

基于排种频率实时反馈的油菜排种器设计与试验

丁幼春^{1,2} 刘伟鹏^{1,2} 董万静^{1,2} 陈礼源^{1,2} 刘晓东^{1,2} 靳伟^{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: 以电机转速作为控制目标的电控排种器,在复杂工况下存在实时播种量不稳定、难以达到农艺要求播量的问题,为此设计了一种可根据实时播量信息进行反馈控制的油菜排种器。油菜排种器由螺旋排种机构、小粒径种子感知模块、检测及控制模块和驱动模块组成。为使种子有序通过小粒径种子感知模块传感区域,对导种管进行了结构设计,使其能够与传感器模组匹配,从而有效减少播量漏记。对排种器进行转速-排种频率测定及播量准确率测试,基于测试结果构建了播量检测准确率补偿模型,从而降低播量检测误差。以小粒径种子感知模块中传感器模组获取的实时播量信息作为排种控制器控制输入,设计了排种器控制系统。台架试验表明,油菜排种器排种频率在10.1~60.4 Hz范围内,排种器播量检测准确率达到98.75%,不同转速下的排种量稳定性变异系数不超过1.16%。田间试验表明,在拖拉机不同前进速度下,播种量误差率不超过2.55%,排种量稳定性变异系数不超过0.98%。该油菜排种器可为小田块精量播种提供技术支持。

关键词: 油菜; 排种器; 反馈; 播量检测准确率; 排量稳定性; 试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0073-10 OSID: 

Design and Experiment of Seed Metering Device for Rapeseed Based on Seeding Frequency Feedback

DING Youchun^{1,2} LIU Weipeng^{1,2} DONG Wanjing^{1,2} CHEN Liyuan^{1,2} LIU Xiaodong^{1,2} JIN Wei^{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: The seed metering device for rapeseed was the core working part of rape mechanized seeding technology. The performance of seed metering device for rapeseed directly determined the quality of rape seeding. One of the trends to achieve intelligent sowing is to obtain sowing information through real-time detection of rape seed flow and control the sowing volume accordingly. The electronic control seed metering device that used motor speed as the control target had the problem of unstable seeding quantity in real time under complex working conditions. This problem has made it difficult for the seed metering device to achieve the agronomy requirements of sowing quantity. A seed metering device which can perform feedback control based on real-time sowing information was designed to solve this problem. The seed metering device for rapeseed consisted of a screw tube seed rowing mechanism, a detection and control module, a small grain size seed sensing module and a drive module. In order to orderly pass all seeds through the sensing area of the small grain size seed sensing module, the structure of the seed guide tube was designed. This seed guide tube can match the sensor module. It can effectively reduce loss sowing. The seed metering device for rapeseed was tested for rotation speed-seeding frequency measurement and seeding accuracy rate. A seeding quantity compensation model was constructed based on the result of test. This model reduced sowing detection errors. The seed metering device for rapeseed was tested for rotation speed-seeding quantity measurement and seeding accuracy rate. A seeding quantity compensation model was constructed based on the result of test. This model reduced sowing detection errors. A seed metering device control system was designed by using the small grain size seed sensing

module to complete real-time seeding information detection, and it used the detected information as input to the control system. The control module calculated based on the set seeding information and the forward speed information measured by the hall speed measurement module. The control module converted the difference between the theoretical seeding frequency and the actual seeding frequency measured in real time by the small grain size seed sensing module into the speed difference as the controller input. The control module decided on the corresponding duty cycle. The bench test showed that the seeding quantity detection accuracy of the seed metering device for rapeseed detection was higher than 98.75% in the range of 10.1 ~ 60.4 Hz seeding frequency. The coefficient of variation of seeding quantity stability of seed metering device for rapeseed was less than 1.16% at different rotation speeds. The field test results showed that the error rate of sowing quantity was less than 2.55% and the coefficient of variation of seeding quantity stability of seed metering device for rapeseed was less than 0.98% at different forward speeds of the tractor. This seed metering device for rapeseed provided technical support for precision sowing in small plots.

