

基于RTK测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统研究

廖庆喜^{1,2} 罗湛程¹ 杨恒¹ 李蒙良¹ 沈文惠¹ 王磊^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油菜精量直播机连续作业过程中设定作业速度条件下, 作业速度波动导致排种量与目标播量不一致的问题, 设计了一种基于“RTK测速 + 落种检测 + 电机实时调控”的油菜精量直播机随速可控可调排种控制系统, 确定了影响调速性能的关键参数, 构建了步进电机调速模型; 运用 GNSSToolKitLite 上位机开展 ZED-F9P GNSS 模块静态速度漂移试验, 得到该模块静态速度漂移量服从均值为 0.054 m/s、方差为 $0.029 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的正态分布。利用自动数粒仪与 JPZS-16 型排种性能试验台进行试验, 得到正负气压组合式排种器转速为 5~60 r/min 时, 落料计数器播种量检测值与实际值平均绝对误差小于 10%; 通过台架试验确定了不同排种器调速模型, 得到不同排种器最佳工作转速、电机转速与目标播量的函数关系。不同排种器随速控制适应性台架试验结果表明: 当作业速度为 3~12 km/h 时, 系统搭载高速机械离心式与油麦兼用气送式排种器总排量稳定性变异系数小于 1.21%。田间试验结果表明: 当作业速度为 5~12 km/h 时, 本系统搭载高速机械离心式与窝眼轮式排种器总排量稳定性变异系数小于 9.7%, 满足随速播种要求, 可为油菜精量播种控制系统结构改进提供参考。

关键词: 油菜直播机; 控制系统; 可控可调; 播量调控; RTK 测速原理

中图分类号: S222.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0065-10

OSID:



Variable-rate Seeding Control System Based on RTK Speed Measurement for Rapeseed Direct Seeder

LIAO Qingxi^{1,2} LUO Zhancheng¹ YANG Heng¹ LI Mengliang¹ SHEN Wenhui¹ WANG Lei^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: A precision rapeseed seeder with continuous operation often faces the problem of inconsistent sowing quantity with the target seeding rate due to fluctuations in operating speed. To address this issue, a control system for precise rapeseed seeder, based on “RTK speed measurement + seed drop detection + real-time motor control,” was designed. Key parameters affecting the speed control performance were analyzed, and a stepper motor speed control model was established. Static speed drift tests were conducted by using the ZED-F9P GNSS module with the GNSSToolKitLite software. The analysis determined that the static speed drift of the module followed a normal distribution with a mean of 0.054 m/s and a variance of $0.029 \text{ m}^2/\text{s}^2$. The performance tests with an automatic seed particle counter and the JPZS-16 seeding performance test bench determined that the average absolute error between the seeding quantity detection value of the positive and negative pressure seeders and the actual value was less than 10% when the rotation speed was ranged from 5 r/min to 60 r/min. The speed control models for different seeders were determined through bench tests, and the functional relationship between the optimal operating speed range of different seeders and the motor speed with the target seeding rate was analyzed. The adaptability bench tests for different seeders demonstrated that when the operating speed was ranged from 3 km/h to 12 km/h, the total displacement coefficient of variation for the system equipped with a high-speed mechanical centrifugal seeder and a combined air-assisted seeder for rapeseed and wheat was less than 1.21%. Field tests showed that when the operating speed was ranged from

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD20004)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CASR-12)

作者简介: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

5 km/h to 12 km/h, the total displacement coefficient of variation for the system equipped with a high-speed mechanical centrifugal seeder and a furrow press wheel seeder was less than 9.7%, meeting the requirements of variable-rate seeding. This system can serve as a reference for improving the structure of precision rapeseed seeding control systems.

Key words: rapeseed direct seeder; control system; controlable and adjustable; seeding rate adjustment; RTK speed measurement

0 引言

采用地轮驱动的油菜排种系统存在传动复杂、调速不便和地轮滑移等问题^[1-4],影响播种机高速作业时排种性能。随着播种智能化发展,电驱播种因控制方便、播种性能优良^[5-8],广泛应用于排种驱动。电驱播种性能与作业速度检测精度、电机响应时间有关,同时电驱系统与排种器适配对播种性能也有明显影响。不同排种器稳定排种差异显著,且拖拉机作业过程中速度存在波动,降低了排种器排种性能。

为实现排种控制系统模块化与兼用性,国内外学者对排种器驱动来源、拖拉机测速方式与播种监测形式开展了相关研究。XIE 等^[9]设计了一种基于激光传感器和无线串口通信的精密播种机播种参数检测系统,该系统在播种机前进速度为 5~10 km/h 时,播种量平均检测误差为 0.5%;HE 等^[10]开发了一种基于 GPS 的转弯补偿系统,解决了播种机转向时播种单元横向速度差异而导致的每行播种不均匀问题,提高了玉米精密播种性能;丁友强等^[11]设计了一种基于 Android 和 CAN 总线的玉米精量播种系统,其将系统集中于播种单体上,播种系统行数可随意拓展,播种参数实时监控,提高了农机作业效率;张春岭等^[12]采用雷达采集播种作业速度,通过编码器采集排种器实时转速,相较于传统排种器,排种合格指数提高 3.63 个百分点;朱龙图等^[13]基于霍尔传感器测速模块获取机具实时速度,并基于油菜机械离心式排种器调控模型动态调节集排器转速;廖庆喜等^[14]采用速度源切换的测速方式,选用低精度 GPS 模块与编码器相结合的方式,编码器与低精度 GPS 模块测速方式切换的临界速度为 3.7 km/h,播量稳定,粒距均匀。综上,电驱播种多采用旋转编码器、卫星定位模块等方式测速,成本较低且响应迅速,但研究匹配不同作业速度、单位面积不同目标播量时调控不同排种器转速范围油菜排种控制系统未见报道。

为满足不同转速范围排种器随速播种的需求,构建单位时间排种量与电机转速调速模型,并通过落料计数器实时监测排量和反馈电机转速,开发随速可控可调排种控制系统。该系统采用 ZED-F9P

