

油菜机械离心式集排器排种量控制系统设计与试验

朱龙图^{1,2}, 廖庆喜^{1,2}, 刘 海^{1,3}, 王子文¹, 廖宜涛^{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;
3. 武汉市农业科学院, 武汉 430065)

摘 要: 为提升油菜机械离心式集排器的排种性能, 实现排种量稳定可控可调, 该研究设计了一套机械离心式集排器排种量控制系统。该系统以 STM32F103C8T6 单片机作为微控制器, 利用以光电传感器 PG-602 为检测元件的落粒检测模块实时检测流经导种管的排种粒数, 通过基于霍尔传感器的测速模块实时获取机具前进速度, 结合排种粒数和机具前进速度反馈信息构建排种量控制策略, 通过动态调节机械离心式集排器工作转速实现排种量均匀稳定控制。搭建了台架测试平台, 确定了排种量调控模型为线性关系模型, 系统对排种粒数的检测精度不低于 96.17%, 系统反馈时间为 4 s。台架测试结果表明, 该系统能够有效降低机具前进速度、内锥筒充种量、种子尺寸和播种株距变化对排种性能的影响。田间试验结果表明, 该系统控制下的最大排种量误差为 10.00%, 平均排种量误差为 5.77%, 调控合格率为 90.68%, 田间出苗效果好。研究结果可为离心式集排器精量播种控制系统设计提供技术参考。

关键词: 农业机械; 试验; 油菜; 集排器; 控制系统; 光电传感器; 微控制器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.003

中图分类号: S232.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0019-11

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.003 <http://www.tcsae.org>
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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 19-29. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.003 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

油菜是重要油料作物, 机械化种植是促进油菜产业发展的重要途径^[1]。油菜机械离心式集排器因具有结构紧凑、成本低、种子破碎率低、可多行集排等优点被广泛应用, 是油菜机械直播的关键部件^[2-3]。然而传统机械离心式集排器采用地轮驱动, 排种量稳定性难以保证^[4]。

为提升油菜机械离心式集排器排种量稳定性, 廖庆喜等^[5]提出离心式排种随机分配理论, 取消分种器、隔锥、清种槽等工作元件, 优化了集排器结构。曹秀英等^[6]对油菜机械离心式集排器型孔结构进行研究, 确定型孔囊取 1 粒、2 粒和 3 粒油菜种子的临界直径分别为 2.6、3.5 和 3.8 mm。王都等^[7]针对油菜离心式集排器因充种不稳导致排种量不均匀的问题, 设计了一种沙漏通道型充种管, 有效降低了集排器排种量稳定性变异系数。但是, 这些研究大多侧重于油菜机械离心式集排器结构改进和性能

参数优化, 缺少排种量稳定可控可调功能, 不能动态适应机具作业速度、内锥筒内种子填充种质量、种子颗粒尺寸以及播种株距等变化对排种量的影响。同时机械离心式集排器离心力的获取需要较高的圆周运动速度, 集排器稳定工作转速通常在 100 r/min 以上^[8-9], 传统的地轮驱动排种器是被动驱动方式, 存在地轮滑移、链条跳动、转速调控困难等缺陷^[10-13], 难以提供离心式排种器需要的稳定工作转速。

随着智能化技术发展, 排种器电驱动控制系统因控制精度高、工作稳定性好、可调区间大、工作转速可随播种机前进速度实时调整等特点, 应用越来越广泛^[11-13]。张春岭等^[14]通过雷达测速采集播种作业速度, 结合所需粒距得到排种器理论转速, 利用微控制器实现排种转速的最优控制, 排种合格指数提高 3.63%, 漏播指数降低 2.04%; Zhai 等^[15]采用霍尔传感器获取精密播种机作业速度, 通过调控步进电机转速实现排种速度与作业速度同步匹配; 冯玉岗等^[16]设计了一种基于卫星测速并随速控制播种量的电驱式精量播种施肥机, 排种实测值与计算值比较误差低于 5%。但由于这类排种器电驱动控制系统仅有播种机速度信息反馈, 缺乏排种信息反馈, 对每转排种量为定常数的排种器控制效果较好, 而离心式排种器每转排种粒数与种子离心力密切相关, 受排种器转速快慢、种子颗粒大小、充种质量多少影响, 因此这类控制系统不适用于油菜机械离心式集排器。

针对上述问题, 为提升油菜机械离心式集排器排种性能, 实现排种量稳定可控可调, 本文提出一套适用于

收稿日期: 2022-01-17 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403); 国家自然科学基金项目(51975238); 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12); 中国博士后科学基金项目(2021M701341)

作者简介: 朱龙图, 博士, 研究方向为农业机械自动化智能化。

Email: zhult17@mails.jlu.edu.cn

*通信作者: 廖宜涛, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: liaotao@mail.hzau.edu.cn

中国农业工程学会会员: 朱龙图(E041700058M); 廖宜涛(E041201132S)

油菜机械离心式集排器的排种量控制系统,通过台架试验确定排种粒数与集排器排种轴转速之间的定量关系模型,结合排种粒数和机具前进速度的反馈信息,动态调节离心式集排器排种轴转速,降低集排器因机具作业速度、内锥筒充种量、种子颗粒尺寸及播种株距变化等因素带来的影响,提升播种均匀性和稳定性。

1 排种量控制系统设计

1.1 系统总体结构及工作过程

油菜机械离心式集排器排种量控制系统以微控制器为核心处理器,主要包括落粒检测模块、测速模块、排种驱动模块和人机交互模块,总体结构如图 1 所示。其中,落粒检测模块以光电传感器作为检测元件,用于检测流经导种管的排种粒数;测速模块主要基于霍尔传感器构建,用于实时检测机具前进速度;排种驱动模块由步进电机及驱动器构成,步进电机输出轴通过联轴器与油菜机械离心式集排器排种轴相连,用于驱动离心式集排器排种轴,实现排种粒数的准确调控;人机交互模块主要由触摸屏、声光报警装置构成,用于设置系统作业参数、显示检测信息以及种箱排空报警等。

