doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.005

玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统研究

黄鑫光[1,2]　王宪良[1]　孟志军[2,3]　凌　琳[2]　肖跃进[2,3]　武广伟[2,3]
罗长海[2,3]　颜丙新[2,3]

(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255049;2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097;
3.智能农业动力装备全国重点实验室,北京 100097)

摘要:针对现有玉米电驱精量播种机检测系统精度低、功能集成度差和同步性不足等问题,对检测参数所需传感器进行了选型,构建了传感器-检测参数模型,开发了信号同步采集、处理及交互程序,设计了基于 cDAQ 控制器的玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统。该系统基于高频、实时、同步采样原则,为各参数信号分别配置单独的采样通道,结合 LabVIEW 平台设计信号处理程序与人机交互界面,为所有信号采集循环设置统一的软件触发器,并配置网络,由上位机通过网络端口为系统提供时钟信号,实现作业速度、排种盘转速、排种量、播种深度、下压力、风压、振动等多种参数实时高精度检测。对系统开展了排种盘转速、排种量检测台架试验以及作业速度、播种深度检测和下压力检测田间试验。试验结果表明,排种盘转速检测平均绝对误差不大于 0.44 r/min,平均相对误差均不大于 3.56%;排种量检测准确率不小于 98.50%。当作业速度为 0 ~ 15 km/h 时,作业速度检测平均相对误差为 4.42%;当作业速度大于 6 km/h 时,3 行单体播种深度检测平均值、标准差、变异系数相对误差分别为 2.70% ~ 7.53%、10.07% ~ 19.29% 和 13.99% ~ 17.42%;下压力静态检测试验中,两组单体下压力平均差值接近实际差值,相对误差不大于 5.93%,在低速 3 ~ 6 km/h 与高速 12 ~ 15 km/h 作业下,系统检测 2 组单体下压力平均差值与实际值最大相对误差分别为 14.91% 和 19.30%。本系统检测精度高、检测参数多、同步性高,可以满足玉米电驱精量播种机工况参数检测需求。

关键词:玉米;电驱;精量播种机;作业工况参数;检测系统

中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0061-11　　**OSID**:

Corn Electric Drive Precision Seeder Operating Condition Parameter Detection System

HUANG Xinguang[1,2]　WANG Xianliang[1]　MENG Zhijun[2,3]　LING Lin[2]　XIAO Yuejin[2,3]
WU Guangwei[2,3]　LUO Changhai[2,3]　YAN Bingxin[2,3]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*
2. *Information Technology Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
3. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Focused on the problems of low function integration, incomplete detection parameters and poor synchronicity and flexibility of corn electric drive precision seeder detection system, the sensors required for the detection parameters were selected, the sensor - detection parameter model was constructed, the signal synchronization acquisition, processing and interaction procedures were developed, and the detection system of the operating condition parameters of corn electric drive precision seeder based on cDAQ controller was created. The system was based on the principle of high-frequency, real-time, synchronous sampling, the hardware adopted cDAQ equipment as the data acquisition controller, and configured separate sampling channels for the signals of each parameter; the software design combined the LabVIEW platform to design the signal processing program and human-computer interactive interface, set up uniform software triggers for all the signal acquisition loops and configure the network ports, and

收稿日期:2024-12-02　修回日期:2024-12-25

基金项目:新一代人工智能国家科技重大专项(2022ZD0115800)、国家自然科学基金项目(32301705)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介:黄鑫光(1999—),男,硕士生,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:Delicate-521@outlook.com

通信作者:颜丙新(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail:ybx0122@126.com

provided the clock for the system by the host computer. The upper computer provided the clock signal for the system to realize the real-time high precision acquisition of a variety of working condition parameters, such as operating speed, seeder meter plate rotation speed, seeding rate, seeding depth, downforce, wind pressure, vibration and so on, in the process of seeding operation. In order to verify the reliability of the detection system, the bench test for seed meter plate rotational speed and seeding rate detection was carried out, together with a field test for operating speed, sowing depth detection, and downforce. The results of the bench test showed that the average absolute error of seed meter plate rotational speed detection was no more than 0.44 r/min, and the average relative error was no more than 3.56%; the accuracy of seeding rate detection was no less than 98.50%; the results of the field test showed that in the operating speed range of 0 ~ 15 km/h, the average relative error of operating speed detection was 4.42%; above 6 km/h three rows of monomer seeding depth detection average, standard deviation, coefficient of variation were 2.70% ~7.53%, 4.03 ~7.72 mm and 13.99% ~17.42%, respectively; downforce static detection test showed that the average difference between the two groups of monomer downforce was close to the actual value of the difference, the relative error was no more than 5.93%, at the low speed of 3 ~6 km/h and 12 ~15 km/h high speed operation, the maximum relative error between the average difference of the two groups of monobloc lower pressure and the actual value detected by the system was 14.91% and 19.30%, respectively.

Key words: corn; electric drive; precision seeder; operating condition parameters; detection systems

0 引言

随着智能农机装备快速发展,播种机正向大型化、集成化、智能化方向快速推进[1-2],电驱化是播种机未来发展的重要方向[3]。稳定可靠的电驱播种机作业性能直接影响播种作业效率与质量[4],相对地轮驱动播种机,电驱播种机增加了大量传感、控制与执行器件,准确获取播种机各部件参数,对于加速电驱播种技术发展至关重要。目前,我国缺乏与电驱播种技术发展速度匹配的播种机工况检测技术,无法支撑高性能播种机快速产业化。因此,开发适用于玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统十分必要[5-6]。