GNSS 模块组成 RTK 模式,采集拖拉机作业速度,并通过输入目标播量与株距,计算出排种器理论转速,通过电机自带编码器将实际转速返回 PC 端。将落料计数器置于排种管底端,监测排种器实时播种量。结合播种量与机具前进速度的反馈信息,以动态调节排种器转速。以正负气压组合式、高速机械离心式与油麦兼用气送式排种器为试验对象,开展电驱排种系统控制精度、同步控制性能和田间试验,以期油菜精量直播机电驱排种控制系统设计提供参考。

1 系统总体设计与工作原理

油菜随速可控可调排种系统以单片机为核心处理器,主要包括移动站、基准站、驱动电机、落料计数器等,总体结构如图 1 所示。其中,落料计数器与不同口径的排种管连接,用于检测种子粒数与落种量;测速单元由两个 ZED-F9P GNSS 模块组成 RTK 模

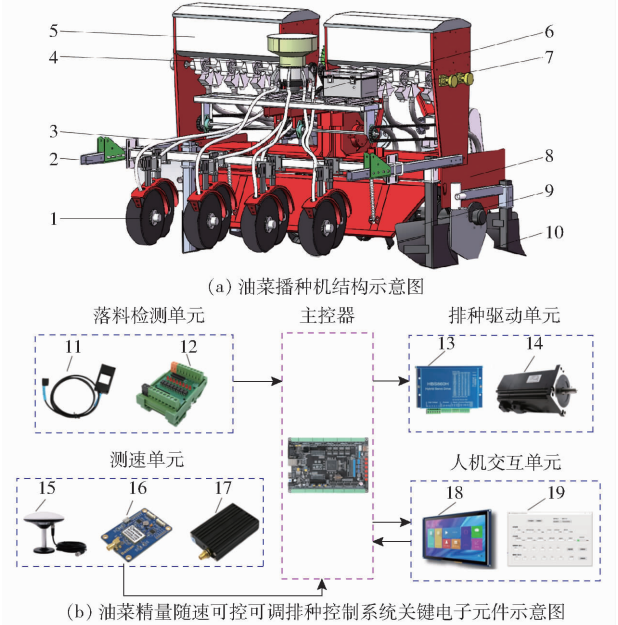


图 1 油菜精量随速可控可调排种控制系统

Fig. 1 Structure diagram of variable-rate seeding control system

1. 双圆盘开沟器 2. 机架 3. 导种管 4. 油菜高速机械离心式排种器 5. 肥箱 6. 驱动电机 7. 控制箱 8. 旋耕装置 9. 开畦沟前犁 10. 开畦沟后犁 11. 落料计数器 12. 光耦隔离模块 13. 步进电机驱动器 14. 86 式步进电机 15. GNSS 接收器 16. ZED-F9P GNSS 模块 17. 无线传输模块 18. PC 端 19. 人机交互界面

式,获取拖拉机前进速度,并通过蓝牙 HC - 12 将信息传入单片机,最后通过 PC 端显示;排种驱动单元由排种器与步进电机构成,使用联轴器驱动不同类型排种器;电源单元由 48 V 电池与 2 个变压器组成,用于给不同电子元件供电;人机交互单元由 PC 端与上位机组成,主要用于监测落种实时情况与拖拉机实时速度。

系统工作时,GNSS 模块获取拖拉机前进速度,并通过调速模型计算出电机所需要的实时转速,将

驱动信号传入电机驱动器,由电机驱动器驱动电机随速转动。选用自带编码器的 86 式步进电机,可实时监测排种轴转速。同时种子通过位于出种口的落料计数器记录电平信号,并通过信号放大器转换为可供单片机识别的计数信号,从而达到监测排种量的目的。无线通信模块分别与控制器和 PC 端相连,按照设计的协议进行数据传输,最终将监测结果显示在 PC 上。系统由一个 48 V 电池通过分压模块给不同的元器件供电,如图 2 所示。

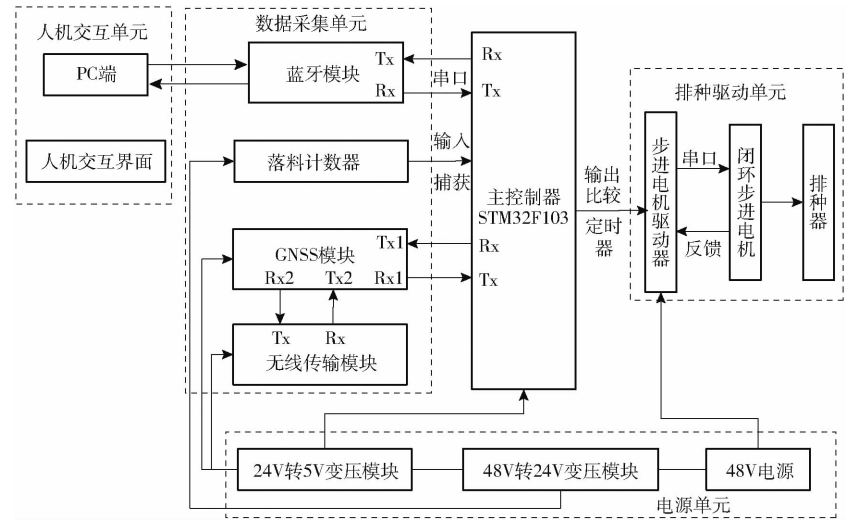


图 2 控制系统硬件框图

Fig. 2 Hardware block diagram of variable-rate seeding control system

2 系统硬件设计

2.1 主控制器

主控制器选用意法半导体公司生产的基于 ARM 架构 32 位 Cortex - M3 内核的 STM32F103ZET6 单片机。该单片机最高倍频可达 72 MHz,拥有 512 K 字节闪存结构、64 K 字节的静态 ARAM。同时内部共有 144 个引脚,其中有 115 个 I/O 口供用户开发利用,拥有多个 USART、DMA、TIM 等接口,满足播量测量、作业速度反馈的传输与处理要求。

2.2 数据采集单元

落料检测单元采用景气科技有限公司生产的方形窗口型落料计数器,最快响应速度为 2 μ s,且可通过主机可调电阻调节检测种子粒径。最小检测种子粒径为 0.1 mm,满足油菜种子检测要求。

