流程如图 5 所示。

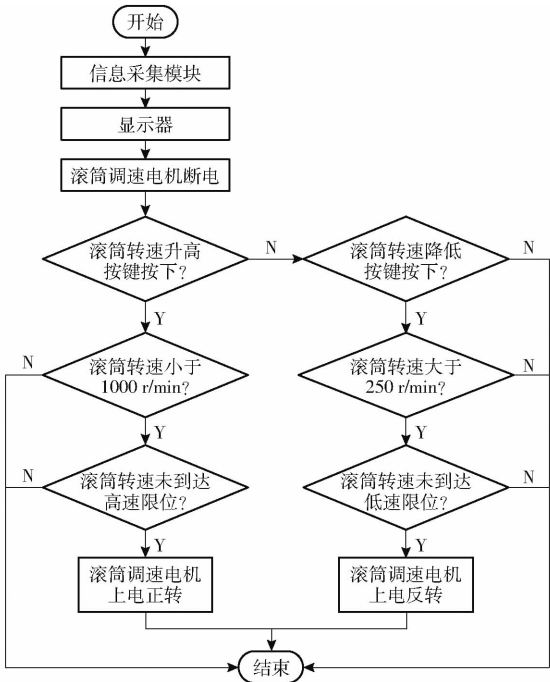


图 5 滚筒转速手动控制流程图

Fig. 5 Manual control flow chart of cylinder speed

3.2.2 凹板间隙控制

在手动控制模式下,驾驶员通过按键板发送控制指令控制凹板间隙的增大或减小。首先,信息采

集模块采集凹板间隙信息并通过显示器显示。驾驶员对当前收获过程判断后通过按键板发送控制指令。当凹板间隙在最大限位和最小限位之间时,按下凹板间隙增大按键,凹板间隙调节电机正转,电动推杆伸长,凹板间隙增大;按下凹板间隙减小按键,凹板间隙调节电机反转,电动推杆缩短,凹板间隙减小。凹板间隙手动控制流程如图 6 所示。

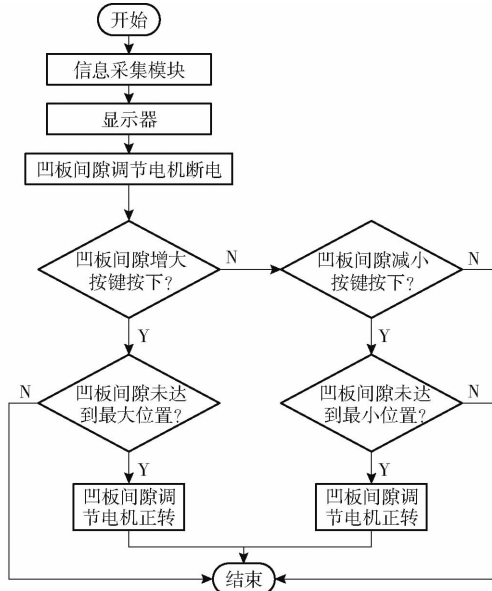


图 6 凹板间隙手动控制流程图

Fig. 6 Manual control flow chart of concave clearance

3.2.3 作业速度控制

在手动控制模式下,驾驶员通过操作手柄控制玉米收获机的作业速度。根据操作手柄的位置控制玉米收获机前进、后退和停止,玉米收获机前进和后退速度与手柄相对中止位置的角度成正比。为保证安全,收获机前进和后退状态相互改变时,首先需要将作业速度降为 0 后才能进行转换。作业速度手动控制流程图如图 7 所示。

3.3 自动控制模式

3.3.1 自动控制算法

高含水率玉米低损脱粒智能控制系统在自动控制模式下需要根据籽粒损失率的变化实时调节作业参数滚筒转速、作业速度和凹板间隙,作业参数控制策略的稳定性和可靠性将直接影响脱粒质量和脱粒效率。因此,分别设计了滚筒转速、作业速度、凹板间隙的 PID 控制算法,并通过实车调试确定相关控制参数,作业参数 PID 控制原理图如图 8 所示。