近年来,国内外在农机参数检测方面已有较多研究,实现了对拖拉机、收获机等机具整机参数系统检测。WATTS 等[7]采用多种传感器实现了拖拉机前进速度、三点悬挂受力、PTO 扭矩与燃油消耗等信号的动态采集,并通过遥测线路传输给车载计算机进行处理与记录。SINGH 等[8]采用 CR3000 - XT 设计了一套拖拉机深耕作业工况参数检测系统,通过检测和记录作业速度、滑移率、耕作深度、油耗等参数,验证检测系统准确性并分析拖拉机深耕作业性能。王宏伟等[9]采用多传感器融合方式同步采集拖拉机作业速度、前后桥振动、驱动轮加速度和悬挂机构拉压力等参数,并通过蓝牙模块与无线触摸屏实现了对拖拉机田间作业参数远程监测。徐立章等[10]针对履带式谷物联合收获机发动机,采用 DH5902 型动态信号分析仪建立了发动机、振动筛、输送槽、风机和脱粒滚筒等部件工况参数检测系统,获取了典型工况下关键部件运行数据,并分析了各部件运行状态对机身稳定性的影响,为优化驾驶座椅减振结构,提升舒适性与工作可靠性提供决策参考。陈志等[11]在有限元分析基础上,采用粘贴应变片建立玉米收获机底盘应力测试系统,并对田间道路下底盘支撑部件受力情况及动态载荷特征进行了分析,提出了一种玉米收获机底盘车架疲劳寿命预测方法。英国 Massey Ferguson[12]、德国 CLAAS[13-14]、美国 CNH[15]、日本久保田[12]等知名厂家均针对自产拖拉机、收获机设计了相应的数据采集系统,并取得良好的应用效果。

但国内外缺乏对电驱精量播种机多工况参数检测研究,仅对单一参数搭建检测系统(如作业速度、电机转速、气压、播种深度、下压力、粒距等)[16-22],未能实现播种作业多种工况参数实时同步采集,且检测通道数量固定,灵活性、拓展性较差。

本文对电驱播种机不同检测参数所需传感器进行选型,构建传感器-检测参数模型,开发信号同步采集、处理及交互程序,设计基于 cDAQ 控制器的玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统,为全面评估玉米电驱精量播种机作业性能、优化整机方案和提升机具可靠性提供决策参考。

1 检测系统设计

1.1 检测系统总体方案

针对玉米电驱精量播种机实际作业工况,参照 GB/T 697—2005《单粒(精密)播种机试验方法》与文献[17-23]选取作业速度、机具位置、排种量、播种深度、下压力、排种盘转速、风压、单体振动作为玉

米电驱精量播种机关键作业工况参数设计检测系统。

检测系统总体方案如图 1 所示，硬件部分主要由传感器、数据量采集控制器、显示终端与供电设备组成。传感器包括速度定位检测传感器、排种盘转速传感器、排种检测传感器、播种深度检测传感器、下压力检测传感器、风压检测传感器、机身振动检测传感器。检测系统工作时，传感器采集对应播种机部件作业工况信号，传感器信号传递给数据采集控制器，数据采集控制器再将信号传递给显示终端，显示终端负责信号处理与人机交互。检测系统由拖拉机蓄电池(12 V)直接给传感器供电，并采用升压模块将蓄电池 12 V 电压转换为 220 V 电压，为数据采集控制器与显示终端供电。



图 1　检测系统总体方案

Fig. 1　General scheme of test system

1.2　检测系统硬件设计

1.2.1　传感器选型与设计

(1)播种深度检测传感器

适宜一致的播种深度可以提高出苗整齐度，发挥群体增产优势[24-25]，播种深度是评估播种机地面仿形性能的关键[26]。

设计的播种深度检测传感器原理如图 2a 所示，根据播种单体同位仿形结构特点，通过检测限深轮作业过程中的摆动角，计算开沟器底部与限深轮底部相对距离，以开沟深度等效播种深度[25]。如图 2a 所示播种深度为

$$D = L + R_k - L_b\sin\alpha - R_x \tag{1}$$

式中　D——播种深度，mm

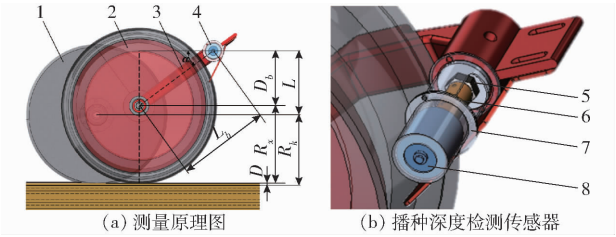
L_b——限深轮摆臂长度，mm

R_k——开沟器半径，mm

R_x——限深轮半径，mm

L——开沟器圆心距限深轮铰接点高度，mm

α——限深轮摆臂与单体架夹角，(°)



(a) 测量原理图　　(b) 播种深度检测传感器

图 2　播种深度检测原理图

Fig. 2　Principle diagrams of sowing depth measurement

1. 开沟器　2. 限深轮　3. 限深轮摆臂　4. 播种深度检测传感器　5. 连接螺栓　6. 联轴器　7. 保护套　8. 转角测量仪

基于播种深度检测原理，设计播种深度检测传感器如图 2b 所示，主要包括保护套、转角测量仪、联轴器和连接螺栓。其中，转角测量仪选用深圳米朗科技公司的 WOA－H－90－V1 型霍尔转角测量仪。

由于转角测量仪安装过程中存在偏差且初始角未知，因此，系统存在检测误差。为提高播种深度检测精度，开展了单体播种深度标定试验。

手动旋转播深调节机构改变限深轮臂摆动上限位，通过支撑架支撑两侧限深轮至上限位，记录此时转角测量仪信号值。使用游标卡尺测量限深轮底部与开沟器底部距离作为播种深度检测值。缓慢降低播种单体，多次测量播种深度检测值与转角测量仪信号值，对实测数据进行拟合，获取各行播种深度检测值与转角测量仪信号值对应关系模型，结果如表 1 所示。其中，x 为转角测量仪信号值，mV；y 为播深检测值，mm。

表 1　播种深度测量模型

Tab. 1　Measurement models of sowing depth

行序号	拟合模型	x/mV	R^2
3	$y = 0.066\,2x + 3.927$	132 ~ 1 150	0.997 3
4	$y = 0.065\,9x + 4.058$	167 ~ 1 293	0.998 2
5	$y = 0.066\,1x + 3.723$	123 ~ 1 290	0.993 2