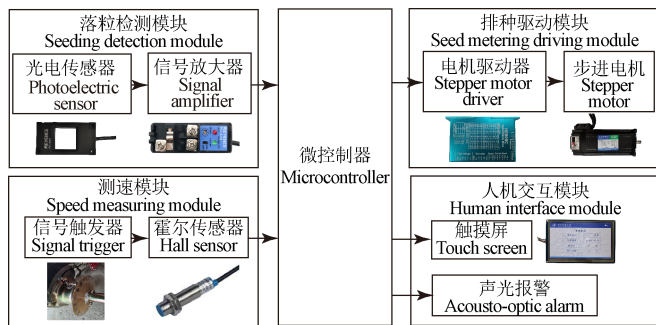


图 1 排种量控制系统总体结构框图

Fig.1 Structure diagram of seeding amount control system

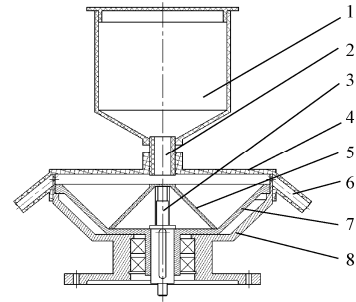
系统工作时,步进电机驱动集排器排种,种子流经光电传感器的检测区,使光电传感器产生阻断信号,该信号经放大器处理后转换为可供微控制器识别的计数信号,达到排种量检测目的;与此同时,微控制器实时检测播种机行走过程中所触发的霍尔传感器信号,并通过计算获得机具前进速度。根据获取的排种量和机具前进速度,结合排种反馈控制策略,系统将决策出的脉冲频率信号作用于步进电机驱动器,动态调整步进电机增速或减速,使集排器排种量趋于理论排种量,进而达到排种量稳定调控目的。

1.2 系统硬件设计

1.2.1 落粒检测模块

油菜机械离心式集排器主要由外锥筒、内锥筒、盖板、种箱和排种轴等组成^[17],如图 2 所示。工作时,种箱内种子在重力作用下,由进种口经凸台斜面均匀地流入内锥桶,在排种轴运转驱动作用下内锥桶内种子受离心力影响沿着内锥筒壁螺旋上升至盖板高度,形成规则种子旋转流动层。当流动层外缘种子与外锥桶型孔相遇时,单粒种子被型孔随机囊取并经由盖板上的出种口投

出,进入导种管,完成多行均匀排种。

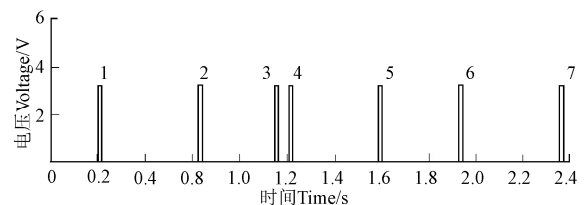


1.种箱 2.进种口 3.排种轴 4.盖板 5.凸台 6.出种口 7.内锥筒 8.外锥筒
1.Seed box 2.Seed inlet 3.Seeding axis 4.Cover plate 5.Lug boss 6.Seed outlet 7.Inner cone canister 8.Outer cone canister

图 2 油菜机械离心式集排器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of rapeseed mechanical centrifugal precision metering device

为实时检测集排器的排种信号,获取集排器排种量信息,设计了落粒检测模块。鉴于油菜种子粒径小,为 1.4~2.5 mm^[6],不易检测,设计中采用 PG-602 光电传感器作为模块检测元件。该传感器由日本 KEYENCE 公司生产,具有检测灵敏度高、检测物体直径范围小的特点,检测窗口尺寸为 21 mm×21 mm,与放大器 PG-610 配合使用可实现直径 0.5 mm 的不透明物体的有效检测,检测反应时间小于 1 ms。通过 3D 打印技术制作 PG-602 光电传感器与导种管的连接件,实现传感器与导种管的嵌入固装。为测试落粒检测模块对油菜种子的检测效果,使用示波器观察该模块对油菜种子的响应信号,由于 PG-602 传感器输出信号为开关量,各脉冲信号的电压值均为 3.3 V,如图 3 所示。脉冲 3 和 4 之间的检测时间远小于 0.2 s,表明设计的落粒检测模块能够有效检测油菜落粒种子,满足实时检测要求。



注: 1~7 表示脉冲。
Note: 1-7 represent pulses.

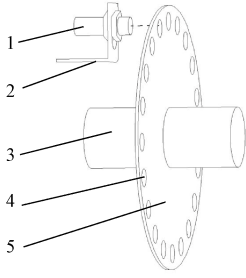
图 3 PG-602 传感器输出信号

Fig.3 Output signals of PG-602 sensor

1.2.2 测速模块

测速模块实时检测播种机前进速度,主要由霍尔传感器和磁钢圆盘组成,如图 4 所示。磁钢圆盘通过中心圆孔可以固装在播种机的行走轮轮轴上,其边缘绕轴均匀布置了多个磁钢;霍尔传感器通过 L 型支架安装在行走轮上,随行走轮同步旋转。

作业过程中,当霍尔传感器靠近磁钢时,传感器输出低电平,远离磁钢时输出高电平。微控制器通过捕获采样时间内的霍尔传感信号数,结合磁钢圆盘半径和圆盘上磁钢数目计算出播种机的前进速度,计算公式为



1.霍尔传感器 2.L型支架 3.行走轮轴 4.磁钢 5.磁钢圆盘
1.Hall sensor 2.L type support frame 3.Traveling wheel axles 4.Magnetic steel 5.Magnetic steel disk

图 4 测速模块结构图

Fig.4 Structure diagram of speed measuring module

$$v_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot N}{M \cdot t_i} \quad (1)$$

式中 r 为磁钢圆盘半径, mm; t_i 为系统第 i 次采样持续时间, ms; v_i 为 t_i 时间内机具前进速度, km/h; N 为微控制器 t_i 时

间内捕获的霍尔传感信号数, M 为磁钢圆盘上磁钢数。

为便于检测安装, 本文设计磁钢圆盘半径为 87.5 mm, 均匀布置的磁钢数为 20, 霍尔传感器型号为 NJK-5002C, 输出 NPN 开关型信号量, 检测距离 ≤ 10 mm, 工作电压 5 V, 响应时间小于 60 ms, 满足实时检测需求。

1.2.3 系统硬件电路设计

控制系统采用 STM32F103C8T6 单片机作为微控制器^[18], 主要硬件电路如图 5 所示。图中 STM32 单片机通过定时器通道 TIM4_CH3 采集霍尔传感器 NJK-5002C 的输出信号, 通过定时器通道 TIM4_CH4 采集经信号放大模块 PG-610 处理后的光电传感器信号。步进电机驱动器的脉冲驱动端由 STM32 单片机的定时器通道 TIM2_CH4 输出脉冲信号进行转速调控。为更好地实现人机交互功能, 系统采用串口屏触摸屏显示数据信息, 并通过红绿两色发光二极管与蜂鸣器实现声光提示功能。