分别计算滚筒转速、作业速度和凹板间隙的实际值和目标值之间的偏差,再经过比例、积分、微分环节计算出控制量,根据调节机构的不同,控制量分为两种类型。其中,凹板间隙和滚筒转速的调节机构为开关电磁阀,通过电磁阀的开启时间控制滚筒

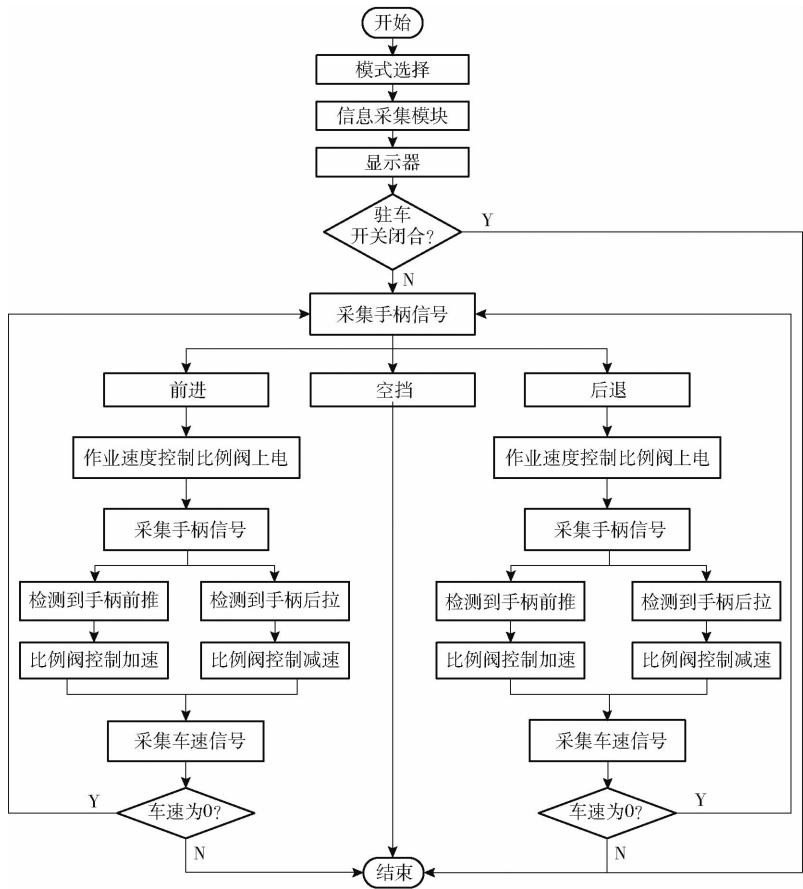


图 7 作业速度手动控制流程图

Fig. 7 Manual control flow chart of operating speed

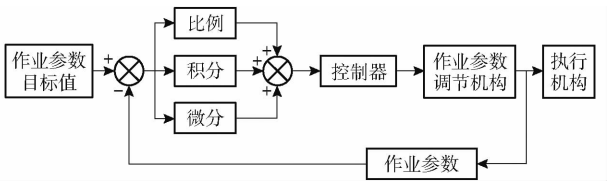


图 8 作业参数控制原理图

Fig. 8 Schematic of operating parameters control

转速和凹板间隙的变化量；作业速度的调节机构为比例电磁阀，通过比例电磁阀的开度控制作业速度。因此，进行PID控制前要先将滚筒转速和凹板间隙的偏差转化为调节时间的偏差，偏差计算公式为

$$\begin{cases} e_1(t) = (n_1(t) - n_{T1}(t))K_r \\ e_2(t) = (n_2(t) - n_{T2}(t))K_c \\ e_3(t) = n_3(t) - n_{T3}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $e_1(t)$ ——滚筒转速偏差
 $e_2(t)$ ——凹板间隙偏差
 $e_3(t)$ ——作业速度偏差
 n_1 ——滚筒转速实际值, r/min
 n_2 ——凹板间隙实际值, mm
 n_3 ——作业速度实际值, m/s
 n_{T1} ——滚筒转速目标值, r/min
 n_{T2} ——凹板间隙目标值, mm