测速单元采用北天通讯有限公司生产的 BT - F9PK8 GNSS 模块与 BT - 877 - 433M 小功率无线数传模块构成,GNSS 模块通过 TTL 电平连接主控制器,可直接输出 NEMA 与 RTCM 数据,收敛时间小于 10 s,试验测得测速精度为 0.05 m/s,满足拖拉机最低速度测速要求。

排种控制系统采用广州汇承科技有限公司的蓝

牙 HC - 12 模块,实现 PC 端与主控制器数据传输,可实现 1 000 m 超远距离通信,满足系统通信要求。

2.3 排种驱动单元

排种驱动单元由排种器、86 式步进电机及驱动器、48 V 电源及降压模块组成,如图 3 所示。系统通过电池给外接的落料计数器与电机供电,实时监测播种参数,并将播种参数返回上位机。

3 系统软件设计

控制系统软件主要由主控制器端程序和 PC 端交互程序组成。主控制器端硬件程序基于 Keil uVision5 开发,采用 C 语言编程;PC 端基于 Qt Creator 进行开发,采用 C + + 编程。主控制器端电路图如图 4 所示。

图中 STM32 单片机通过定时器 TIM2 通道 CH2 输出脉冲给步进电机驱动器,并通过驱动器对电机进行转速调控,PA5 与 PB7 分别复用为方向 DIR - 与使能信号 ENA -。TIM3 与 TIM4 的 8 个通道设定为输入捕获模式,通过窗口式落料计数器输出脉冲,经信号放大器输入回单片机,并记录其脉冲上升沿个数,即种子总数。蓝牙 HC - 12 模块与 GNSS 模块由 24 V 转 5 V 变压器供电,UART4 和 USART1 与

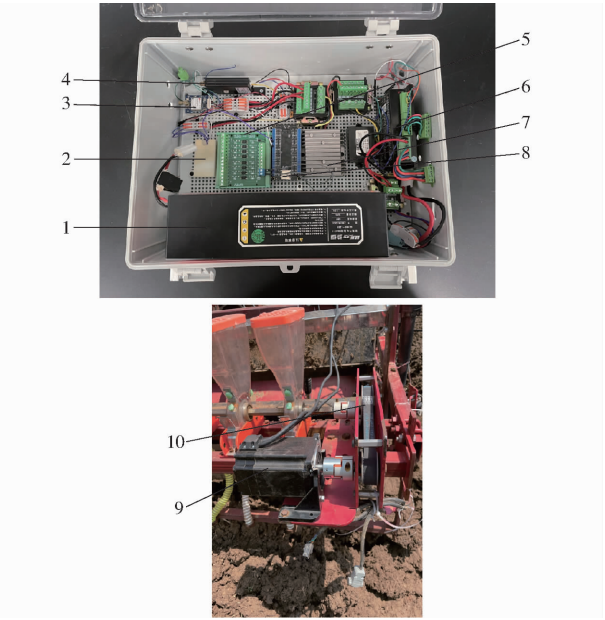


图 3 排种驱动单元

Fig. 3 Seeding drive unit

1. 48 V 电源 2. 蓝牙 HC-12 模块 3. GNSS 模块 4. 无线传输模块 5. 光耦隔离模块 6. DL86 型电机驱动器 7. 24 V 转 5 V 降压模块 8. STM32F103ZET6 单片机 9. 86 步步进电机 10. 2:1 减速器

主控器数据交互。

系统工作时,主程序对 GNSS 模块、无线传输模块、GPIO 接口、DMA、串口等进行初始设置,并将其参数进行重置,如图 5 所示。当用户输入目标播种参数包括播种粒距、型孔数、期望播种量等,定时器中断服务程序启动,调节电机加减速并且通过输入捕获功能来记录种子数。其中, Δt 为两个相邻种子通过窗口式落料计数器使其产生两次上升沿的间隔时间,通过该变量可计算播种机所需实时粒距。可将播种参数实时显示在 PC 上。

3.1 GNSS 模块设计

国内电驱播种作业测速方式有编码器、雷达、GPS、霍尔传感器等。其中,编码器、霍尔传感器为接触式检测,通常检测地轮转速测定机具作业速度,易受外部干扰。基于上述测速模式,开发了一种由两套 GNSS 模块、无线传输模块和 GNSS 接收器组成 RTK 测速模式的测速方式,如图 6 所示。一套作为 GPS 基准站,一套作为 GPS 移动站,移动站通过蓝牙模块将速度信息传输到上位机并实时显示。

本系统核心在于解析 GNSS 模块移动站报文对步进电机转角实时控制。移动站输出的报文带有经纬度和速度信息的字符串,且遵循 NMEA-0183 协议。通过处理 GNVTC 帧中的 sogk 段即可获得拖拉机速度,速度解析流程如图 7 所示。首先进行初始变量声明与软件初始化,主要包括 NEMA 协议报文信息结构体的初始化,然后通过串口将含 GNVTC 帧的 sogk 段解码后的信息传入主控器,经主控器判断是否为标志位,最后确认是否清除缓存信息或重新获取速度信息。

3.2 落料检测单元设计

油菜平均粒径 2 mm,在实际播种^[15-21]过程中难以观察播种情况。本文所设计的落料检测模块由 20 mm × 20 mm 落料计数器与 3D 打印元件组成,以适用于不同口径的排种管,如图 8 所示。窗口内侧装有光束信号发射端与接收端,系统工作时,发射端通过发光二极管发射光束经另一侧镜面反射回接收端的光敏元件上,并输出为高电平。经单片机记录上升沿的次数与时间间隔判断播种情况,如图 9 所示。通过实时接收测速单元速度信号,以计算当前