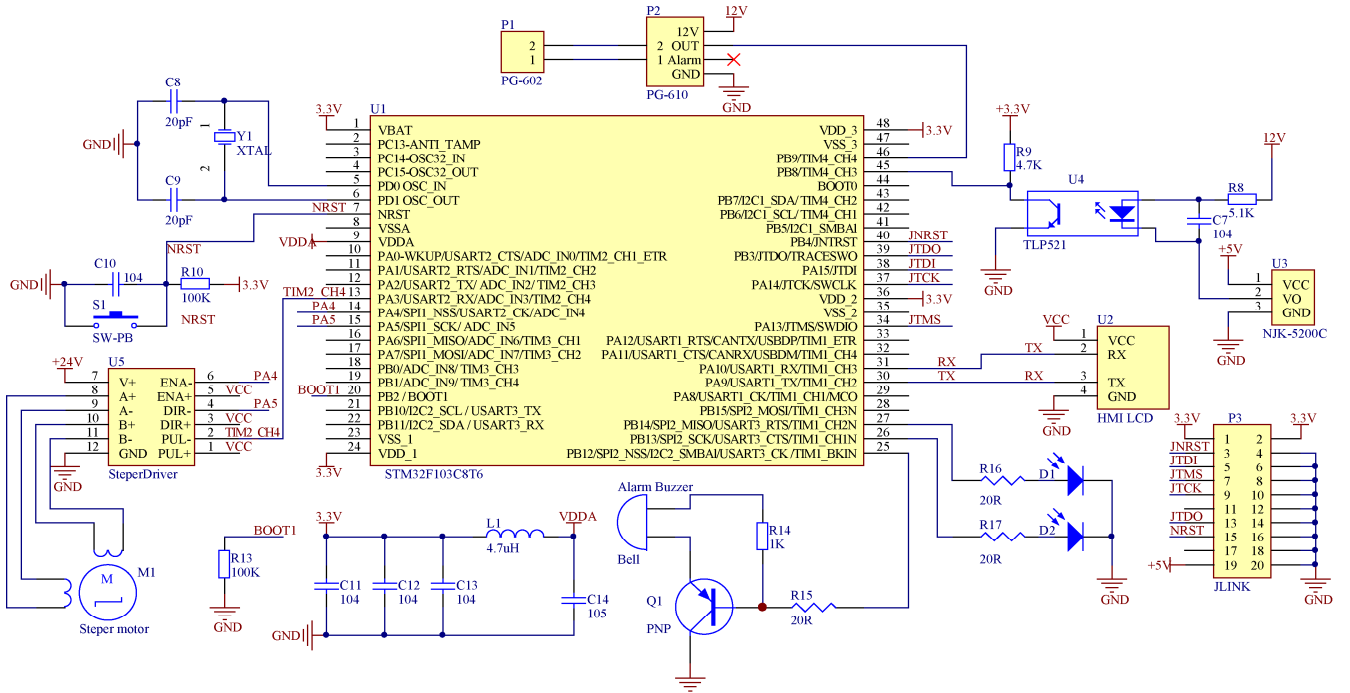


图 5 系统硬件电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of system hardware circuit

1.3 系统软件设计

1.3.1 排种控制策略

为确保集排器排种均匀性, 降低实际排种粒数与理论排种粒数之间偏差, 基于排种量反馈信息和机具前进速度信息设计了排种量控制策略, 如图 6 所示。

系统通过落粒检测模块采集并反馈集排器实际排种粒数, 通过测速模块获取机具前进速度, 动态修正理论排种粒数。设油菜理论播种株距为 D , 则集排器在反馈时间 Δt 内的理论排种粒数为

$$Q = \frac{\sum_{i=0}^n v_i \cdot t_i}{D} \quad (2)$$

$$\Delta t = \sum_{i=0}^n t_i \quad (3)$$

式中 n 为系统采样次数, 由微控制器自动统计; Q 为反馈时间 Δt 内的理论排种粒数。为实现排种均匀性调控, 需快速获取实际排种粒数与理论排种粒数之间的误差 e , 然后根据播种量调控模型动态调节排种轴转速, 使实际排种粒数在合格范围内。 e 的计算式如下:

$$e = \left| \frac{Q - Q_t}{Q} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中 Q_t 为反馈时间 Δt 内的实际排种粒数, 由落粒检测模块测量获得。为适应排种驱动电机响应、避免系统调控频繁加剧集排器振动, 设置 e 的范围为 $\pm 5\%$,

产生时,主程序跳转至 TIM4 捕获中断服务程序,对触发捕获中断的中断源进行判断。若中断由排种落粒触发则排种粒数+1;若中断是由霍尔传感触发,则霍尔计数值+1。完成中断处理后,中断服务程序返回主程序,继续执行后续任务。

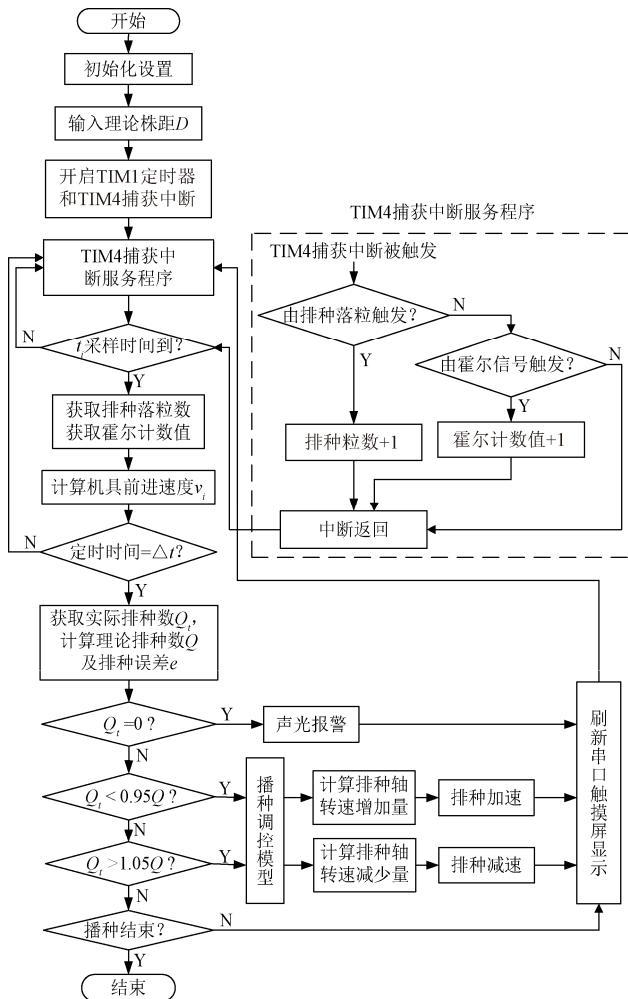


图 9 排种量控制系统程序流程图

Fig.9 Program flow chart of seeding amount control system

主程序统计采样持续时间 t_i 内所获取的排种落粒数和霍尔计数值,并计算机具前进速度 v_i 。当定时时间等于反馈时间 Δt 时,系统程序通过读取 Δt 内的落粒数获取当前实际排种粒数 Q_i ,并依据公式(1)~(3)计算理论排种粒数 Q 和排种误差 e 。若 Q_i 的值为 0,表明在反馈调控时间 Δt 内无种子下落,此时系统控制红绿两色发光二极管闪烁,并开启蜂鸣器,进行声光报警,提示用户进行故障排除、检测种箱种子是否排空。