(2)下压力检测传感器

播种下压力反映限深轮与土壤互作情况，稳定的下压力可在保持播种深度一致性的基础上，避免种沟侧壁过度压实，促进种子发育[21]。检测系统下压力检测传感器选用蚌埠众诚传感器有限公司的 ZHZX－N18 型轴销传感器，实时检测播种下压力，检测系统下压力检测原理如图 3 所示，以轴销传感器代替限深销轴，以销轴压力-下压力关系模型计算限深轮对地下压力[27]。

玉米适宜播深一般不超过 50 mm[28]，在该播种深度下借助电子秤进行下压力标定试验。试验中，将电子秤置于播种单体下方，缓慢放下单体，当限深轮摆臂与限深块接触且下压力检测传感器输出电压

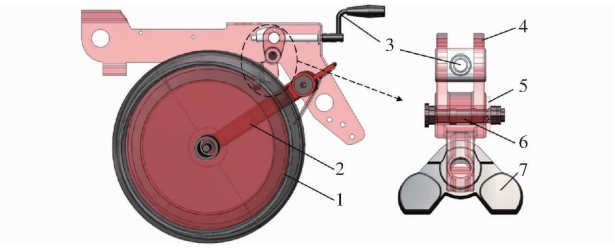


图 3 下压力检测原理图

Fig. 3 Principle diagram of downforce measurement

1. 限深轮 2. 限深轮摆臂 3. 播深调节机构 4. 机架 5. 传感器固定片 6. 轴销传感器 7. 限深块

值从 0 变为较小正值时,记录下压力检测传感器信号值与电子秤显示值。缓慢放下播种单体并记录数据,当单体重量完全施加在支撑架上即电子秤数值不再变动时结束标定。对实测数据进行拟合,得到 3 个单体下压力与下压力检测传感器输出电压对应关系模型,结果如表 2 所示。其中,z 为下压力检测传感器信号值,mV;f 为下压力检测值,N。

表 2 下压力测量模型

Tab. 2 Measurement models of downforce

行序号	拟合模型	z/mV	R^2
3	$f=1.28z-187.26$	179 ~ 1 475	0.998 7
4	$f=1.34z-242.31$	189 ~ 1 362	0.998 4
5	$f=1.37z-289.72$	237 ~ 1 402	0.996 5

(3)机身振动检测传感器

随着前进速度增加,机身垂直方向上振动加速度增大导致籽粒落种点更加离散、逐渐远离投种初始位置[28],影响播种质量。检测系统中机身振动检测传感器选用上海澄科电子科技有限公司的垂直单轴压电式 CT-1010LC 型加速度传感器。机身振动检测传感器为 IEPE 型传感器,具有响应速度快、频响范围宽的特点。机身振动检测传感器内部主要由压电陶瓷和电荷放大器组成,压电陶瓷在受到机械振动时会发生微小形变,影响其内晶格结构对称性,导致电荷极化,产生感应电场。感应电场被电荷放大器所感知并放大,最终输出电压信号,检测系统通过电压信号变化反映机身振动情况。

在播种机作业时,相对于前后、左右方向,垂直于地面方向的振动强度最为剧烈,是排种器田间振动激励的主要来源。机身振动检测传感器采用磁吸方式安装在排种器固定横梁上,使其与排种器垂直振动特性保持一致。

(4)作业速度与机具位置检测传感器

作业速度与机具位置检测传感器选用农芯科技(北京)有限责任公司生产的 AMG_PFZ202 型 GNSS 接收机。检测系统作业时,获取 RTK 模式下播种机作业速度与位置信息[17]。

(5)排种盘转速检测传感器

电驱精量排种控制系统通过 CAN 总线实现内部数据通讯,排种盘驱动电机以标准帧格式将电机转速信息发送至 CAN 总线。因此,检测系统通过电机控制器模拟排种盘转速检测传感器,直接接收并解析 CAN 总线电机转速信号,结合驱动电机减速比可获取当前排种盘转速。

(6)排种量检测传感器

排种量检测传感器选用国产播种机常用的常州怀玉电子有限公司 HY-1900 型对射式光电传感器。将排种量检测传感器安装在排种器投种口处,排种时,检测系统通过采集排种量检测传感器电压信号变化,对种子进行准确检测。

(7)风压检测传感器

不稳定的风压容易造成漏播、重播现象,对播种质量有直接影响[29-31]。检测系统风压检测传感器选用浙江力夫传感器有限公司 LMF108 型微压差传感器,检测排种器进气口处风压,作为排种器工作风压。传感器安装方案如图 4 所示,所选传感器及其特性如表 3 所示。



图 4 传感器安装示意图

Fig. 4 Sensors installation schematic

1.2.2 数据采集控制器选型

数据采集控制器是检测系统核心,负责根据参数检测要求,接收并处理传感器信号,并同步传递给显示终端。为实现玉米电驱精量播种机高速作业时多参数的同步检测,检测系统所选数据采集控制器应具备以下特性:①多通道输入:具有多个输入通道,满足多参数检测需求。②高采样频率:支持高频数据采样,实现对高速作业时各参数变化的准确捕获。③实时、同步性:具备多通道实时、同步数据采集和处理能力,即时响应参数变化,避免数据错位或混乱。④可靠性:对田间振动干扰、高温、灰尘等恶劣条件有较强适应性。⑤灵活性:具有灵活的配置选项和扩展性,以适应不同的应用场景和需求。

表 3　传感器选型及特性

Tab. 3　Sensors selection and characteristics

参数	传感器类型	型号	特性	输出方式
播种深度	转角测量仪	WOA－H－90－V1	12 V 供电，量程 0°～90°，精度 0.01°	模拟电压信号
下压力	轴销传感器	ZHZX－N18	12 V 供电，量程 0～6 000 N，精度 6 N	模拟电压信号
排种量	光电传感器	HY－1900	12 V 供电，最大电流 40 mA，NPN 型	模拟电压信号
风压	微压差传感器	LFM108	12 V 供电，量程 ±15 kPa，精度 15 Pa	模拟电压信号
振动	加速度传感器	CT－1010LC	量程 0～50 g，精度 0.01 g，单轴向	模拟电压信号
速度、位置	GNSS 系统	AMG_PFZ202	12 V 供电，GPRMC 语句，频率 10 Hz	串口信号