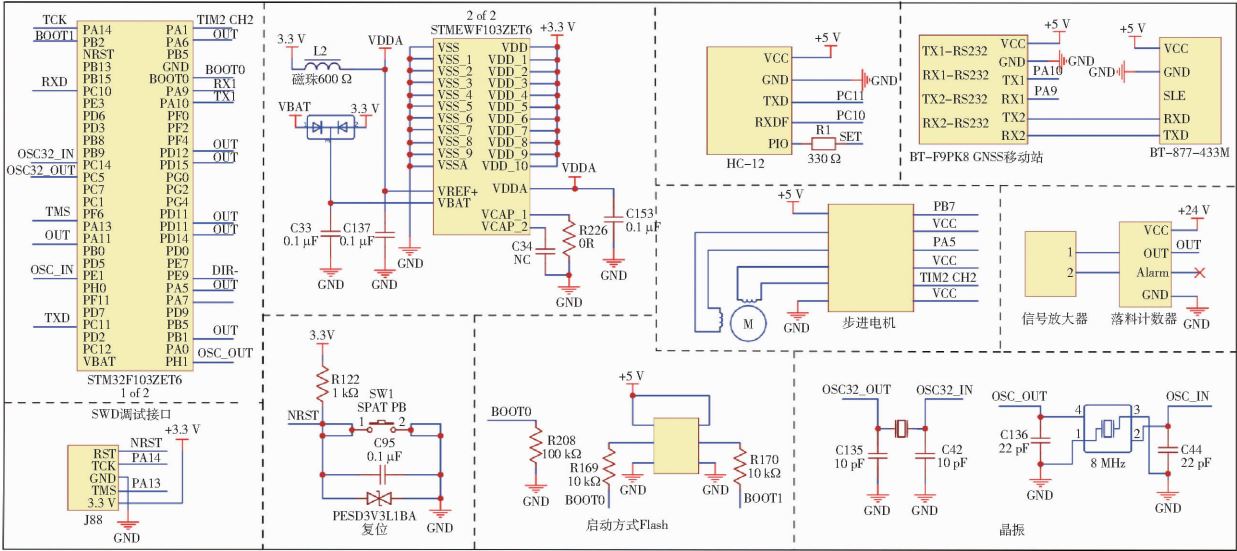


图 4 主控器端电路图

Fig. 4 Schematic of system circuit

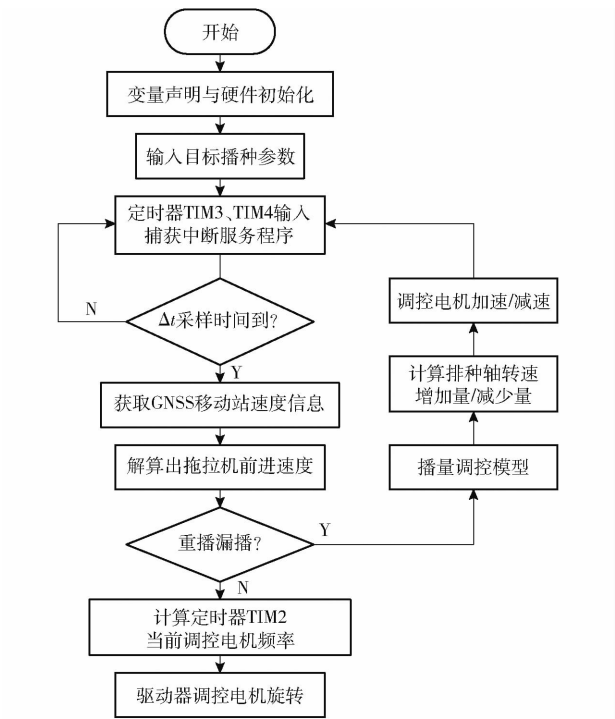


图 5 排种控制系统程序流程图

Fig. 5 Program flow chart of seeding control system

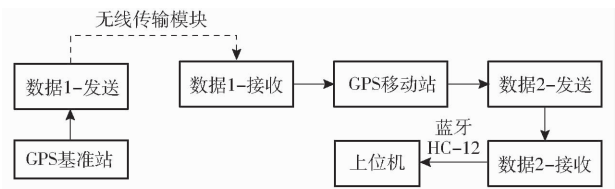


图 6 测速模块工作原理图

Fig. 6 Schematic of velocity measuring module

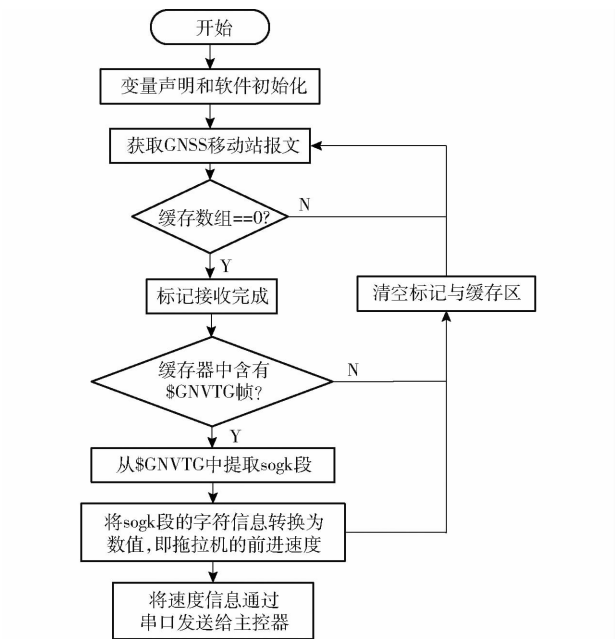


图 7 GNSS 移动站速度解析流程图

Fig. 7 Program flow chart of GNSS mobile station

速度下理论粒距 L ，当 $L \leq 0.5x$ ，可视为种子漏播；当 $0.5x \leq L < 1.5x$ ，可视为种子间距为合格；当 $L >$

$1.5x$ ，可视为种子重播。根据目标粒距分析得出漏播种子数 q ，合格种子数 m ，重播种子数 p ，并计算出重播率、合格率、漏播率作为试验评价指标，并将参数上传到上位机。