当 e 超出设定阈值时,系统开启排种量调控功能。即当 $Q_i < 0.95Q$,程序将根据确定的排种量调控模型计算排种轴转速增加量,并据此增大 TIM2_CH4 的输出脉冲频率,进而驱动步进电机加速提高集排器工作转速,以增加排种粒数;反之,当 $\Delta Q > 1.05Q$ 时,则根据确定的排种量调控模型计算排种轴转速减少量,据此调控 TIM2_CH4 输出的脉冲信号频率,降低步进电机转速,进而减小集排器工作转速,减少排种粒数。

1.4 系统检测精度测试及反馈时间标定

1.4.1 系统检测精度测试

排种粒数检测是系统排种量控制的关键前提,其检测精度直接影响系统控制性能。不同于大粒径种子,油菜属于小粒径种子,检测难度较大。为确定系统对油菜种子排种粒数的检测性能,在图 7 所示台架测试平台上开展系统检测精度测试试验。试验前,用精度为 0.001 g 的天平称量 120 g 油菜种子放入离心式集排器内锥筒内,设定排种电机转速为 140 r/min。测试时间设置为 300 s,用量杯收集导种管下落种子,试验重复 5 次。

每次试验结束后采用自动数粒仪(型号 SLY-C,浙江托普)对量杯收集的油菜种子进行重新计数。计数前设置自动数粒仪灵敏度为检测小粒径种子、调节过料通道大小只允许一粒油菜种子通过,确保计数准确率。试验结束后,将系统排种检测结果与自动数粒仪检测结果进行对比。试验结果如表 1 所示。检测精度由系统检测粒数除以数粒仪检测粒数再乘以 100% 计算得到。

从表 1 中可以看出,5 次重复测试中,系统对排种粒数检测精度均不小于 96.17%,检测准确率高,符合系统设计要求。

表 1 落粒检测对比结果

Table 1 Test and comparison results of seeding amount

试验组 Test No.	系统检测值 System detection value	数粒仪检测值 Test value of particle counter	检测精度 Detection accuracy/%
1	1 906	1 982	96.17
2	1 905	1 960	97.19
3	1 913	1 969	97.16
4	1 924	1 992	96.59
5	1 911	1 979	96.56

1.4.2 系统反馈时间标定

系统反馈时间对排种量控制有重要影响。反馈时间过长易造成系统精度过低、实时性差,反馈时间过短易造成系统震荡、稳定性差。鉴于所设计的排种量控制系统主要用于长江中游地区油菜机械播种,该地区田块面积较小、作业速度一般在 2~4 km/h^[20-21],为确保系统调控稳健性,试验过程中将反馈时间 Δt 设置为 2、4、6 s 三个不同水平,机具分别以 0.50、0.75、1.00 m/s 各运行 100 s。采用最大排种误差、平均排种误差和调控合格率作为评价指标。其中,排种误差按公式(4)计算,最大排种误差 e_{max} 和平均排种误差 e_{avg} 的计算公式分别为

$$e_{max} = \max(e_i) \quad (11)$$

$$e_{avg} = \text{mean}(e_i) \quad (12)$$

式中 e_i 为第 i 次检测的排种误差, $i = 1, 2, \dots, N_{total}$, N_{total} 为总检测次数。

调控合格率 p 的计算公式为

$$p = \frac{N_{total} - N_e}{N_{total}} \times 100\% \quad (13)$$

式中 N_e 为系统检测的排种粒数不合格次数。

系统反馈时间标定结果如表 2 和图 10 所示。图 10 中理论排种粒数由公式(2)计算,计算时理论株距选取

70 mm; 实际排种粒数由系统落粒检测模块测量获得。

由表 2 可知, 三种不同反馈时间下, 系统最大排种误差分别为 17.24%、7.01% 和 8.14%, 平均排种误差分别为 4.79%、2.60% 和 3.08%, 系统的最佳反馈时间为 $\Delta t = 4$ s, 在该反馈时间下系统的调控合格率为 93.42%。从图 10 可以看出, 随着机具速度的改变, 系统实际排种粒数在理论排种粒数附近波动, 说明系统具有动态调控性能; 不同反馈时间下, 实际排种粒数与理论排种粒数之间的偏差不同, 其中 $\Delta t = 2$ s 时的排种粒数偏差明显大于 $\Delta t = 4$ s 和 $\Delta t = 6$ s,

表明系统反馈时间对排种量存在影响。

表 2 系统反馈时间标定结果

反馈时间 Feedback time/s	最大排种误差 Maximum seeding error/%	平均排种误差 Average seeding error/%	调控合格率 Control pass rate/%
2	17.24	4.79	71.52
4	7.01	2.60	93.42
6	8.14	3.08	90.20