Key words: rape; seed metering device; feedback; seeding quantity detection accuracy; seeding stability; test

0 引言

提高油菜机械化及智能化播种水平是油菜种植节本增效的重要途径^[1]。油菜排种器是油菜机械化播种的核心工作部件^[2],其性能直接决定油菜播种质量,对种子流进行实时检测、获取播种信息及进行相应控制是播种环节智能化技术之一^[3]。国外谷物排种器主要是一器多行气力输送集排式排种器,如美国 John Deere 公司、Case IH 公司、德国 LEMKEN 公司研制的谷物精量播种机^[4-6],可实现宽幅播种作业。在电控排种器研究上,CAY 等^[7]研制了电控玉米排种器控制系统。国外播种装备大多配套播种监测装置,如美国 Precision Planting 公司的 SeedSense 系列播种机监控系统^[8]、美国 John Deere 公司的 SeedStar™ 监视器^[9]和意大利 MC ELECTRONICS 公司的 Sistema Full semina 监测系统^[10]均可实现谷物播种株距、播种总量、排种频率和播种面积等播种信息的实时监测和显示,当出现故障时会自动报警。国外播种机械已产品化,适合大田作业。我国长江中下游地区地块较小、土壤粘湿板结,宽幅播种机并不适用,且国外的播种监测产品配套于特定机具,也不适合在我国播种机上直接使用。

针对油菜种子因含油量高、表皮薄而易发生破损和堵塞的问题,廖庆喜团队^[11-16]研制了正负气压式、滚筒集排式、气送式及勺式穴播等油菜排种器,实现了油菜精量播种。关于油菜排种器的研究大多聚焦于结构及其优化设计,以此来提高排种性能^[17-21],而对电控油菜排种器研究较少。电控排种器能以稳定的排种频率工作,从而保证较高的播种质量。电控排种器通常基于排种器当前转速对排种频率进行间接估算,难以对排种频率进行精确调节。

播种监测技术能实时获取排种器当前的排种状况,包括播量、实时排种频率等信息,结合漏播检测及补种技术,可有效提高播种质量。周利明等^[22-23]根据种子介电特性,基于电容检测原理实现了对玉米、稻谷和棉籽检测;陈建国等^[24]基于电容传感器设计了对小麦种子数量检测系统,实现了小麦精量播种机播种量检测;杨硕等^[25]设计了玉米播种粒距监测及漏播预警系统,用以解决玉米精密播种时因粒距不一致而引起的播量分布不均匀问题。在油菜漏播检测与补种方面,丁幼春团队^[26-28]研制了基于压电薄膜、基于薄面激光-硅光电池及与分流机制结合的小粒径种子流传感装置,并在油菜精量排种器漏播实时检测方法^[29]基础上,研制了油菜补种系统^[30-31]。油菜补种系统配套于正负气压组合气力式油菜排种器上,系统工作时造成补种过量,降低了播种质量。

为此本文设计一种可根据排种频率进行反馈控制的排种器,以期实现油菜播种过程中排种频率的可测、可控,提高油菜播种智能化水平,为小田块油菜精量排种器设计提供技术支撑。

1 结构设计及测试

1.1 整体结构及排种过程

油菜排种器整体结构示意图如图 1 所示,主要包括螺管排种机构、小粒径种子感知模块、检测及控制模块、驱动模块和固定模块。螺管排种机构由外种箱、端盖、端盖固定座和种箱组成,小粒径种子感知模块包括出种口传感单元、导种管、硅光电池和激光发射模组,检测及控制模块由单片机控制器及信息处理电路、薄膜按键和 OLED 屏幕组成,驱动模块由直流电机、电机驱动壳体、直流电机驱动器和电源组成,固定模块由底座、固定外壳、销钉、电机盖板和电路封装壳组成。排种器整体尺寸如表 1 所示。

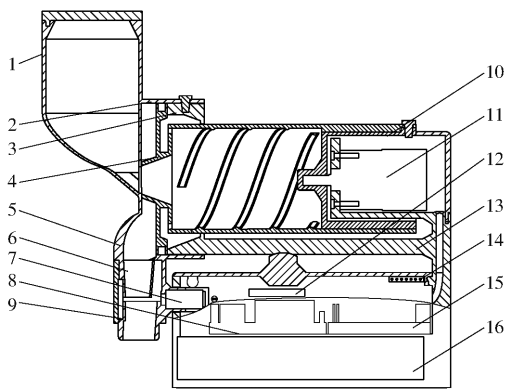


图 1 油菜排种器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of seed metering device for rapeseed