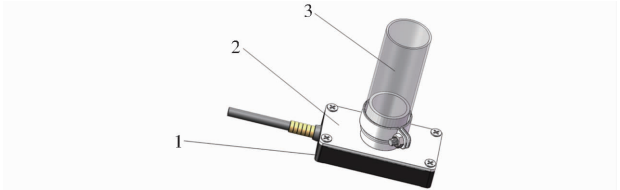


图 8 落料计数器装配示意图

Fig. 8 Blanking counter assembly diagram

1. 落料计数器 2. 3D 打印元件 3. 种管

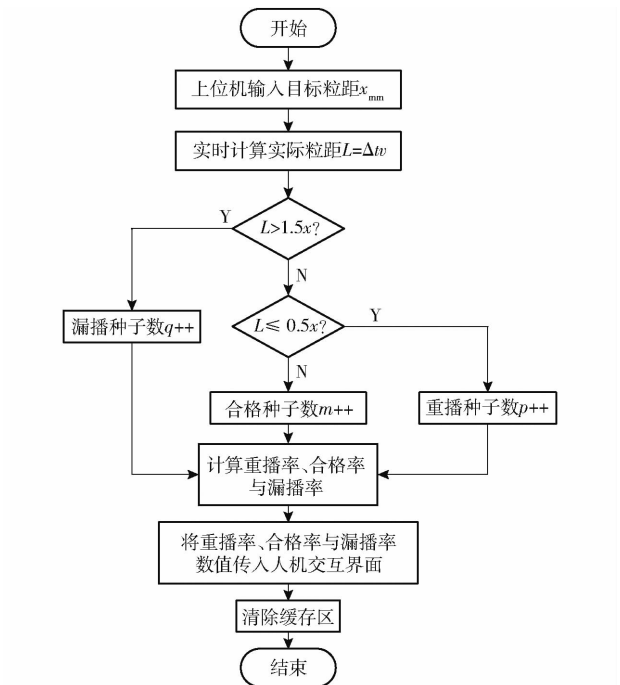


图 9 播种参数监测流程图

Fig. 9 Seeding parameter monitoring strategy

3.3 电机调速模型构建

为实现排种器作业时，电机随速控制，电机与拖拉机速度需满足

$$n = \frac{5\,000v\mu}{3LN} \quad (1)$$

式中 n ——电机转速，r/min

μ ——电机减速比，取 2

N ——排种盘型孔数

v ——播种机作业速度，m/s

通过改变自动重装载寄存器的值，来动态调节电机转速，式(1)可提供不同速度与型孔条件下单片机定时器重装载值。

定时器输出脉冲频率为

$$f = \frac{H_{clk}}{P_{sc}A_{rr}} \quad (2)$$

式中 f ——脉冲频率，Hz

P_{sc} ——定时器预分频值,配置定时器时写入,无法更改

H_{clk} ——定时器时钟频率,不同定时器的时钟频率固定,取 72 MHz

A_{rr} ——定时器重装载值

电机转速和脉冲频率之间的关系式为

$$f = nn_1 n_2 \tag{3}$$

式中 n_1 ——驱动器细分数,通过步进电机驱动器按钮调节,取 16

n_2 ——电机旋转一圈所需步数,取 200

其中,电机转速 n 与定时器的脉冲频率 f 相等,则有

$$A_{rr} = \frac{216LN}{P_{sc} n_1 v} \tag{4}$$

3.4 人机交互单元设计

采用 QT Creator 软件与 C++ 语言开发人机交互单元,其由 PC 端与人机交互界面组成。主要功能是根据用户输入的目标粒距、型孔数、传动比等播种参数,将拖拉机实时速度、电池电量、播种面积、重播率与漏播率等作业参数实时显示在上位机上,如图 10 所示。系统可选择随速播种与定速播种两种不同的播种模式,当选择随速播种模式时,速度源由 GNSS 移动站提供;当选择定速播种模式时,通过输入设置参数栏目“理论转速”,来调节电机定速转动。



图 10 人机交互界面

Fig. 10 Human-computer interaction interface

4 传感器精度标定试验

4.1 GNSS 模块测速精度

由于卫星钟差、接收器钟差等多种信号的影响^[18-20],导致测量的速度具有偏差。为测定系统速度测定精度,收集在开阔地面 GNSS 模块静止状态时速度漂移数据。使用 GNSSToolKitLite 上位机,记录移动站静止时 UI 界面速度数据,样本量为 500,对该样本进行 Kolmogorovl-Smirnov 检验, D_u 最大值为 0.000 3,小于 $D_{u,0.01}$ (0.060 7)。样本中最大值为 0.153 m/s、最小为 0.002 m/s,在 $\alpha = 0.01$ 的条件

下,速度漂移数据可视为服从均值为 0.054 m/s、方差为 0.029 m²/s²的正态分布,结果如图 11 所示。

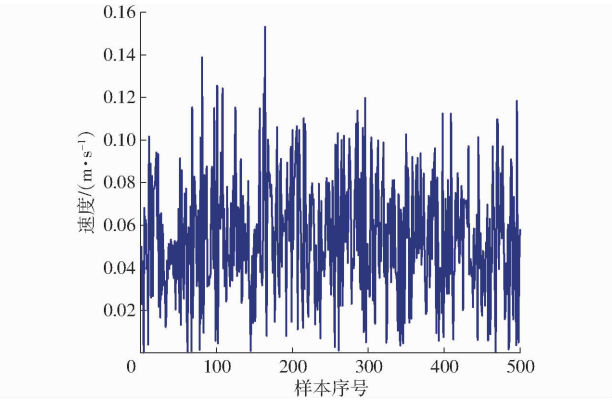


图 11 GNSS 模块速度漂移

Fig. 11 Speed drift of GNSS module

4.2 落料计数器检测精度

为保证种子检测精度,油菜种子在通过传感器时的信号应被采集一次,因此传感器最短响应时间须小于种子经过传感器时间^[15]。种子通过传感器时被采样的约束条件为

$$\Delta t \geq t_a \tag{5}$$

式中 Δt ——种子通过窗口式落料计数器所需时间,s

t_a ——传感器最短响应时间,s

鉴于油菜种子粒径小,不易检测^[22-25],采用落料计数器与光纤放大器作为检测种子元件,以华油杂 62 为试验对象,使用自动数粒仪与 JPZS-16 型排种性能试验台为试验平台,选取播种量与播种合格指数两个指标对落料计数器检测油菜种子性能进行评价。试验前,将落料计数器窗口与 3D 打印零件相连,实现短时间内只允许 1 粒种子通过落料计数器,避免落料计数器重复计数。由图 12 可知,在转速 5~60 r/min 下,播种量检测值与实际值平均绝对误差小于 10%,平均相对误差小于 9%。播种合格指数检测值与 JPZS-16 型排种性能试验台检测值平均绝对误差小于 1.2%,平均相对误差小于 0.8%。