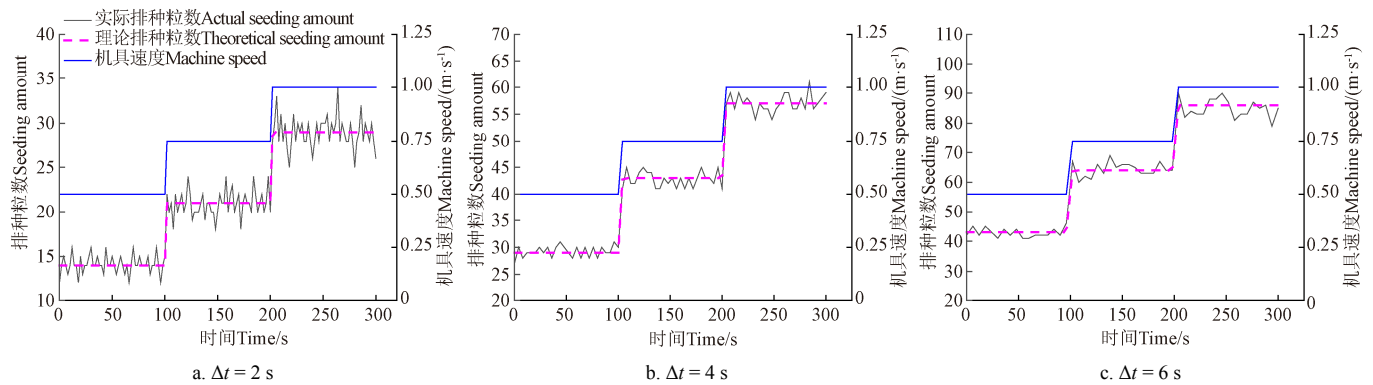


图 10 不同反馈时间 Δt 的排种量检测结果

Fig.10 Detection results of seeding amount at different feedback time Δt

2 台架试验

2.1 试验方法

机械离心式集排器易受机具前进速度、内锥筒充种质量、种子颗粒尺寸及播种株距变化等影响^[22-23]。为测试本文排种量控制系统对上述影响因素的响应情况, 验证控制系统的可行性, 基于确定的排种量调控模型和反馈时间, 在图 7 所示测试平台上开展系统性能测试试验。

2.1.1 系统对机具速度变化的响应

为明确系统对于机具速度变化的影响情况, 开展有无排种量控制系统对比试验。通过调整台架作业速度模拟电机的转速, 使机具速度 v 按公式 (14) 的正弦曲线变化。

$$v = v_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{120} \cdot t\right) + 0.75 \quad (14)$$

式中 $t = 0$ 时刻的机具速度 v_0 取值 0.25 m/s, t 的范围为 0~300 s。试验时保持内锥筒充满油菜种子, 设置理论株距为 70 mm, 设置集排器初始转速为 178 r/min (对应 $t = 0$ 时刻的机具速度), 分别在开启和关闭控制系统下开展测试试验。在关闭控制系统的试验中, 设置排种驱动电机转速与台架作业速度模拟电机转速匹配, 确保集排器排种轴运动状态符合机具速度变化规律, 以模拟地轮转速驱动集排器排种的过程。试验过程中, 每隔 4 s 统计一次排种粒数检测结果, 按公式 (4) 和公式 (13) 分别计算系统排种误差和调控合格率。

2.1.2 系统对内锥筒不同充种质量的响应

为测试系统对内锥筒内不同充种质量的控制响应, 选取锥筒内种子充种质量分别为 60、120、180、240、300、

360、420、480 g 共 8 个水平开展使用和不使用排种量控制系统的对比试验。试验前, 用精度 0.001 g 的天平称量试验所需种子量, 试验过程中机具速度保持 0.75 m/s, 试验时间为 300 s。每个充种质量水平重复 5 次, 检测集排器在 4 s 时间内的排种粒数, 计算平均排种粒数及相应的排种误差。

2.1.3 系统对不同大小种子颗粒的响应

为获得不同大小种子颗粒, 通过 8 目 (孔径 2.36 mm)、10 目 (孔径 2.00 mm)、12 目 (孔径 1.70 mm) 筛网对试验油菜种子进行分级, 分别选出大、中、小三个水平, 记为 A1、A2 和 A3, 各级种子随机选出 50 粒, 测量外形特征 (包括长、宽、高, 分别用 L 、 W 、 H 表示) 及千粒质量, 取平均值, 结果如表 3 所示。种子球形度 ρ 计算公式为

$$\rho = \frac{\sqrt[3]{L \cdot W \cdot H}}{L} \quad (15)$$

为测试系统对不同大小种子颗粒的响应, 在机具速度 0.75 m/s 条件下, 采用上述分级种子开展排种量控制系统开启与关闭对比试验。试验时间设定为 300 s, 每组试验重复 5 次, 计算平均排种粒数及相应排种误差。

表 3 试验种子分级及参数特性

分级 Levels	长度 Length/mm	宽度 Width/mm	高度 Height/mm	球形度 Sphericity	千粒质量 1 000-grain mass/g
A1	2.41	2.17	1.86	0.89	6.48
A2	2.05	1.86	1.64	0.90	4.31
A3	1.84	1.61	1.40	0.87	2.88

2.1.4 系统对不同株距的响应

从公式(2)可以看出株距与排种粒数存在反比关系,为测试系统对不同株距的响应情况,在 70、100 和 130 mm 三个播种株距水平下开展排种量控制系统性能试验,每组试验重复 5 次。试验过程中,机具速度保持 0.75 m/s,试验时间为 300 s,计算试验时间内平均排种粒数及平均排种误差。

2.2 台架试验结果与分析

2.2.1 系统对机具速度变化的响应结果

排种粒数随机具速度变化的检测结果如图 11 所示,对应的作业性能指标如表 4 所示。由图 11 可知,使用排种量控制系统后,排种粒数随机具速度变化存在一定的滞后性,但基本在排种粒数合格范围内,系统具有较好的动态调控性。关闭排种量控制系统后,排种粒数在机具速度峰值附近严重偏离合格范围。排种量控制系统的滞后性主要由反馈时间引起。

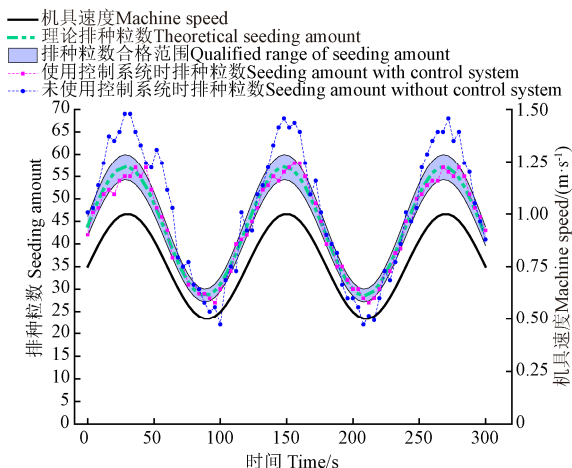


图 11 排种粒数随机具速度的变化

Fig.11 The change of seeding amount with machine speed

由表 4 可知,使用排种量控制系统时,系统的排种误差不超过 9.03%,平均排种误差为 3.06%,调控合格率为 92.11%;不使用排种量控制系统时,最大排种误差为 29.70%,平均排种误差为 10.99%,调控合格率为 73.68%。显然,使用排种量控制系统的测试结果优于不使用排种量控制系统。