1. 外种箱 2. 端盖 3. 端盖固定座 4. 种箱 5. 出种口传感单元 6. 导种管 7. 激光发射模组 8. 单片机控制器和信息处理电路 9. 硅光电池 10. 电机驱动壳体 11. 直流电机 12. 薄膜按键 13. 底座 14. OLED 屏幕 15. 直流电机驱动器 16. 电源

表 1 油菜排种器主要参数

参数	数值
整体尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	215×73×196
排种频率/Hz	10~63
转速/(r·min ⁻¹)	18~216
工作时间/h	8
播量检测准确率/%	≥98

螺管排种机构采用文献[30]中的油菜螺管式补种器排种原理,文献[31]在此基础上进行改进,结构更为紧凑,功耗更低。螺管排种机构在变量补种装置上进一步优化,增加外种箱,装种时不需要重复拆卸种箱,排种器可持续工作。

排种器工作前,油菜种子沿外种箱内壁及种箱进种口(旋转中心)流入种箱中,通过薄膜按键输入播种信息(单位面积播量、播种机具幅宽、油菜种子千粒质量等),与单片机控制器连接的霍尔传感器实时获取播种机具前进速度信息,单片机控制器根据输入的播种信息和实时获取的前进速度信息确定理论排种频率,实际排种频率由小粒径种子感知模块实时获取,理论排种频率和实际排种频率之差作为单片机控制器输入,由单片机控制器决策出 PWM 占空比,单片机控制器输出 PWM 占空比信号至直流电机驱动器,直流电机驱动器驱动直流电机带动种箱转动,油菜种子随种箱旋转运动,在重力、离心力、种子群相互作用力及种箱内螺纹推力作用下,油菜种子持续从种箱流入端盖固定座,在自身重力、种子群相互作用力、支持力和摩擦力作用下,端盖固定座中的种子不断向底部流动,当螺管旋转至端盖固定座底部时,种子进入种箱螺管内,依靠种子流动和螺管作用,种子随种箱转动甩出,甩出后的种子通过

小粒径种子感知模块,小粒径种子感知模块实时获取种子流信息。整个过程中,OLED 屏幕实时显示播种信息及种子流信息。

1.2 小粒径种子感知模块参数确定

小粒径种子感知模块是油菜排种器的核心模块,用于实时获取小粒径种子播量信息。根据排种器排种过程,当种子从螺管排种机构的种箱螺管流出后,油菜种子进入出种口传感单元,传感器模组完成种子播量信息感知。为使种子有序通过传感区域且提高播量检测精度,要确定传感器模组参数,并对导种管进行结构参数设计,使其能够与传感器模组匹配,减少播量漏记。

1.2.1 感知模块传感器模组参数

小粒径种子感知模块采用薄面激光-硅光电池检测原理^[25],此检测方法能实现对油菜等中小粒径种子的单粒感应,为无接触式传感。核心传感器为激光发射模组和硅光电池。选用受光面为 10 mm×10 mm 正方形的硅光电池,采用对角线区域作为感光区域,即感光区域长度为 14.1 mm。选用发射角度为 30°的激光发射模组,激光发射模组和硅光电池的 水平距离 H 为 23 mm。激光发射模组位于导种管下端面下方,如图 2a 所示。 h 为导种管上端面到下端面距离, O 为激光发射点, α 为激光发射模组角度, H 为薄面激光与硅光电池水平距离, a 为最大内切椭圆长轴长度, b 为最大内切椭圆短轴长度。考虑到排种器总体高度不宜过大且方便传感器模组安装,设定导种管上端面到下端面距离 h 为 10 mm。

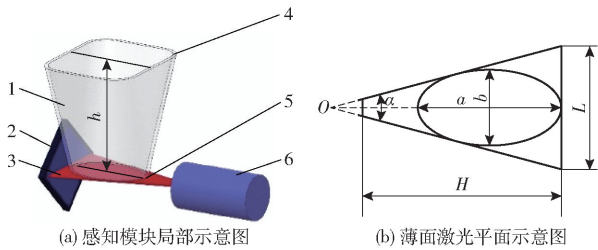


图 2 小粒径种子感知模块示意图

Fig. 2 Structure diagrams of small grain size seed sensing module

1. 导种管 2. 硅光电池 3. 薄面激光 4. 导种管上端面 5. 导种管下端面 6. 激光发射模组

1.2.2 导种管结构参数设计

导种管为小粒径种子感知模块的核心结构,将甩出的种子导入薄面激光传感光层,需尽可能增加无碰撞弹跳种子通过性,设计导种管下端面为闭合光滑曲面。选用最大内切椭圆,如图 2b 所示。最大内切椭圆需保证椭圆与 3 条边相切且椭圆中心位于薄面激光层等腰三角形底边中线上,同时为了保证种子在导种管不堵塞,最大内切椭圆长轴长度 $a \geq$