检测系统选择 cDAQ 设备作为数据采集控制器，由采集控制主机和相应的信号采集模块组成，采集控制主机与采集模块特性如表 4 所示。其中，NI－cDAQ 9189 机箱作为采集控制主机，具有 8 个数据采集模块接口，支持 24 位分辨率与采样频率 250 kHz，能够有效提升检测效率；其内部时钟源能够为每个信号输入通道提供同一个时钟信号，同步采集每个输入通道数据，保证检测系统实时性与同步性。信号采集模块包括：NI－9205 电压采集模块、NI－9234 振动采集模块、NI－9401 数字处理模块、NI－9862 CAN 通讯模块，为不同类型传感器信号提供独立的传输通道，避免内部信号间相互影响，保证信号采集准确性。

表 4　数据采集控制主机与采集模块特性

Tab. 4　Characteristics of data acquisition control host and modules

设备	特性
NI－cDAQ 9189 机箱	8 插槽；板载触发；工作温度 －40～70℃
NI－9205 电压采集模块	32 通道；最大采样率 250 kS/s；输入范围 ±10 V
NI－9234 振动采集模块	4 通道；最大采样率 51.2 kS/s；输入范围 ±5 V
NI－9401 数字处理模块	8 通道；最大更新率 100 ns；逻辑电平 5 V TTL
NI－9862 CAN 通讯模块	单端口；最大通信速率 1 Mb/s

检测系统通讯架构如图 5 所示，系统运行时，转角测量仪、轴销传感器、微压差传感器输出的模拟电压信号，由 NI－9205 电压采集模块实现信号采集；振动加速度传感器选用 NI－9234 振动采集模块直接供电并传输信号；通过调用 NI－9401 数字处理模块内部计数器记录排种检测传感器电平信号触发数量，以达到排种量检测目的；可通过 NI－9862 CAN 通讯模块，从电驱精量排种控制系统的 CAN 总线中间接获取排种盘转速。在该总线中，每个排种电机控制器回传电机转速。因此，检测系统结合电机转速与减速比，即可计算出排种盘的转速；GNSS 系统与 NI－cDAQ 9189 机箱通过机箱自带 VISA 串口进行通讯。

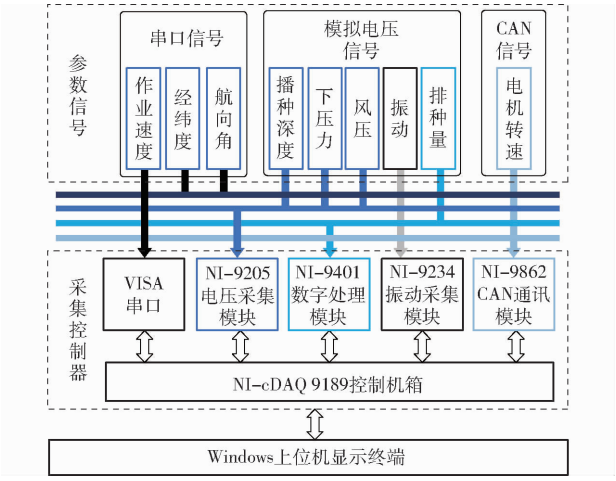


图 5　检测系统通讯架构

Fig. 5　Detection system communication architecture

该数据采集控制器采集模拟电压信号最大绝对误差为 0.03 V，以频率 100 Hz 采集 CAN 信号与串口信号时丢包率分别为 0.001 4%、0.03%[9]，满足检测系统对图 5 中 3 种信号检测需求。

1.3　检测系统软件设计

检测系统上位机软件基于 LabVIEW 平台进行开发设计。检测软件主要包括信号处理程序与人机交互界面两部分。

1.3.1　信号处理程序

为提升系统检测数据准确性与数据管理功能。检测系统信号处理程序将按照以下流程进行详细设计。对应信号处理流程如图 6 所示。

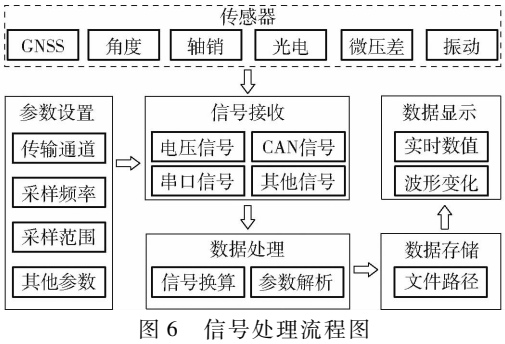


图 6　信号处理流程图

Fig. 6　Signal processing procedure

(1)参数设置：对不同类型的信号分别设置传输通道、采样频率、波特率、存储路径等参数。

(2)信号接收:连续接收来自不同类型的传感器信号,包括模拟信号、CAN 信号和串口信号。

(3)数据处理:对通过 CAN 总线、串口等通讯方式发送的 16 进制或字符串数据进行实时解算,自动获取目标数据。

(4)数据存储:将数据以二进制 TDMS 文件形式保存至用户指定的文件路径中,确保数据安全与完整性。

(5)数据显示:将采集到的数据以数值与波形两种形式进行实时显示。

在检测系统软件设计时,信号处理方法为:

(1)数据采集控制器通过以太网口与上位机进行数据交互。因此,在 LabVIEW 程序对网络连接进行配置,选择上位机作为时钟源,为检测系统提供稳定的时钟信号,保证同步性。

(2)将单个信号处理程序置于独立的采样循环中,为不同信号采样频率、换算解析、存储路径与显示模式进行单独配置,保证检测系统内部信号之间互不影响。

(3)为所有信号采集循环设置统一的软件触发器,避免检测系统对每一个采样过程进行频繁的查询操作,从而减少系统开销,提高响应速度与检测效率。

1.3.2 人机交互界面

以软件功能完整性和操作灵活性为原则设计人机交互界面[32-33],如图 7 所示。人机交互界面分为采集参数设置区、系统选项区和数据监控窗口。用户可根据需求在参数设置区对采集起始时间、信号传输通道、采集频率等进行灵活设置;在系统选项区对检测系统运行、记录和存储路径等进行设置;在数据监视窗口,用户可通过数值与波形两种形式对检测数据进行实时监控。