2.2.2 系统对内锥筒不同充种质量的响应结果

内锥筒不同充种质量下集排器排种粒数对比结果如图 12,对应的排种误差如图 13 所示。从图 12 可以看出,未使用排种量控制系统时,内锥筒充种质量为 60、120、180、240、300、360、420、480 g 对应的排种粒数分别 1 375、1 928、2 907、3 450、3 562、3 650、3 657 和 3 650,排种粒数受充种质量影响较大。在 60~360 g 充种质量范围内,排种粒数随充种质量增加而增加,充种质量超过 360 g 时,排种粒数趋于稳定。这是因为充种质量超过 360 g,内锥筒已被油菜种子充满,多余种子滞留种箱内。使用排种量控制系统时,60、120、180、240、300、360、420、480 g 充种质量对应的排种粒数分别为 2 908、2 993、3 425、3 090、3 367、3 080、3 140 和 3 375,基本维持在理论排

种粒数附近。其中,理论排种粒数根据公式(2)计算,值为 3 215 粒。

表 4 速度变化下试验指标对比结果

Table 4 Comparison results of test indexes under sinusoidal velocity change

项目 Items	最大排种误差 Maximum seeding error/%	平均排种误差 Average seeding error /%	调控合格率 Control pass rate/%
使用控制系统 With control system	9.03	3.06	92.11
不使用控制系统 Without control system	29.70	10.99	73.68

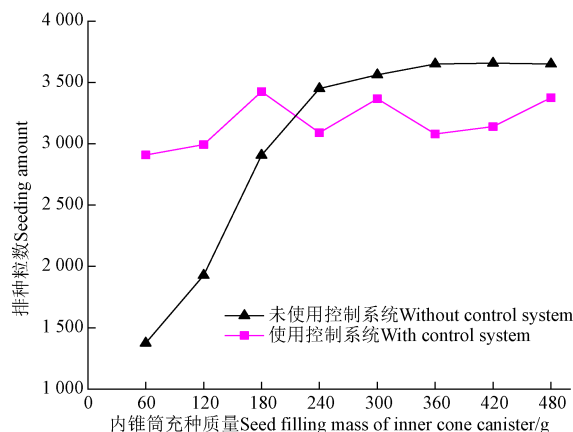


图 12 不同充种质量下排种粒数对比

Fig.12 Comparison of seeding amount at different filling mass

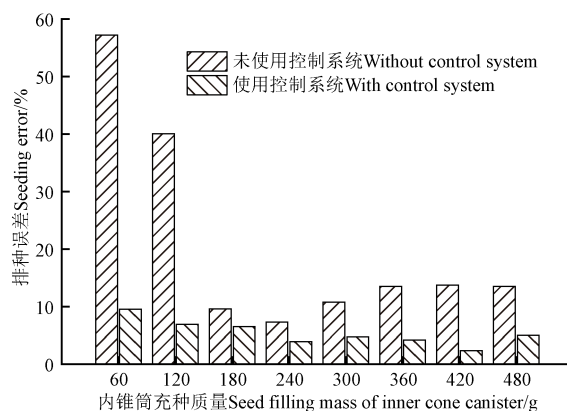


图 13 不同充种质量下集排器排种误差对比

Fig.13 Comparison of seeding errors at different filling mass

图 13 显示,未使用排种量控制系统时,60、120、180、240、300、360、420、480 g 充种质量对应的排种误差分别为 57.23%、40.03%、9.58%、7.31%、10.79%、13.53%、13.75%和 13.53%,排种粒数受充种质量影响明显,特别是当充种质量低于 120 g,排种误差超过了 40%。使用排种量控制系统后,集排器在不同充种质量下的排种误差分别为 9.55%、6.91%、6.53%、3.89%、4.73%、4.2%、2.33%和 4.98%,较不使用排种量控制系统时分别降低了 47.68、33.12、3.05、3.42、6.06、9.33、11.42 和 8.55 个百分点,排种量控制系统有效降低了内锥筒充种

质量对集排器排种性能的影响。

2.2.3 系统对不同大小种子颗粒的响应结果

不同大小种子颗粒条件下集排器排种粒数检测结果如图 14 所示,对应的排种误差如图 15 所示。从图 14 中可以看出,不使用排种量控制系统时,A1、A2、A3 级别种子的排种粒数分别为 2 717、3 658 和 4 063,排种粒数受种子尺寸大小影响较明显,且随着种子颗粒尺寸的减小而增大。分析其原因是因为试验所用集排器的型孔直径为 3.2 mm,种子颗粒级别越小,种子被型孔囊取概率越大,集排器排种粒数越多。在使用排种量控制系统时,A1、A2、A3 级别种子的排种粒数分别为 3 366、3 087 和 3 464,不同尺寸级别种子的排种粒数均在理论排种粒数附近波动,表明系统能够适应不同尺寸颗粒的种子。

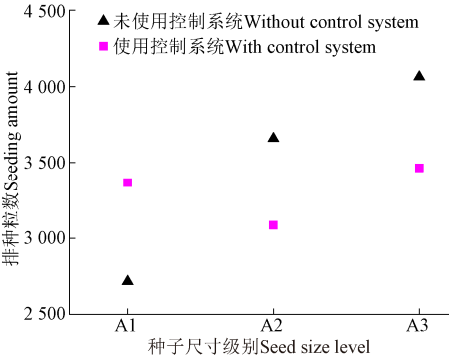


图 14 不同种子尺寸下集排器排种粒数对比

Fig.14 Comparison of seeding amount at different seed size

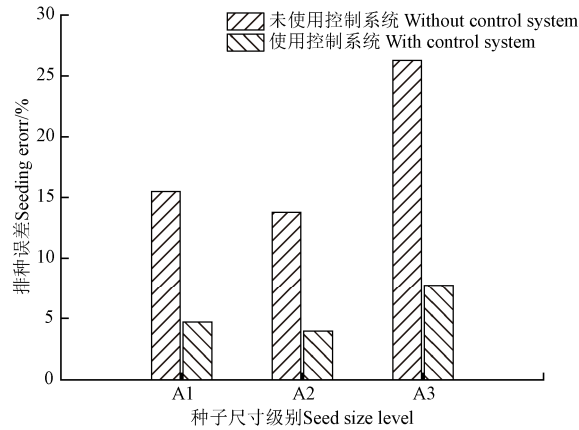


图 15 不同种子尺寸下集排器排种误差对比

Fig.15 Comparison of seeding errors at different seed size

图 15 结果显示,不使用排种量控制系统时,集排器对 A1~A3 三种不同颗粒尺寸级别种子的排种误差均大于 13.78%,使用排种量控制系统时,其排种误差分别为 4.70%、3.98%和 7.74%,较未使用排种量控制系统依次降低了 10.79、9.80 和 18.63 个百分点。

2.2.4 系统对不同株距的响应结果

三种不同株距下系统响应结果如表 5 所示。由表 5 可知,不同播种株距条件下,系统的排种粒数不同。播种株距为 70、100、130 mm 时,系统的平均排种误差分