4D,短轴长度 $b \geq 4D$ (D 为油菜种子粒径, 0.8 ~ 2.2 mm), 即 a 与 b 最小为 8.8 mm。根据上述条件, 最大内切椭圆长轴长度 a 为 16 mm, 短轴长度 b 为 8.8 mm, 有效检测面积为 110.95 mm²。在相同条件下, 最大内切圆半径为 5.4 mm, 有效检测面积为 91.94 mm², 内切椭圆有效检测面积大于最大内切圆。

1.3 转速-排种频率测定

为给后续排种器控制提供依据, 进行转速-排种频率关系测定。测定试验所用的主要设备为油菜排种器、SLY-C 型数粒仪、SW6234C 型激光转速测速仪和电子天平等。测试系统如图 3 所示。

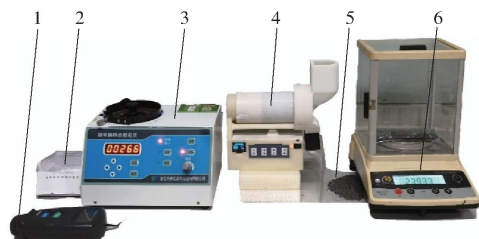


图3 油菜排种器测试系统

Fig. 3 Test systems of seed metering device for rapeseed

1. 激光转速测速仪 2. 接种盒 3. 数粒仪 4. 油菜排种器 5. 塑封袋 6. 电子天平

利用检测及控制模块产生频率为 500 Hz 的 PWM 信号占空比, 通过薄膜按键输入来获得不同 PWM 信号占空比, 检测及控制模块产生的 PWM 信号占空比作为驱动模块的输入信号 (500 Hz 时直流电机达到最大功率), 种箱外侧壁上粘有反光胶布, 测量时将测速仪和种箱放置于同一水面, 可获取当前排种器转速。同时, PWM 信号占空比测量值在 OLED 显示屏上显示。

转速-排种频率标定测试时, 通过薄膜按键设定 PWM 信号占空比范围为 13% ~ 100% (当 PWM 信号占空比低于 13% 时, 因电机转速过低, 排种器排种工作不稳定), 每 1% 为 1 个水平进行转速-排种频率标定测试, 每次工作 1 min, 在出种口套有塑封袋, 用来收集每次排出的油菜种子, 使用电子天平称量并人工计数排种总量, 随后计算出排种频率。每个水平重复试验 3 次, 取平均值, 记录不同水平下排种器转速、排种频率。

图 4 为油菜排种器在占空比为 13% ~ 100% 时, 排种器转速-排种频率测定试验结果。如图 4a 所示, 油菜排种器转速随 PWM 信号占空比增大而增大, 经过曲线拟合后, 得到转速 r 与 PWM 信号占空比 z 的函数关系式为 $r = 0.0002z^3 - 0.0733z^2 + 7.7139z - 68.359$, 决定系数为 0.99。由图 4b 可知, 排种器排种频率随转速增加有增大的趋势, 随后

趋于稳定。油菜排种器转速位于 18 ~ 34 r/min 范围内, 此时转速较低, 排种频率不稳定。当转速位于 34 ~ 200 r/min 区间内, 排种器排种频率 i 与转速 r 有较高的线性度, 经过线性拟合后转速-排种频率特性曲线关系式为 $i = 0.312r + 1.475$ ($34 \text{ r/min} \leq r \leq 200 \text{ r/min}$), 决定系数为 0.99。当转速高于 200 r/min 时, 1 min 内排种器排种频率趋于稳定。