n_{T3} ——作业速度目标值, m/s

K_r ——滚筒转速偏差与调节时间的换算系数

K_c ——凹板间隙偏差与调节时间的换算系数

由于控制器采集到的滚筒转速、凹板间隙、作业速度均为离散信号，因此要对PID算法进行离散化处理。由于信号采集的时间间隔一定，设时间间隔为 T ，则在 k 时刻的PID控制规律为

$$\begin{cases} U_1(k) = K_{p1}e_1(k) + K_{i1} \sum_{i=0}^k e_1(i) + K_{d1}(e_1(k) - e_1(k-1)) \\ U_2(k) = K_{p2}e_2(k) + K_{i2} \sum_{i=0}^k e_2(i) + K_{d2}(e_2(k) - e_2(k-1)) \\ U_3(k) = K_{p3}e_3(k) + K_{i3} \sum_{i=0}^k e_3(i) + K_{d3}(e_3(k) - e_3(k-1)) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $U_1(k)$ 、 $U_2(k)$ 、 $U_3(k)$ ——滚筒转速、凹板间隙、作业速度的控制量

K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{d1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{d2} 、 K_{p3} 、 K_{i3} 、 K_{d3} ——PID参数

失率采集周期设计为 15 s。根据前期研究成果,脱粒关键因素对损失率的影响重要性由大到小依次为:滚筒转速、喂入量、凹板间隙^[26],所以在自动控制模式下主要调节滚筒转速,将作业速度和凹板间隙作为辅助调节参数,当滚筒转速连续升高或降低 3 次后对作业速度和凹板间隙进行 1 次微调。控制器根据籽粒损失率和玉米收获机当前作业状态综合计算滚筒转速、作业速度和凹板间隙的最佳目标值,并分别输入 PID 控制器智能调节玉米收获机工作参数,使各工作参数紧密协调配合,适应玉米收获作业环境、作物状态等的变化,提高玉米收获质量和效率,自动控制流程图如图 9 所示。

Fig. 9 Automatic control flow chart

带损失率做单独要求,本系统设定夹带损失率标准为2%),观察滚筒转速和凹板间隙在自动控制程序下的调节过程。首先,手动输入高于设定值的籽粒损失率,由于滚筒转速传感器的测量误差和机械振动,滚筒转速稳定时会在一个转速范围内波动,因此在滚筒转速减小时设置滚筒转速的调节死区为目标值 ± 5 r/min。测试开始前,将发动机转速调节到2 200 r/min,将滚筒转速调节到700 r/min左右,待

滚筒转速稳定后按下自动收获按键,滚筒转速的调节过程如图 10 所示。滚筒转速在控制器的调节下逐渐减小,速度变化约为每 15 s 降低 50 r/min,滚筒转速在控制器的调节下可以稳定在目标滚筒转速设定的阈值内。然后,手动输入低于设定值的籽粒损失率,当籽粒损失率低于设定值时为了提高脱粒效率,控制器会对滚筒转速进行微调适当升高滚筒转速,由于滚筒转速调节量较小,滚筒转速的震荡量较小,因此当滚筒转速升高时设定滚筒转速的调节死区为目标值 ± 2 r/min。将滚筒转速调节到 400 r/min 左右,待滚筒转速稳定后按下自动收获按键滚筒转速逐渐升高,升高速度大致为每 15 s 增加 20 r/min,滚筒转速在控制器的调节下可以稳定在目标滚筒转速设定的阈值内。凹板间隙增大的调节速度为 0.5 mm/s,凹板间隙减小的调节速度为 0.4 mm/s。测试时,设定玉米果穗直径为 50 mm,先手动设定凹板间隙为 40 mm,当籽粒损失率大于设定值时,滚筒转速每降低 3 次,凹板间隙增大 2 mm;当籽粒损失率小于设定值时,滚筒转速每升高 3 次,凹板间隙减小 2 mm。