别为 5.26%、2.24%和 6.53%,满足系统设计需求。

表 5 系统对不同株距响应结果

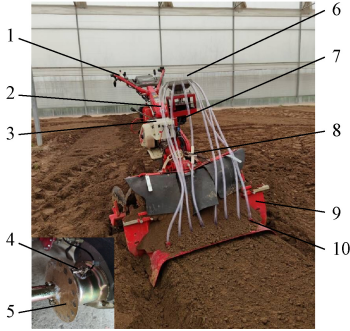
Table 5 Response results of the system to different seeding distance

株距 Plant spacing /mm	理论排种粒数 Theoretical seeding amount	实际排种粒数 Actual seeding amount	排种误差 Seeding error/%
70	3 214	3 384	5.26
100	2 550	2 493	2.24
130	1 731	1 618	6.53

3 田间试验

3.1 试验方法

为测试排种量控制系统田间作业可行性,并验证其作业效果,将设计的排种量控制系统集成在凯马 1WG-6.3 (KM910LE) 微耕机上,作业功率 6.3 kW,作业幅宽 1 m,开展田间播种试验。试验机具主要由微耕机、机械离心式集排器、起垄装置和开沟覆土装置等组成,如图 16 所示。



1.微耕机 2.导种管 3.排种量控制系统 4.霍尔传感器 5.磁钢圆盘 6.离心式集排器 7.步进电机 8.PG-602 传感器 9.起垄装置 10.开沟器
1.Mini-tiller 2.Seed guiding tube 3.Seeding amount control system
4.Hall sensor 5.Magnetic steel disk 6.Centrifugal precision metering device
7.Stepper motor 8.PG-602 sensor 9.Ridging device 10.Ditching device

图 16 田间试验样机

Fig.16 Filed test planter

机具启动方式为电启动,可为排种量控制系统提供工作电源,同时可完成开沟和起垄功能。机械离心式集排器及其排种驱动电机通过固定架安装在微耕机上,集排器出种口和开沟器之间通过导种管连接;微控制器单元安装在集排器下方的固定架上,光电传感器 PG-602 连通在导种管上,霍尔测速模块安装在行走轮轴上。在播种过程中柴油发电机为播种机提供前进动力,机械离心式集排器在步进电机驱动下通过离心力将种子排出,起垄装置完成起垄作业,种子经过导种管有序落入开沟器开出的种沟内并进行覆土。

田间试验于 2021 年 3 月 10 日在武汉市农业科学院蔬菜研究所温室大棚内开展。试验过程中,排种量控制系统的反馈时间设置为 4 s,理论播种株距设置为 100 mm,机具速度为 0.25 m/s。为测试系统调控功能,集排器排种轴转速以播种机行驶速度 0.75 m/s 为基准设定,分别开展排种量控制系统使用前对比试验。

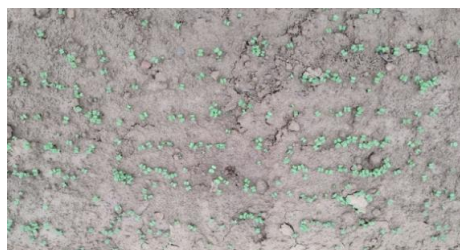
3.2 试验结果及分析

田间试验对比结果如表 6 所示。不使用排种量控制系统时，最大排种误差为 80.00%，平均排种误差为 65.54%，调控合格率为 57.44%，排种效果差。这是因为实际作业过程中，设置的机具速度与集排器排种转速不匹配，在无控制系统情况下，集排器不能根据作业速度动态调整排种量。使用排种量控制系统时，最大排种误差为 10.00%，平均排种误差为 5.77%，调控合格率为 90.68%，系统能够实现排种量稳定调控。

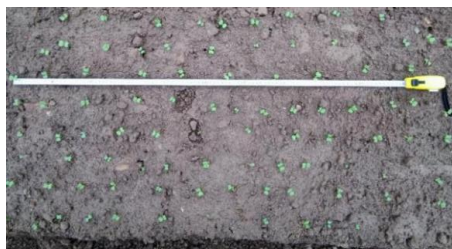
表 6 田间试验对比
Table 6 Comparison of field tests

项目 Items	最大排种误差 Maximum seeding error/%	平均排种误差 Average seeding error /%	调控合格率 Control pass rate /%
不使用控制系统 Without control system	80.00	65.54	57.44
使用控制系统 With control system	10.00	5.77	90.68

油菜种子出苗后随机选取 10 段长度为 1 m 的出苗区域，测量油菜幼苗株距，如图 17 所示。不使用控制系统的平均株距为 38 mm，不满足播种要求。使用控制系统的幼苗平均株距为 109 mm，田间出苗效果较好，满足实际作业需求。



a. 不使用控制系统
a. Without control system



b. 使用控制系统
b. With control system

图 17 田间播种试验出苗效果

Fig.17 Seedling emergence effect of field sowing test

4 结 论

1) 本文设计了一套油菜机械离心式集排器排种量控制系统。该系统以 STM32F103C8T6 单片机作为微控制器，利用以光电传感器 PG-602 为检测元件的落粒检测模块实时检测流经种管的排种粒数，通过基于霍尔传感器的测速模块实时获取机具速度，结合探明的排种粒数与排种轴转速之间的关系模型，实现排种量动态调节，确保排种稳定均匀。

2) 搭建了系统测试平台，确定了系统的排种量调控

模型为线性关系模型，开展了系统检测精度及反馈时间标定试验。结果表明系统对油菜落粒种子的检测精度大于 96.17%，系统反馈时间为 4 s。

3) 台架试验结果表明，系统能够有效降低机具速度、内锥筒充种质量、种子颗粒尺寸以及播种株距变化对机械离心式集排器排种量的影响。田间试验结果表明，系统的最大排种误差为 10.00%，平均排种误差为 5.77%，调控合格率为 90.68%，田间出苗效果好，能够实现排种量稳定调控。

[参 考 文 献]

- [1] 廖庆喜. 油菜生产机械化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 王磊, 廖宜涛, 张青松, 等. 油菜集排器供种装置侧向倾斜排种性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 1-10.
Wang Lei, Liao Yitao, Zhang Qingsong, et al. Experiments and analysis on seeding performance of seed feeding device of rapeseed centralized metering device under lateral tilt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(12): 16-26. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李明, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 滚筒集排式油菜精量排种器排种过程分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 17-27.
Li Ming, Liao Qingxi, Liao Yitao, et al. Analysis on seeding process of pneumatic cylinder-type centralized rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 17-27. (in Chinese with English abstract)
- [5] 廖庆喜, 张宁, 张朋玲, 等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48-51.
Liao Qingxi, Zhang Ning, Zhang Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48-51. (in Chinese with English abstract).
- [6] 曹秀英, 廖庆喜, 丛锦玲, 等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 40-46.
Cao Xiuying, Liao Qingxi, Cong Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王都, 舒彩霞, 廖宜涛, 等. 集排离心式油菜精量排种器