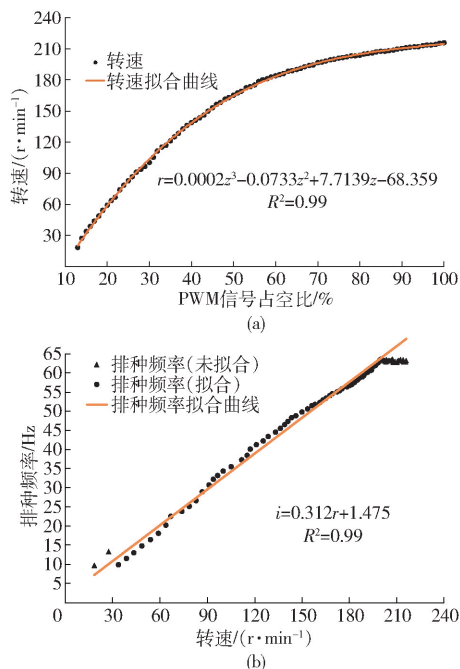


图4 油菜排种器排种频率测定结果

Fig. 4 Test result of seeding frequency of seed metering device for rapeseed

整个试验过程中, 未出现油菜种子破损情况。油菜排种器转速在 34 ~ 200 r/min 范围内, 排种频率与转速有良好的线性相关度。

1.4 播量准确率测试

为给后续排种器控制系统提供依据, 进行播量准确率测试。测试所用的设备为油菜排种器和 SLY-C 型数粒仪。

测试时, 在油菜排种器出种口处套上塑封袋。通过按键输入设定排种频率, 检测及控制模块根据转速-排量关系特性曲线将指定排种频率转变为不同 PWM 信号占空比, 控制直流电机对应转速, 直流电机带动排种器工作, 以此获得不同排种频率, 工作 1 min 后, 排种器停止转动。设定排种频率、排种时间和检测的排种总量可通过 OLED 显示屏实时显示。设定的排种器排种频率为 10 ~ 60 Hz (油菜排种器正常工作排种频率为 10 ~ 64 Hz), 以 5 Hz 为一个水平, 收集 1 min 内排种总量并对种子进行人工计数, 记录检测的排种总量和实际排种总量, 每个排种频率水平下重复试验 3 次, 试验结果取平均值, 如表 2 所示, 油菜排种器在排种频率 10.1 ~ 60.3 Hz

范围内,播量检测准确率大于等于 87.05%。同时随排种频率增加,播量准确率下降。基于薄面激光-硅光电池的检测原理进行分析,由于薄面激光传感光层面积有限,当多粒种子同时落下穿过薄面激光传感光层时,会被记为一粒种子,且随着种子排种频率增大,出现这种现象的概率随之增大,导致播量检测准确率随排种频率增加有降低的趋势。

表 2 不同排种频率下排种器播量检测准确率试验结果

Tab.2 Test results of detection at different seeding frequencies of seed metering device

设定排种 频率/Hz	检测粒数	实际粒数	平均排种 频率/Hz	准确率/ %
10	602	604	10.1	99.67
15	902	907	15.1	99.48
20	1 189	1 211	20.2	98.18
25	1 464	1 516	25.3	96.58
30	1 743	1 831	30.5	95.21
35	1 996	2 128	35.5	93.81
40	2 219	2 406	40.1	92.23
45	2 487	2 735	45.6	90.95
50	2 716	3 032	50.5	89.59
55	2 922	3 308	55.1	88.32
60	3 150	3 619	60.3	87.05

根据播量准确率随排种频率变化的现象构建排种器播量检测准确率补偿模型,使结果尽可能接近真实排种频率,为控制系统提供更精确的理论依据。补偿模型为

$$n' = k_i n \tag{1}$$

式中 n' ——修正后检测粒数,粒
 k_i ——修正系数
 n ——修正前检测粒数,粒

k_i 随着检测排种频率 i 变化而变化。修正系数 k_i 由多次试验来获取。通过大量准确率测试获取播量检测准确率随检测排种频率变化特性曲线,如图 5 所示。

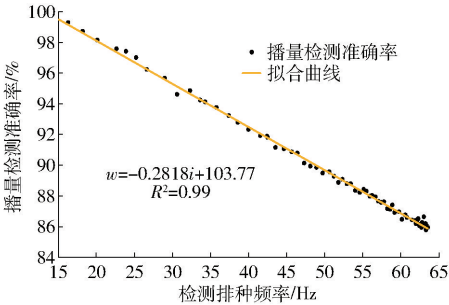


图 5 播量检测准确率随检测排种频率变化特性曲线

Fig.5 Characteristic curve of accuracy with detected seeding frequency changing

由图 5 可知,播量检测准确率 w 与检测排种频率 i 拟合曲线方程为 $w = f(i) = -0.2818i + 103.77$

($i \geq 15$ Hz)。若检测排种频率低于 15 Hz 时,不使用补偿模型。

修正系数 k_i 与播量检测准确率 w 关系式为

$$k_i = w^{-1} = f(i)^{-1} \tag{2}$$

2 控制系统总体设计

2.1 硬件系统

油菜排种器集成薄膜按键、0.96 英寸 OLED 显示屏、直流电机驱动器、霍尔传感器、直流电机、单片机控制器和信息处理电路及 nRF 无线收发器、激光发射模组、硅光电池和电源于一体。控制系统硬件实物如图 6 所示。