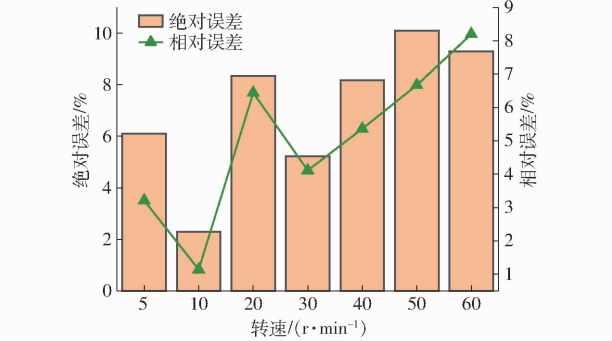


图 12 落料计数器检测误差

Fig. 12 Catch errors of blanking counter

5 台架试验

台架试验在华中农业大学 JPZS-16 型排种性能试验台上进行,通过电子计米器记录传送带的实时速度信息,模拟田间拖拉机加减速情况。

5.1 电机控制试验

为达到标定排种器转速及直播机传动系统传动误差,便于通过程序补偿误差目的;试验选用华中农业大学研制的正负气压组合式排种器作为系统搭载的平台,通过联轴器将排种器排种轴与编码器相连,并通过串口将实时转速显示在 PC 端上。

5.1.1 排种器驱动电机调速精度试验

试验以转速 10.05 ~ 50.74 r/min 重复 6 组试验,并记录试验数据,计算出转速误差 δ_n ,试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,电机实际转速与理论转速平均转速误差为 0.6%,最大转速误差为 0.94%。

表 1 排种器驱动电机转速误差

理论转速/ (r·min ⁻¹)	实际转速/(r·min ⁻¹)						$\delta_n/\%$
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	
10.05	10.11	9.92	9.96	10.00	10.12	9.95	0.51
15.16	14.83	14.94	15.27	15.02	15.15	15.11	0.93
22.74	22.70	22.35	22.53	22.53	22.60	22.61	0.92
25.04	24.91	24.83	25.05	24.93	25.03	25.10	0.45
29.79	29.46	29.80	29.27	29.51	30.01	29.91	0.94
35.27	35.02	35.13	34.99	35.05	35.10	35.30	0.60
40.19	40.02	39.88	40.44	40.11	40.11	40.22	0.18
45.47	45.45	45.40	45.52	45.46	45.30	45.50	0.04
50.74	50.31	50.32	50.29	50.31	50.70	50.85	0.84

5.1.2 电机控制响应时间试验

为测试在电机加减速过程中对排种性能的影响,通过设定电机转动到拖拉机挡位的速度,并通过计算机串口将转速实时数据打印。本次测量系统响应时间,参考前期对雷沃 1004-3B 型拖拉机速度挡位的标定,如表 2 所示。测量过程中拖拉机加速均从 0 加速至目标速度,减速均从目标速度减速至 0,待速度稳定后求取平均值,试验重复 6 次。

表 2 拖拉机挡位速度

拖拉机 挡位	实际速度 N_i						I
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	
慢Ⅱ	3.29	3.19	3.20	3.24	3.21	3.15	3.21
慢Ⅲ	4.26	4.34	4.37	4.37	4.25	4.34	4.32
高Ⅰ	5.98	5.72	5.93	6.07	5.92	5.78	5.90
高Ⅱ	9.87	9.40	9.26	9.73	9.38	9.38	9.55
高Ⅲ	12.31	12.26	11.84	11.92	12.08	11.47	11.98

选取慢Ⅲ到高Ⅲ拖拉机挡位为速度水平,进行电机控制响应时间试验。排种盘型孔数取 50,目标粒距为 80 mm,试验结果如图 13 所示。

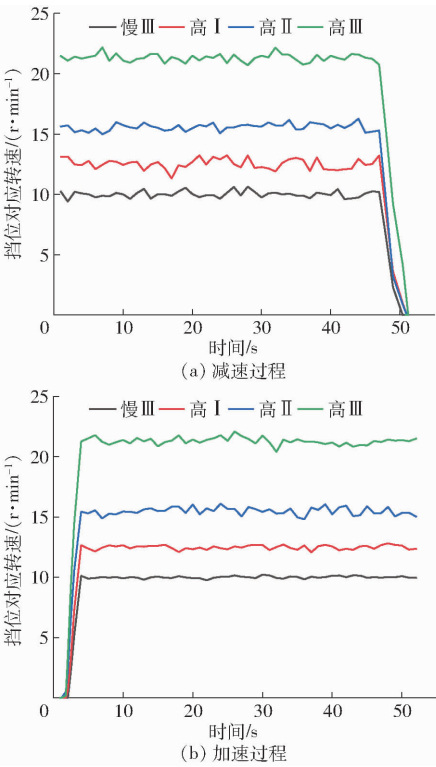


图 13 加减速过程排种电机转速响应曲线

Fig. 13 Speed response curves of seeding discharge motor during acceleration and deceleration

由图 13a 可知,排种电机减速过程中,系统最大平均超调量为 5.29%,最大平均稳态误差为 1.91 r/min。由图 13b 可知,排种电机加速过程中,系统平均超调量为 3.03%,最大平均稳态误差为 1.29 r/min,平均响应时间为 1.2 s。系统加速过程各项指标均优于减速过程,系统对电机加速过程较减速过程控制更为稳定,是由于电机急停造成的。根据长江中下游地区对油菜播种要求,在目标粒距为 80 mm、华油杂 62 千粒质量为 4.7 g 时,油菜理论播量为 3 kg/hm²,理论播量误差为 ±100 g/hm²,满足排种过程中因作业速度波动造成较大转速差条件下对控制系统的精度要求。