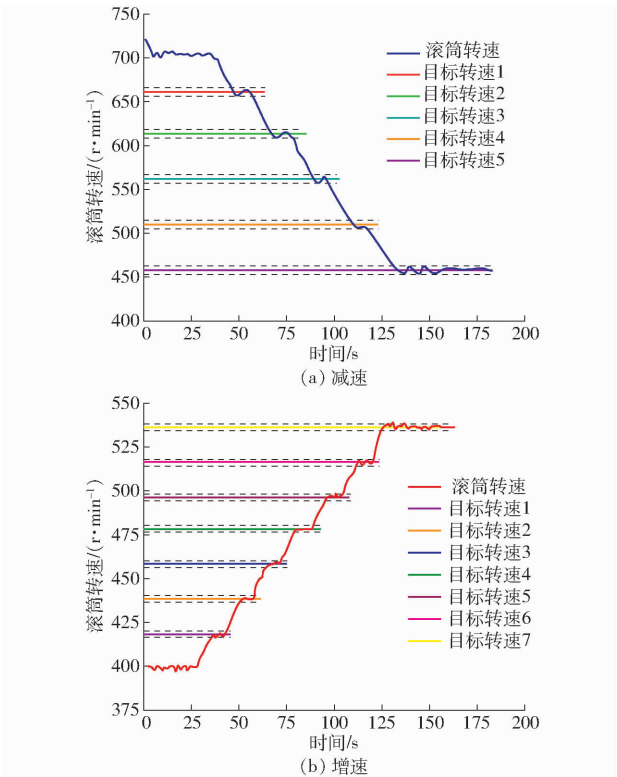


图 10 滚筒转速变化曲线

Fig. 10 Changing curves of cylinder speed

4.2 田间试验

在控制系统设计与测试的基础上,样机分别于 2018 年 9—10 月和 2019 年 8—9 月在天津市宝坻区 (39.4711°N, 117.4196°E) 进行了田间试验,试验机型为 4YL-6(单纵轴流,滚筒直径 630 mm,额定

喂入量 10 kg/s,割幅 6 行,作业速度 6~8 km/h),试验按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》^[27] 和 GB/T 5982—2017《脱粒机试验方法》^[28] 的要求进行。试验前通过五点法采集试验区玉米田基本特征信息如表 4 所示,试验过程中通过智能控制系统调节各执行机构,控制系统根据籽粒损失率自动调节玉米收获机工作参数,试验过程如图 11 所示,部分试验结果如表 5 所示。

表 4 玉米基本特征参数

Tab. 4 Basic characteristic parameters of maize

参数	数值/类型
平均穗长/mm	196
平均大端直径/mm	63.2
平均小端直径/mm	46.5
平均穗质量(带苞叶)/g	445
籽粒含水率/%	31
测量区玉米平均植株数/株	296
玉米类型	硬粒型



图 11 田间试验图

Fig. 11 Diagram of field experiment

表 5 部分试验结果

Tab. 5 Partial experiment results %

试验序号	籽粒破碎率	夹带损失率
1	4.05	1.89
2	3.35	1.56
3	3.98	1.60
4	3.72	1.75
5	3.68	2.08
平均值	3.75	1.77

整个试验过程,玉米收获机控制系统运行正常,执行机构动作准确可靠。试验结果表明,本高含水率玉米收获智能控制系统可使高含水率玉米收获时的籽粒破碎率和夹带损失率满足国家标准 GB/T 21962—2008《玉米收获机械技术条件》^[29] 对玉米收获损失的要求。其中籽粒破碎率最低为 3.35%,最高为 4.05%,平均值为 3.75%;夹带损失率最低为 1.56%,最高为 2.08%,平均值为 1.77%。