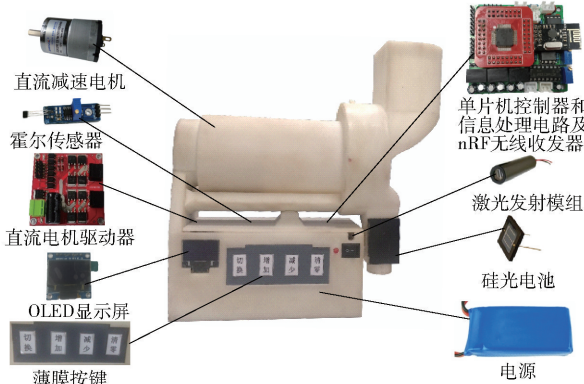


图 6 油菜排种器控制系统硬件实物图

Fig.6 Physical diagram of control system hardware of seed metering device for rapeseed

油菜排种器控制系统结构框图如图 7 所示,由检测及控制模块、nRF24L01 无线收发器、电源、霍尔传感器、OLED 显示屏、薄膜按键、直流电机和小粒径种子感知模块组成。采用 MSP430F149 单片机为排种器检测及控制模块的主控制器。

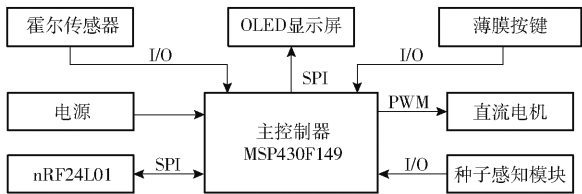


图 7 油菜排种器控制系统结构框图

Fig.7 Structure block diagram of seed metering device for rapeseed

工作时,通过薄膜按键输入播种信息(机具幅宽、单位面积播量、油菜千粒质量等),利用霍尔传感器实时获取磁钢信息,检测及控制模块将磁钢信息转化成前进速度信息,并根据输入的播种信息和前进速度信息计算理论排种频率,小粒径种子感知模块实时获取种子信息并传输至检测及控制模块,检测及控制模块将实时的种子流信息转换成实际排种频率,与理论排种频率作差并转化为转速信息作