5.2 不同排种器随速控制适应性试验

5.2.1 试验方法

以华中农业大学油菜全程机械化团队研制的正负气压组合式^[15]、高速机械离心式^[16]、油麦兼用气送式排种器^[17]为试验对象,选取油菜品种为华油杂 62,利用 JPZS-16 型排种试验台,开展可控可调系统调控排种器兼用性试验,如图 14 所示。试验过程中设定目标粒距为 80 mm,播量为 3 kg/hm²。以相邻两个速度水平作为传送带速度阶跃,测试排种控

制系统随速调控性能。保持对照组与试验组其他变量不变,以粒距合格指数与总排量稳定性变异系数为试验评价指标,通过试验台自带的数粒功能来记录播种信息。由于高速机械离心式、油麦兼用气送式排种器及正负气压组合式排种器排种性能评价指标不同,设置传送带速度为 4.2、5.1、6.6、7.2、9.5、10.4、11.3 km/h 检验高速机械离心式排种器随速调控性能,设置传送带速度为 3.2、6.3、8.6、10.5、12.6 km/h 检验油麦兼用气送式排种器随速调控性能,设置传送带速度为 2.3、3.4、5.7、6.2、7、8.1、9.2、10.8 km/h 检验正负气压组合式排种器随速调控性能。

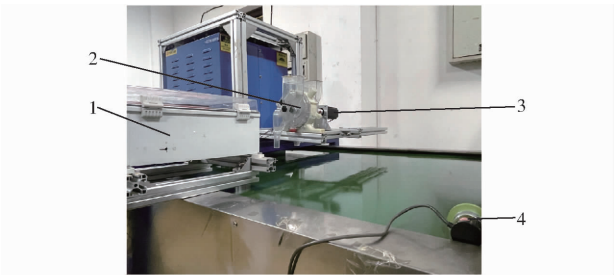


图 14 台架试验配置示意图

Fig. 14 Diagram of bench experiment configuration

1. 控制箱 2. 正负气压式排种器 3. 42 式步进电机 4. 电子计米器

5.2.2 试验结果与分析

依据 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》与《油菜精量直播技术规程》进行数据处理,高速机械离心式与油麦兼用气送式排种器随传送带速度变化试验结果如表 3 所示。

表 3 随速可控可调排种系统台架试验结果

Tab.3 Bench test results of variable-rate seeding control system

排种器 类型	电机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	传送带速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	单次排种 量平均值/ ($\text{g} \cdot \min^{-1}$)	总排量稳 定性变异 系数/%
高速机械 离心式	120 ~ 130	4.2 ~ 5.1	71.39	0.91
	130 ~ 140	5.1 ~ 6.6	79.22	0.73
	140 ~ 150	6.6 ~ 7.2	98.18	0.47
	150 ~ 160	7.2 ~ 9.5	102.65	0.42
	160 ~ 170	9.5 ~ 10.4	119.32	0.55
	170 ~ 180	10.4 ~ 11.3	137.58	0.63
油麦兼用 气送式	10 ~ 15	3.2 ~ 6.3	78.62	1.21
	15 ~ 20	6.3 ~ 8.6	116.37	0.92
	20 ~ 25	8.6 ~ 10.5	168.51	0.89
	25 ~ 30	10.5 ~ 12.6	192.45	0.63

由图 15 可知,当作业速度为 2.3 ~ 8.2 km/h 时,搭载本排种控制系统正负气压组合式排种器播种合格指数大于 82%,当速度大于 8.2 km/h 时,由于正负气压组合式排种器稳定排种转速的影响,导

致重播与漏播种子增加。高速机械离心式与油麦兼用气送式排种器随着作业速度的升高,总排量变异性系数均不断下降,且均低于 1.21%,台架试验表明搭载本排种控制系统的排种器可有效地实现随速精量播种。

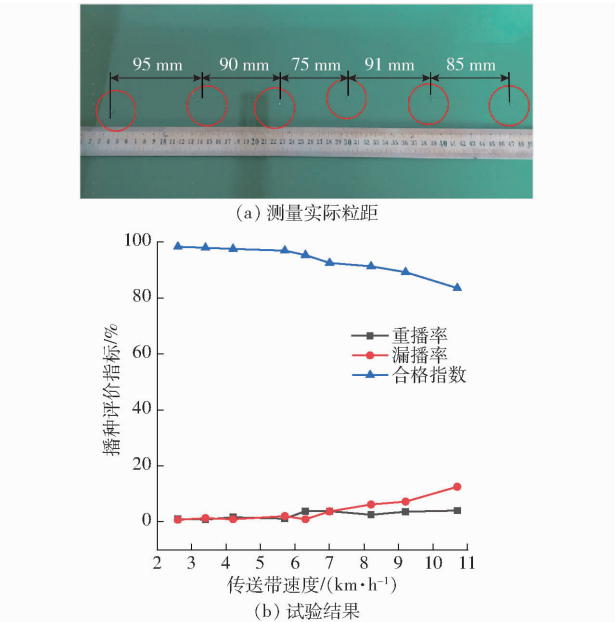


图 15 系统控制精度验证试验

Fig. 15 Verification test platform of control system accuracy

6 田间试验

6.1 试验方法

为了验证本可控可调排种控制系统的作业效果,于 2023 年 9 月 2 日在华中农业大学试验田进行田间试验。配套动力为雷沃 1004 型拖拉机,采用华中农业大学油菜全程机械化团队研制的油菜精量联合直播机进行播种试验,搭载高速机械离心式排种器与窝眼轮式排种器,如图 16 所示。试验理论播量为 3 kg/hm²,速度水平设置为慢Ⅲ、高Ⅰ、高Ⅱ,以 GNSS 模块获取速度信息。



图 16 田间试验

Fig. 16 Field experiment

6.2 试验结果

试验开始前测得土壤含水率为 15.32%,试验时分别以慢Ⅲ、高Ⅰ、高Ⅱ的前进速度从零速加速到速度稳定进行播种,减速则是待拖拉机加速到挡位稳定值后再减速。设定播量为 3 kg/hm²,厢面长度