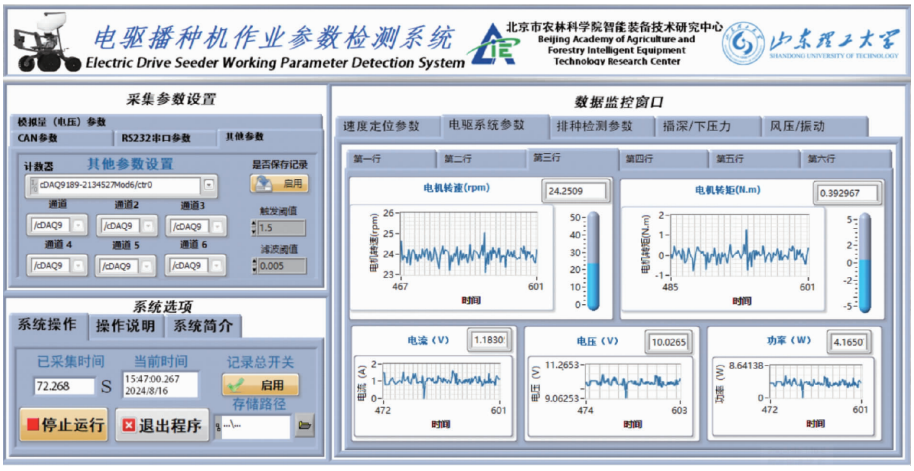


图 7 人机交互界面

Fig. 7 Human-machine interaction interface

2 典型参数验证试验

为验证作业参数检测系统准确性,开展了典型参数检测试验。典型参数检测试验分台架试验和田间试验两部分。由于排种盘转速与排种量真实值难以在田间试验中获取,因此,开展台架试验用于验证排种量、排种盘转速检测性能;田间试验则用于验证作业速度、播种深度和下压力的检测性能。

2.1 台架试验

2.1.1 排种盘转速检测试验

排种盘转速检测试验通过 GPS Simulator 软件模拟 GNSS 信号,作为电驱排种速度传输至电驱精量播种系统终端,驱动排种盘转动,模拟实际播种作业。

玉米播种作业粒距为 20 cm,速度 0 ~ 15 km/h 分为 3、6、9、12、15 km/h 5 个水平[19]。

试验采用 testo 470 型手持转速测量仪检测值(量程:0.01 ~ 19 999 r/min,精度:±0.01 r/min)作为真实值,与检测系统排种盘转速检测值进行对比。

2.1.2 排种量检测试验

排种量检测试验设备如图 8 所示,主要包括播种单体、排种电机、排种检测传感器、12 V 电源、数据采集控制器、检测系统上位机。试验在各因素水平下进行,每次排种量不小于 300 粒,测试结束后人工数种,获取真实值,与检测系统排种量检测值进行对比。每个因素水平下重复 3 次。

2.2 田间试验

田间试验以凯斯 2014 型拖拉机-大华宝来 2BMYFQ-6D 型气吸式精量电驱播种机机组为对象,分别开展作业速度、播种深度检测和下压力检测验证试验。

2.2.1 作业速度检测试验

该试验以拖拉机 CAN 总线上的轮速瞬时值为参考,验证检测系统作业速度检测性能。为减小拖

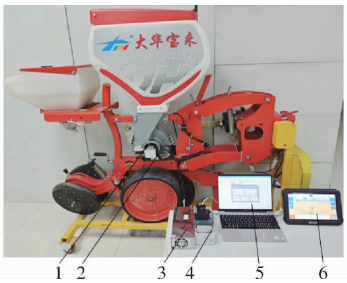


图 8　排种量检测试验

Fig. 8　Seeding rate detection test

1. 排种电机　2. 排种检测传感器　3. 12 V 电源　4. 数据采集控制器　5. 检测系统上位机　6. 电驱播种系统终端

拉机驱动轮与地面间的滑转率，选取 450 m × 6 m 的水泥路面作为测试路面。水泥路面较平坦，可以认为水泥路面上驱动轮与地面之间滑转率为 0[9]。参照拖拉机实际播种作业中的行驶状态，选取 0 ~ 15 km/h 加速、15 km/h 匀速、15 ~ 0 km/h 减速 3 种行驶状态，进行作业速度检测试验，每种状态试验距离为 150 m。试验后，对比系统检测值与轮速瞬时值。

2.2.2　播深检测试验

为了验证检测系统播深检测准确性，开展了播深检测田间试验（图 9）。试验选用长 150 m、宽 30 m 的旋耕地块。作业速度选取 3、6、9、12、15 km/h。为简化试验，提起播种单体覆土轮，以开沟深度等效播深[26]。试验前，调整播深调节机构，保持播种单体播深在 40 mm 左右。



图 9　播种深度检测

Fig. 9　Sowing depth detection test

为验证检测系统播深检测性能，在试验结束后，随机选取不同车速下某个单体开沟深度进行测量。具体选择 3 km/h 下第 4 行单体、6 km/h 下第 5 行单体、9 km/h 下第 3 行单体、12 km/h 下第 3 行单体和 15 km/h 下第 4 行单体。每组试验下作业长度选取 30 m，间隔 25 cm 进行测量取样。

2.2.3　下压力检测试验

由于实际播种作业过程中地表下压力真实值难以获取。因此，为不同播种单体施加额外载荷，以额外载荷值作为单体间下压力实际差值，对比试验过程中各行单体下压力检测差值与实际差值，验证检测系统下压力检测性能。如图 10 所示，采用约翰迪尔拖拉机 XD01 型标准 47 kg 配重块提供额外载荷，在第 3、4、5 行单体上分别放置 0、1、2 块配种块，即 3 行单体分别施加额外载荷为 0、460.6、921.2 N（重力加速度 g = 9.8 N/kg）。