- 充种控制方法与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(6): 182-189.
- Wang Dou, Shu Caixia, Liao Yitao, et al. Control method and test of seed-filling of centralized centrifugal precision seed-metering device for rapeseed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6): 182-189. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曹秀英, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77-84.
- Cao Xiuying, Liao Yitao, Liao Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46: 77-84. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张朋玲. 2BF-6 型油菜联合直播机关键部件设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- Zhang Pengling. Design and Experiment Research on 2BF-6 Type Centrifugal Combined Seeder Key Parts for Rape[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jing H R, Zhang D X, Wang Y X, et al. Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 1-8.
- [11] Coelho A L D F, Queiroz D M D, Valente D S M, et al. Development of a variable-rate controller for a low-cost precision planter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(2): 233-243.
- [12] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 玉米变量播种机单体驱动器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 1-9.
- Ding Youqiang, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Design of row-unit driver for maize variable rate planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [13] Li Y, He X T, Cui T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4), 1-9.
- [14] 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 with English abstract)
- [15] Zhai J B, Xia J F, Zhou Y, et al. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 13-18.
- [16] 冯玉岗, 金诚谦, 袁文胜, 等. 基于卫星测速小麦精量电驱式播种控制系统[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 124-130.
- Feng Yugang, Jin Chengqian, Yuan Wensheng, et al. Research on precision electric seeding control system based on satellite velocity measurement for wheat[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 124-130. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王都. 集排离心式油菜精量排种系统设计与仿真分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Wang Dou. Design and Simulation of Centralized Centrifugal Precision Seed-Metering System for Rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [18] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于 GPS 和 GPRS 的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 162-168.
- Huang Dongyan, Zhu Longtu, Jia Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese with English abstract)
- [19] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
- Liao Qingxi, Zhang Pengling, Liao Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 30-41. (in Chinese with English abstract)
- [21] 丁幼春, 刘伟鹏, 董万静, 等. 基于排种频率实时反馈的油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 73-82.
- Ding Youchun, Liu Weipeng, Dong Wanjing, et al. Design and experiment of seed metering device for rapeseed based on seeding frequency feedback[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李飞雄. 对离心式集排器设计参数的探讨[J]. 农业机械学报, 1964, 7(1): 38-48.
- Li Feixiong. An investigation on the design parameters of the centrifugal seed feeding apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964, 7(1): 38-48. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张宁. 离心集排式油菜精量排种器的设计及试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- Zhang Ning. Design and Experiment Research on Centralized Centrifugal Precision Metering Device for Rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)

Design and test of the seeding amount control system for the rape mechanical metering device

Zhu Longtu^{1,2}, Liao Qingxi^{1,2}, Liu Hai^{1,3}, Wang Ziwen¹, Liao Yitao^{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; 3. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430065, China)

Abstract: A rapeseed centrifugal metering device has been widely used in field, due to its compact structure, high efficiency, low cost, and low seed crushing rate. The centrifugal force and seed gravity can also be utilized to realize the simultaneous seeding of multiple rows through the seed outlets of the upper edge of the outer cone canister. However, the seeding amount relies mainly on the forward speed of the planter, the filling quality of the inner cone canister, the size of seed particles, and seeding plant space. In this study, a seeding amount control system was designed to improve the performance of the rapeseed centrifugal metering devices. The system consisted of a microcomputer, a seeding detection, a speed measuring, a seed metering drive, and a human interaction module. Specifically, the microcomputer used a singlechip with the type of STM32F103C8T6 as a processor to coordinate the orderly operation of each functional unit. The seeding detection module was developed to real-time monitor the seeding amount of the seed metering device using a photoelectric sensor with the type of PG-602 and a signal amplifier with the type of PG-610. The speed measuring module was to monitor the sowing speed using a hall sensor with a magnetic steel disk. More importantly, the seed metering drive module was composed of a stepper motor with a model of 57HSE and a supporting driver with the type of HB808C. As such, the rapeseed centrifugal metering device was driven to rotate for the centrifugal force of seeding. Furthermore, a seeding control strategy was formulated to realize the uniform seed metering of sowing quantity. A seeding control model was selected to dynamically change the centrifugal speed of the centrifugal metering device via the seed metering drive module, in terms of the error between the actual and the theoretical seed metering amount. The actual seed metering number of the seed metering device was achieved within the seeding qualified range. A Bench test was carried out to determine the optimal seeding control model and operation parameters of the system. The results showed that the seeding control model was a linear model. The accuracy of the system for the seed amount detection was over 96.17%, and the optimal feedback time was 4 s. A performance test was also conducted to verify the response of the seeding amount control system to the changes in planter forward speed, the inner cone canister filling quality, the seed particle size, and the seeding plant space. The test results show that the qualified rate of seed metering regulation of the system was 92.11%, when the forward speed of the planter changes in a sinusoidal curve, indicating a better performance than that without a seeding amount control system. When the seed filling mass of the inner cone canister changed from 60 to 480 g, the seed metering errors of the control system were 9.55%, 6.91%, 6.53%, 3.89%, 4.73%, 4.2%, 2.33% and 4.98%, respectively, which were 47.68, 33.12, 3.05, 3.42, 6.06, 9.33, 11.42 and 8.55 percentage points lower than before. The metering errors of the control system for the large, medium, and small seeds were 4.70%, 3.98%, and 7.74% respectively, which were 10.79, 9.80, and 18.63 percentage points lower than before. The metering errors of the control system were 5.26%, 2.24%, and 6.53%, respectively, when the values of sowing plant spacing were 70, 100, and 130 mm, respectively. A field seeding experiment was performed on the improved system and the optimal feedback time. The results showed that the seeding error of the system was less than 10.00%, the average seeding error was 5.77%, and the qualified rate of seeding amount control was 90.68%, indicating a better seeding performance, and a much more uniform seedling emergence than before. Consequently, the new control system of seeding amount can be expected to effectively reduce the changes impact of planter forward speed, inner cone canister seed filling mass, seed particle size, and seeding plant space on the operating performance of rapeseed centrifugal metering device for the better function of uniform seeding.

Keywords: agricultural machinery; test; rapeseed; metering device; control system; photoelectric sensor; microcontroller