5 结论

(1) 针对我国玉米收获机智能化水平较低、人

机交互性较差、且多数操作系统仍处于传统机械式操纵杆操作的问题,设计了基于CAN总线的高含水率玉米低损脱粒智能控制系统,将原有的操纵杆操作变为现在的按键电控,实现了自动控制,显示器实时显示工作部件调整情况,为驾驶员作业提供参考。

(2)滚筒转速、作业速度和凹板间隙是影响籽粒损失率的重要因素,根据3因素对籽粒损失率的影响规律设计了高含水率玉米低损脱粒自动控制策略,并针对3个作业参数调节机构的控制特性设计

了基于PID的控制算法。

(3)对控制系统进行了系统测试和田间试验,系统测试结果表明,当籽粒损失率不满足要求时,控制系统可以根据控制策略调节玉米收获作业参数,满足系统设计要求;田间试验结果表明,本文高含水率玉米低损脱粒智能控制系统可以使籽粒破碎率和夹带损失率达到国家标准要求,其中籽粒破碎率最低为3.35%,最高为4.05%,平均值为3.75%;夹带损失率最低为1.56%,最高为2.08%,平均值为1.77%。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于2020年粮食产量数据的公告[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202012/t20201210_1808377.html.
- [2] YANG Li, CUI Tao, QU Zhe, et al. Development and application of mechanized maize harvesters[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(3): 15–28.
- [3] 崔中凯, 张华, 周进, 等. 智能玉米籽粒联合收获机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(9): 26–30.
CUI Zhongkai, ZHANG Hua, ZHOU Jin, et al. Design and experiment of intelligent corn grain harvester[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(9): 26–30. (in Chinese)
- [4] 商稳奇, 孙超. 自走式摘穗型玉米收获机产品现状及发展建议[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(11): 203–206.
SHANG Wenqi, SUN Chao. Status and development suggestions of self-propelled snapping corn harvester[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(11): 203–206. (in Chinese)
- [5] HUANG H, FAULKNER D B, BERGER L L. Harvest date influence on dry matter yield and moisture of corn and stove[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2): 593–598.
- [6] 王永刚, 张国海, 张恒, 等. 黄淮海地区夏玉米收获现状分析[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(11): 112–115.
WANG Yonggang, ZHANG Guohai, ZHANG Heng, et al. Analysis on current status of summer maize harvest in Huang-Huai-Hai area[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(11): 112–115. (in Chinese)
- [7] 柴宗文, 王克如, 郭银巧, 等. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2036–2043.
CHAI Zongwen, WANG Keru, GUO Yinqiao, et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2036–2043. (in Chinese)
- [8] 雷晓鹏. 黄淮海地区玉米机械收获籽粒可行性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
LEI Xiaopeng. Studies on the feasibility of maize mechanically harvesting grain in Huanghuaihai Regions[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2015. (in Chinese)
- [9] 刘继元, 崔中凯, 马继春, 等. 黄淮海地区小麦玉米接茬轮作机械化生产问题与对策[J]. *农机化研究*, 2016, 38(5): 259–263.
LIU Jiyuan, CUI Zhongkai, MA Jichun, et al. Problems and countermeasures of wheat corn rotation production mechanization for main crops in Huanghuaihai Region[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(5): 259–263. (in Chinese)
- [10] 曲宏杰, 张道林, 杨廷文, 等. 含水率对玉米脱粒性能影响的试验研究[J]. *农机化研究*, 2014, 36(2): 153–156.
QU Hongjie, ZHANG Daolin, YANG Tingwen, et al. Experimental research on corn threshing performance effected by moisture content[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(2): 153–156. (in Chinese)
- [11] 高连兴, 李飞, 张新伟, 等. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(12): 92–96.
GAO Lianxing, LI Fei, ZHANG Xinwei, et al. Mechanism of moisture content affect on corn seed threshing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(12): 92–96. (in Chinese)
- [12] 易克传, 朱德文, 张新伟, 等. 含水率对玉米籽粒机械化直接收获的影响[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(11): 78–80.
YI Kechuan, ZHU Dewen, ZHANG Xinwei, et al. Effect of moisture content on corn grain harvesting mechanization[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(11): 78–80. (in Chinese)
- [13] 李心平, 熊师, 耿令新, 等. 含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 25–31.
LI Xinping, XIONG Shi, GENG Lingxin, et al. Influence of water content on anti-pressing properties of corn ear[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(2): 25–31. (in Chinese)
- [14] PETKEVICHUS S, SHPOKAS L, KUTZBACH H D. Investigation of the maize ear threshing process[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(4): 532–539.
- [15] 邸志峰, 崔中凯, 张华, 等. 纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 28–34.
DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(1): 28–34. (in Chinese)
- [16] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 113–123.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 113–123. (in Chinese)
- [17] 屈哲, 张东兴, 杨丽, 等. 纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 58–65.