图 10　下压力检测田间试验

Fig. 10　Downforce detection field test

以各因素水平开展播种试验。在启动车辆前，对机具静止（速度为 0）时下压力进行检测，检测时长为 10 s，作为下压力静态检测试验数据。

在下压力检测田间试验结束后，将 3 个单体下压力系统检测结果分为 2 组，进行下压力检测差值与实际差值对比。为了更直观体现各单体间下压力差值，以第 3 行无配重单体为对照，选择第 3 行、第 4 行单体为第 1 小组，第 3 行、第 5 行单体为第 2 小组，对比分析 2 组内下压力差值检测值与实际值。

3　试验结果与分析

3.1　台架试验

3.1.1　排种盘转速

转速测量仪与检测系统获取的电机转速如图 11

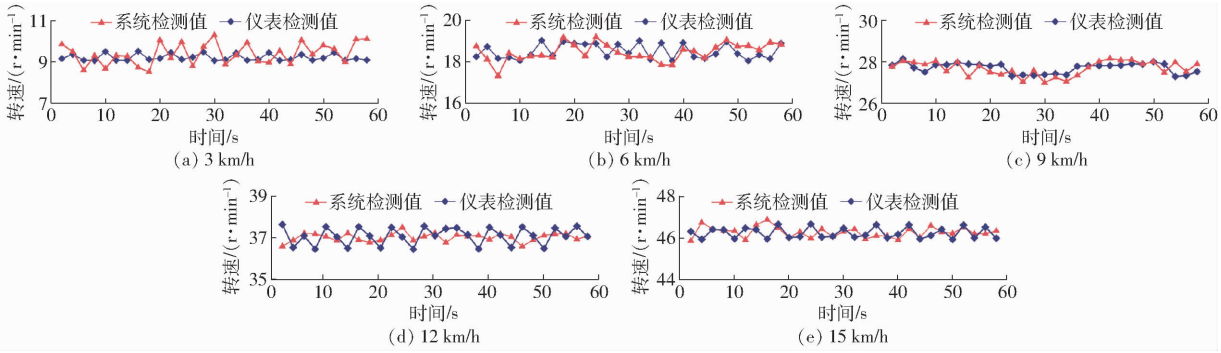


图 11　排种盘转速测试结果

Fig. 11　Seed meter plate rotational speed test results

所示。相比转速仪测量值,5 种速度下检测系统排种盘转速检测绝对误差分别为 0.18、0.33、0.26、0.37、0.44 r/min,总体小于等于 0.44 r/min;平均相对误差分别为 3.56%、1.76%、0.95%、1.03%、0.52%,均不大于 3.56%。

3.1.2 排种量

检测系统排种量检测试验结果如表 5 所示,随着作业速度提升,排种量检测准确率逐渐降低,检测准确率最小为 98.50%,平均准确率为 99.48%,标准差为 0.50%。

表 5 排种量测试结果

Tab.5 Seeding rate test results

作业速度/(km·h^{-1})	检测值/粒	实际值/粒	准确率/%
3	311	311	100
	316	316	100
	305	305	100
6	312	314	99.36
	308	309	99.68
	323	323	100
9	330	333	99.10
	313	317	98.74
	302	302	100
12	306	308	99.35
	329	334	98.50
	299	301	99.33
15	323	327	98.78
	314	323	99.68
	317	325	99.06

3.2 田间试验

3.2.1 作业速度

检测系统作业速度检测值与拖拉机驱动轮轮速瞬时值对比结果如图 12 所示。拖拉机在 0 ~ 15 km/h 范围内以加速、匀速、减速行驶时,拖拉机轮速瞬时值与系统检测值之间的平均相对误差分别为 4.93%、3.19%、4.01%,总体平均相对误差为 4.42%。

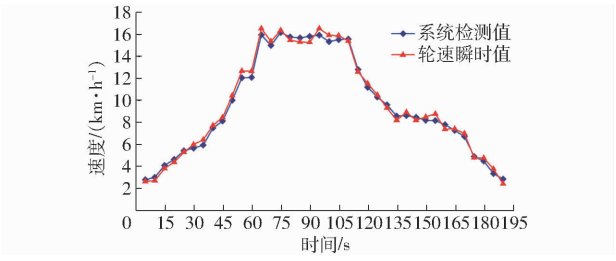


图 12 作业速度测试结果

Fig. 12 Speed test results

3.2.2 播种深度

根据不同速度下对应单体播种深度系统检测值与田间实际值,得到播种深度箱型图如图 13 所示[25]。从图 13 可以看出,相比系统检测值,实际测量获得数值波动更大,可能与种沟完整程度以及人为测量误差有关。观测数据中位数可知,不同检测方式下得到的结果相近,最大差值为 3.72 mm。表明系统检测值与实际值整体上存在相同的中心趋势。

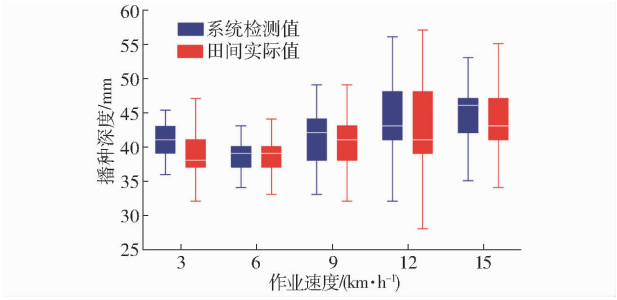


图 13 不同车速下播种深度箱型图

Fig. 13 Sowing depth boxplot at different speeds

对系统检测值与田间实际值数据的统计处理结果如表 6 所示。对比 2 种方式,当车速为 3 km/h 时,系统检测播种深度标准差、变异系数相对田间测量误差显著大于其他速度下相对误差,原因为人工测量不稳定性带来的播深参照值波动,造成测量值出现较大误差。当作业速度为 6 ~ 15 km/h 时,系统检测播种深度平均值、标准差、变异系数最大值分别为 44.12 mm、5.18 mm、11.80%;3 种评价指标相对误差为 2.70% ~ 7.53%、10.07% ~ 19.29%、13.99% ~ 17.42%。