76 m、宽度 2.3 m,该区域理论播种量为 41 g,统计 10 行总播量分别为 38.21、40.24、43.38 g,狮山菜薹千粒质量取 4.7 g,对应每行播种粒数分别为 813、856、922 粒,预定播量理论排种粒数为 872 粒,播种量误差不超过 6.8%,与台架试验结果基本一致,满足油菜精量直播播种要求。

播种作业 30 d 后,3 种速度下播种均匀性变异系数和各行排量稳定性变异系数如表 4 所示。试验结果表明,本系统可满足作业速度 5~12 km/h 时不同排种系统排种量随速控制的需要且粒距稳定,出苗效果良好,满足排种器对驱动控制系统的设计要求。

表 4 播种指标
Tab.4 Sowing index

排种器 类型	设定播量/ (kg·hm ⁻²)	拖拉机速度/ (km·h ⁻¹)	总排量稳 定性变异 系数/%	播种均匀 性变异系 数/%
高速机械 离心式	3	5~9	9.6	14.4
	3	9~12	5.7	6.1
	3	9~5	6.8	8.6
	3	12~9	7.4	6.5

7 结论

(1)设计了一种基于 RTK 测速的油菜直播机随

速可控可调排种控制系统,标定了电机传动误差、响应速度及传感器的检测误差。试验结果表明系统最大转速误差为 0.93%,GNSS 移动站最大速度漂移值为 0.153 m/s,平均测速精度为 0.054 m/s,落料计数器检测油菜种子绝对误差小于 10%,平均相对误差小于 9%。

(2)加减速过程排种电机转速响应试验中,对车速在慢Ⅲ至高Ⅲ挡位,即目标速度 4.32、5.90、9.55、11.98 km/h 下,检验电机加减速性能。试验结果表明,排种电机减速过程中,系统最大平均超调量为 5.29%,最大平均稳态误差为 1.91 r/min;排种电机加速过程中,系统平均超调量为 3.03%,最大平均稳态误差为 1.29 r/min,平均响应时间为 1.2 s,理论播量误差为 100 g/hm²,满足在排种过程中因加减速造成较大转速差条件下对控制系统的精度要求。

(3)田间试验与台架试验表明,作业速度、排种器类型以及动力驱动方式对播种合格指数与变异系数均有影响。当作业速度为 5~12 km/h 时,本系统作业总排量稳定性变异系数均低于 9.7%,满足不同排种器作业要求。随着作业速度增加,各项播种性能指标呈下降趋势,但正负气压组合式排种器与高速机械离心式各项变异系数均低于 15%。本系统满足高速作业时,对油菜排种器的适配性。

参 考 文 献

[1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)

[2] DING Youqiang, HE Xiantao, YANG Li, et al. Low-cost turn compensation control system for conserving seeds and increasing yields from maize precision planters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107-118.

[3] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 318-327.

[4] XIE Chunji, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Remote monitoring system for maize seeding parameters based on Android and wireless communication[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13: 159-165.

[5] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part I: design and laboratory simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 71-19.

[6] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1-18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. (in Chinese)

[7] 王方艳,杨亮,王红提. 温室大棚电驱气力式胡萝卜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 64-73, 131.
WANG Fangyan, YANG Liang, WANG Hongti. Design and test of electric driving pneumatic carrot planter in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 64-73,131. (in Chinese)

[8] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42-49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxin, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42-49. (in Chinese)

[9] XIE Chunji, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Precision seeding parameter monitor system based on laser sensor and wireless serial port communication[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106429.

[10] HE Xiantao, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of a GPS-based turn compensation system for improving the seeding uniformity of maize planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 199: 106250.

[11] 丁友强,刘彦伟,杨丽,等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12):

- 33–41, 62.
- DING Youqiang, LIU Yanwei, YANG Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on Android and CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 33–41, 62. (in Chinese)
- [12] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51–59.
- ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51–59. (in Chinese)
- [13] 朱龙图, 廖庆喜, 刘海, 等. 油菜机械离心式集排器排种量控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 19–29.
- ZHU Longtu, LIAO Qingxi, LIU Hai, et al. Design and test of the seeding amount control system for the rape mechanical metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 19–29. (in Chinese)
- [14] 廖庆喜, 吴崇, 张青松, 等. 油菜精量联合直播机随速播种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 49–58, 159.
- LIAO Qingxi, WU Chong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of speed-dependent seeding control system of rapeseed precision combined seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 49–58, 159. (in Chinese)
- [15] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 22–33.
- GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seeding performance of conical-hole seeding plate of the positive and negative pressure combination precision seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 22–33. (in Chinese)
- [16] 姚露, 廖庆喜, 沈文惠, 等. 基于 Bezier 曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 56–66, 83.
- YAO Lu, LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, et al. Design and experiment of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed based on Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 56–66, 83. (in Chinese)
- [17] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 16–26.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16–26. (in Chinese)
- [18] 颜丙新, 付卫强, 武广伟, 等. 基于卫星定位的玉米高位精播种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)
- [19] 吴才聪, 赵欣, 田娟, 等. 基于 CORS 与 UHF 的农用 GNSS 差分信号中继方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 23–28.
- WU Caicong, ZHAO Xin, TIAN Juan, et al. CORS and UHF based GNSS differential signal relay method for agricultural application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 23–28. (in Chinese)
- [20] 张甜, 蒋乐, 李兆东, 等. 光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 64–74, 145.
- ZHANG Tian, JIANG Le, LI Zhaodong, et al. Seed flow detection system of optical fiber counting rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 64–74, 145. (in Chinese)
- [21] 丁幼春, 王凯阳, 刘晓东, 等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30–41.
- DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and smallsize seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30–41. (in Chinese)
- [22] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23–28.
- YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 23–28. (in Chinese)
- [23] 蒯婕, 李真, 汪波, 等. 密度和行距配置对油菜苗期性状及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2319–2332.
- KUAI Jie, LI Zhen, WANG Bo, et al. Effects of density and row spacing on seedling traits of rapeseed and seed yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2319–2332. (in Chinese)
- [24] 王磊, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 75–85.
- WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75–85. (in Chinese)
- [25] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68–79, 97.
- WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68–79, 97. (in Chinese)