- QU Zhe, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Experiment on feed rate and cylinder speed of longitudinal axial flow threshing and separating device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 58–65. (in Chinese)
- [18] 耿爱军,杨建宁,张姬,等. 玉米摘穗收获机械损伤影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 56–62.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Ji, et al. Influence factor analysis of mechanical damage on corn ear picking[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 56–62. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 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)
- [21] 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.
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 & Control, 2016(1): 42–46. (in Chinese)
- [22] 卢文辉,李胜,吕敏健. 电液比例阀的结构原理与研究现状[J]. 机床与液压, 2014, 42(5): 166–172.
LU Wenhui, LI Sheng, LÜ Minjian. Fundamental working principles of electro-hydraulic proportional valves and review on their development[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(5): 166–172. (in Chinese)
- [23] 袁玉先,林国治,刘钊. 电液比例阀用控制器的设计[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 86–89.
YUAN Yuxian, LIN Guozhi, LIU Zhao. Design of controller used by electro-hydraulic proportional valve[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(8): 86–89. (in Chinese)
- [24] 李心平,高连兴. 种子玉米籽粒果柄断裂机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 47–51.
LI Xinping, GAO Lianxing. Experimental study on breaking mechanism of kernel stem of corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 47–51. (in Chinese)
- [25] 李心平,马福丽,高连兴. 玉米种子的跌落式冲击试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 113–116.
LI Xinping, MA Fuli, GAO Lianxing. Dropping impact experiment on corn seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 113–116. (in Chinese)
- [26] ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, 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.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 玉米收获机械试验方法:GB/T 21961—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 脱粒机试验方法:GB/T 5982—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 玉米收获机械技术条件:GB/T 21962—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(上接第8页)

- [17] 李永祥,李飞翔,徐雪萌,等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320–327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 320–327. (in Chinese)
- [18] BALEVICIUS R, SIELAMOWICZ I, MROZ Z, et al. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: a comparison of the DEM model results with the experimental measurements[J]. Powder Technology, 2011, 214: 322–336.
- [19] RIMANTAS K, ALGIRDAS M, ARNAS K, et al. Parallel discrete element simulation of poly-dispersed granular material[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41: 52–63.
- [20] JOZEF H, MAREK M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206–225.
- [21] 吴爱详,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [22] 李婉宜,曾攀,雷丽萍,等. 离散颗粒流动堆积行为离散元模拟及实验研究[J]. 力学与实践, 2012, 34(1): 20–26.
LI Wanyi, ZENG Pan, LEI Liping, et al. Simulation based on discrete element method and experiment on flow and packing behavior of particles[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(1): 20–26. (in Chinese)
- [23] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [24] 王立军,李洋,梁昌,等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 122–127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 122–127. (in Chinese)
- [25] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82–89.
LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82–89. (in Chinese)
- [26] DARIUS M, ALVARO R G, RIMANTAS K, et al. Maize grain shape approaches for DEM modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 247–258.
- [27] ZHOU L, YU J, WANG Y, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2020, 374: 353–376.
- [28] CHEN Z, YU J, XUE D. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2018, 328: 167–183.