表 6 播种深度田间试验结果

Tab.6 Sowing depth field test results

参数	评价方式	作业速度/(km·h^{-1})				
		3	6	9	12	15
平均值	系统检测值/mm	41.58	39.01	42.53	43.92	44.12
	田间检测值/mm	38.70	37.85	40.76	41.97	41.03
	相对误差/%	7.44	2.70	4.34	4.65	7.53
标准差	系统检测值/mm	2.19	2.31	3.21	5.18	4.71
	田间检测值/mm	2.96	2.85	3.64	5.76	5.42
	相对误差/%	26.56	19.29	11.81	10.07	13.10
变异系数	系统检测值/%	5.37	5.97	7.55	11.80	11.02
	田间检测值/%	7.52	7.23	8.94	13.72	13.21
	相对误差/%	28.59	17.42	15.55	13.99	16.58

3.2.3 下压力

对两组组单体下压力差值统计处理结果如表 7 所示。静态试验下两组单体下压力平均差值接近实际差值,相对误差分别为 5.34% 和 5.93%。随着速度提高,相对于实际值,2 组单体下压力平均差值相对误差总体呈上升趋势。当作业速度为 3 ~ 6 km/h 时,系统检测两组单体下压力平均差值与实际值相对误差不大于 14.19%;当作业速度为 12 ~ 15 km/h 时,系统检测两组单体下压力平均差值与实际值的相对误差不大于 19.30%。考虑到单体结构与地块

表 7　下压力差值田间试验结果

Tab.7　Downforce field test results

分组	评价方式	作业速度/(km·h⁻¹)					
		0	3	6	9	12	15
第 1 组	检测值/N	485.2 ± 25.6	518.8 ± 328.3	525.9 ± 294.0	539.2 ± 376.6	549.5 ± 377.0	544.4 ± 285.5
	实际值/N	460.6	460.6	460.6	460.6	460.6	460.6
	相对误差/%	5.34	12.64	14.19	17.80	19.30	18.19
第 2 组	检测值/N	975.9 ± 32.9	997.9 ± 264.0	1 009.6 ± 298.2	1 065.2 ± 284.1	1 077.3 ± 261.4	1 086.8 ± 437.6
	实际值/N	921.2	921.2	921.2	921.2	921.2	921.2
	相对误差/%	5.93	8.32	9.60	15.65	16.96	17.97

差异，检测结果总体满足下压力检测需求。

4　结论

（1）设计了一套玉米电驱播种机作业工况参数系统。该系统能够实现作业速度、机具位置、排种量、播种深度、下压力、排种盘转速、风压、单体振动等工况参数的实时同步采集。

（2）基于 LabVIEW 软件平台设计了信号处理程序与人机交互界面，避免了系统内部信号相互影响，提高了系统同步性与检测效率，实现了检测参数在数值与波形两种形式下的实时监控。

（3）对系统开展了排种盘转速、排种量检测台架试验与作业速度、播种深度检测和下压力检测田间试验。台架试验结果表明，排种盘转速检测平均绝对误差总体不大于 0.44 r/min，平均相对误差均不大于 3.56%；排种量检测准确率不小于 98.50%。田间试验结果显示，系统作业速度检测值平均相对误差为 4.42%；当作业速度为 0 ~ 15 km/h 时，系统检测播种深度平均值、标准差和变异系数最大值分别为 44.12 mm、5.18 mm、11.80%；3 种评价指标相对误差为 2.70% ~ 7.53%、10.07% ~ 19.29%、13.99% ~ 17.42%；下压力静态检测试验中，2 组单体下压力平均差值接近实际差值，相对误差不大于 5.93%，在低速 3 ~ 6 km/h 与高速 12 ~ 15 km/h 作业下，系统检测两组单体下压力平均差值与实际值最大相对误差分别为 14.91% 和 19.30%。台架试验与田间试验结果均满足玉米电驱精量播种机作业工况参数检测需求。

参　考　文　献

[1] 翟长远，杨硕，王秀，等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2022，53(4)：1 - 20.
ZHAI Changyuan，YANG Shuo，WANG Xiu，et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(4)：1 - 20. (in Chinese)

[2] 陈学庚，温浩军，张伟荣，等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文)，2020，2(4)：1 - 16.
CHEN Xuegeng，WEN Haojun，ZHANG Weirong，et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture，2020，2(4)：1 - 16. (in Chinese)

[3] 尚书旗，吴秀丰，杨然兵，等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：1 - 20.
SHANG Shuqi，WU Xiufeng，YANG Ranbing，et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(2)：1 - 20. (in Chinese)

[4] 徐立友，赵一荣，赵学平，等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(1)：355 - 363.
XU Liyou，ZHAO Yirong，ZHAO Xueping，et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(1)：355 - 363. (in Chinese)

[5] 钟文军. 基于机联网的拖拉机远程监测系统的设计与实现[D]. 南京：南京农业大学，2018.
ZHONG Wenjun. The design and implementation of a remote monitoring system for tractors based on tractor of internet[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2018. (in Chinese)

[6] LACOUR S，BURGUN C，PERILHON C，et al. A model to assess tractor operational efficiency from bench test data [J]. Journal of Terramechanics，2014，54：1 - 18.

[7] WATTS C W，LONGSTAFF D J. Mobile instrumentation and data processing system for testing field machinery[J]. Journal of Agricultural Engineering Research，1989，43：67 - 76.

[8] SINGH C D，SINGH R C. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field[J]. Journal of Terramechanics，2011，48(5)：333 - 338.

[9] 王宏伟，温昌凯，刘孟楠，等. 拖拉机作业工况参数检测系统研究[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 2)：409 - 416.
WANG Hongwei，WEN Changkai，LIU Mengnan，et al. Tractor operating condition parameter testing system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.2)：409 - 416. (in Chinese)

[10] 徐立章,李耀明,孙朋朋,等. 履带式全喂入水稻联合收获机振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 49 - 55.
XU Lizhang, LI Yaoming, SUN Pengpeng, et al. Vibration measurement and analysis of tracked-whole feeding rice combine harvesters [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 49 - 55. (in Chinese)

[11] 陈志,周林,赵博,等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 19 - 25.
CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 19 - 25. (in Chinese)

[12] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—Part I [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 96 - 104.

[13] 杨宁,钱晔,陈健. 面向联合收割机故障领域的命名实体识别研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 338 - 343.
YANG Ning, QIAN Ye, CHEN Jian. Named entity recognition research for combine harvester fault domain [J]. Journal of Chinese Agricultural Machinery, 2024, 45(8): 338 - 343. (in Chinese)

[14] 陈进,杨广静,徐凯,等. 基于 ARM 的联合收割机远程监测系统设计[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 131 - 135, 141.
CHEN Jin, YANG Guangjing, XU Kai, et al. Design of a remote monitoring system for combine harvesters based on ARM [J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(1): 131 - 135, 141. (in Chinese)

[15] 王海彬,李光林. 小型收割机作业信息监测系统研制[J]. 农机化研究, 2013, 35(11): 88 - 91.
WANG Haibin, LI Guanglin. Development of an operation information monitoring system for small harvesters [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(11): 88 - 91. (in Chinese)

[16] 代冬,陈度,张宾,等. 拖拉机田间作业参数无线检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 568 - 575.
DAI Dong, CHEN Du, ZHANG Bin, et al. Wireless data acquisition system for tractor field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 568 - 575. (in Chinese)

[17] LING L, WU G, WEN C,et al. Influence of speed measurement method on performance of an electric-drive maize precision planter[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 175 - 187.

[18] 杨硕. 玉米电驱排种控制与播种质量监测方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2021.
YANG Shuo. Research on electric drive seed metering control and sowing quality monitoring methods for corn [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[19] 丁启朔,尤勇,邢全道,等. 基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 100 - 107.
DING Qishuo, YOU Yong, XING Quandao, et al. Field bench test of seeding unit based on precise seeding depth control objectives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 100 - 107. (in Chinese)

[20] 付卫强. 玉米免耕精密播种质量控制关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2019.
FU Weiqiang. Research on key technologies for quality control of no-till precision corn planting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[21] 肖跃进,颜丙新,凌琳,等. 基于电机驱动的玉米精量排种控制系统开发与试验[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(2): 52 - 59.
XIAO Yuejin, YAN Bingxin, LING Lin, et al. Design and experiment of motor-driving corn precision planting control system [J]. Tractor and Farm Transporter, 2024, 51(2): 52 - 59. (in Chinese)

[22] 秦伟,王在满,王钰静,等. 气吸式播种机多分支汇流管路气压损失分析与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 1 - 14.
QIN Wei, WANG Zaiman, WANG Yujing, et al. Analysis and experiments of the air pressure loss in multi-branch convergence pipe of air suction seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 1 - 14. (in Chinese)

[23] 桑伢员,贺智涛,姬江涛,等. 智能免耕播种机振动信号采集与分析方法研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(3): 25 - 28.
SANG Yayuan, HE Zhitao, JI Jiangtao, et al. Study on vibration signal acquisition and analysis method of corn no-tillage seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(3): 25 - 28. (in Chinese)

[24] MOLATUDI R L, MARIGA I K. The effect of maize seed size and depth of planting on seedling emergence and seedling vigour [J]. Journal of Applied Science Research, 2009,5(12):2234 - 2237.

[25] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 23 - 32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23 - 32. (in Chinese)

[26] 马若飞,伟利国,赵博,等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 52 - 64.
MA Ruofei, WEI Ligou, ZHAO Bo, et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9):52 - 64. (in Chinese)

[27] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9 - 18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9 - 18. (in Chinese)

[28] 白慧娟,方宪法,王德成,等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 61 - 72.

BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 61 – 72. (in Chinese)

[29] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 15 – 28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 15 – 28. (in Chinese)

[30] 颜丙新,付卫强,武广伟,等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 44 – 54.
YAN Bingxin, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 44 – 54. (in Chinese)

[31] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 9 – 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 – 20. (in Chinese)

[32] 姜惠,唐小虎,张旭烽,等. 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机运动控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 392 – 403.
JIANG Hui, TANG Xiaohu, ZHANG Xufeng, et al. Motion control of attitude adjustment wheeled tractor in hilly and mountain areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 392 – 403. (in Chinese)

[33] 边明博,马彦鹏,樊意广,等.融合无人机多源传感器的马铃薯叶绿素含量估算[J].农业机械学报,2023,54(8):240 – 248.
BIAN Mingbo, MA Yanpeng, FAN Yiguang, et al. Estimation of potato chlorophyll content based on UAV multi-source sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 240 – 248. (in Chinese)

(上接第 41 页)

[109] RASMUSSEN J, BIBBY B, SCHOU A. Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods[J]. Weed Research, 2008,48(6):523 – 532.

[110] YE S, XUE X, SI S, et al. Design and testing of an elastic comb reciprocating a soybean plant-to-plant seedling avoidance and weeding device[J]. Agriculture, 2023,13(11):2157.

[111] GOBOR Z, LAMMERS P, MARTINOV M. Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: theoretical approach and simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013,98:166 – 174.

[112] DOGHERTY M, GODWIN R, DEDOUSIS A, et al. A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter- and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering, 2007,96(2):169 – 179.

[113] 陈子文, 张春龙, 李南, 等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J]. 农业工程学报, 2015,31(5):1 – 8.
CHEN Ziwen, ZHANG Chunlong, LI Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(5):1 – 8. (in Chinese)

[114] 王文明. 垄作玉米机械除草装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
WANG Wenming. Design and experimental study on mechanical weeding device of the ripple maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[115] PÉREZ-RUÍZ M, SLAUGHTER D, FATHALLAH F, et al. Co-robotic intra-row weed control system[J]. Biosystems Engineering, 2014,126:45 – 55.

[116] 王艳. 高效除草机器人控制系统设计[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
WANG Yan. Researches on the control system for a high-efficient weeding robot[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)

[117] Maya FM2 Bifila-Fardin Macchine[EB/OL]. [2024 – 06 – 26]. https://www.fardinmacchine.com/produzione/maya-fm2-bifila/.