为控制器输入,控制驱动模块带动螺管排种机构进行播种工作。装置工作过程中,OLED显示屏实时显示播种信息及种子流信息,nRF无线收发器同时

实时传输数据至显示终端。检测模块电路包括双级放大电路、比较电路、单稳态触发电路^[27]。油菜排种器控制系统电路图如图8所示。

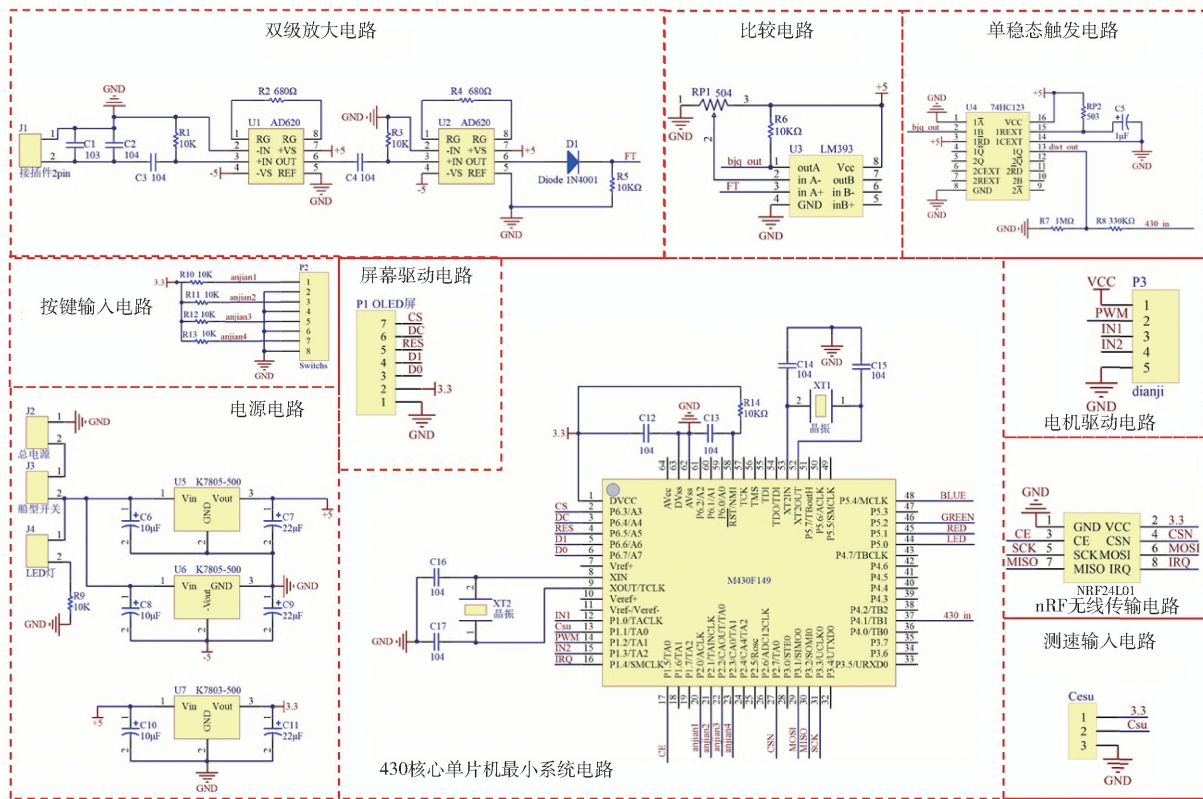


图8 油菜排种器控制系统电路图

Fig. 8 Diagram of seed metering device for rapeseed control system circuit

2.2 控制程序设计

油菜排种器控制器以实时检测排种频率作为反馈信号,控制驱动模块中的直流电机带动排种器进行工作。图9为油菜排种器排种频率控制系统程序流程图。

控制系统开始工作时,完成系统初始化工作,通过霍尔传感器测得实时磁钢信息转化为播种机具前进速度,利用小粒径种子感知模块实时获取排种器排出的种子流信息,得到实时排种频率信息,同时,通过薄膜按键输入来设定播种信息(单位面积播量、机具幅宽、油菜种子千粒质量等)。根据获得的实时播种机具前进速度信息和设定的播种信息可确定理论排种频率,当播种信息改变时,更新理论排种频率。将理论排种频率与实际排种频率计算的差值 $e(t)$ 作为PD控制器的输入,计算出控制量 $u(t)$ 。为使电机稳定工作,当控制增量 $(u(t) - u(t-1))$ 绝对值高于10时,控制增量绝对值取10。控制系统根据控制量生成目标转速,进而输出PWM占空比至直流电机驱动器,驱动电机转动并使螺管排种机构工作,达到目标排种频率,从而实现油菜排种器的排种频率控制,控制周期为0.5 s。图10为油

菜排种器排种频率控制系统框图。

同时为防止小粒径种子感知模块获取的实时排种频率可能出现大幅度变化,导致在播种时频繁进行电机转速调整,小粒径种子感知模块获取的排种频率采用加权平均法,分别对4个时刻的排种频率进行加权平均,采样数据周期为0.5 s,作为控制系统输入。计算公式为

$$i' = 0.4i_t + 0.3i_{t-0.5} + 0.2i_{t-1} + 0.1i_{t-1.5} \quad (3)$$

式中 i' ——反馈排种频率,Hz

i_t ——当前排种频率,Hz

$i_{t-0.5}$ ——前0.5 s排种频率,Hz

i_{t-1} ——前1 s排种频率,Hz

$i_{t-1.5}$ ——前1.5 s排种频率,Hz

根据试凑法先调节比例控制系数 k_p ,最后调节微分时间常数 T_d ,选择能够使控制系统调节时间和超调量尽量小的 k_p 和 T_d 作为控制系统参数,最终确定 $k_p = 0.78, T_d = 0.85$ 。

3 性能试验

3.1 台架试验

为进一步验证排种器工作性能,开展播量检测

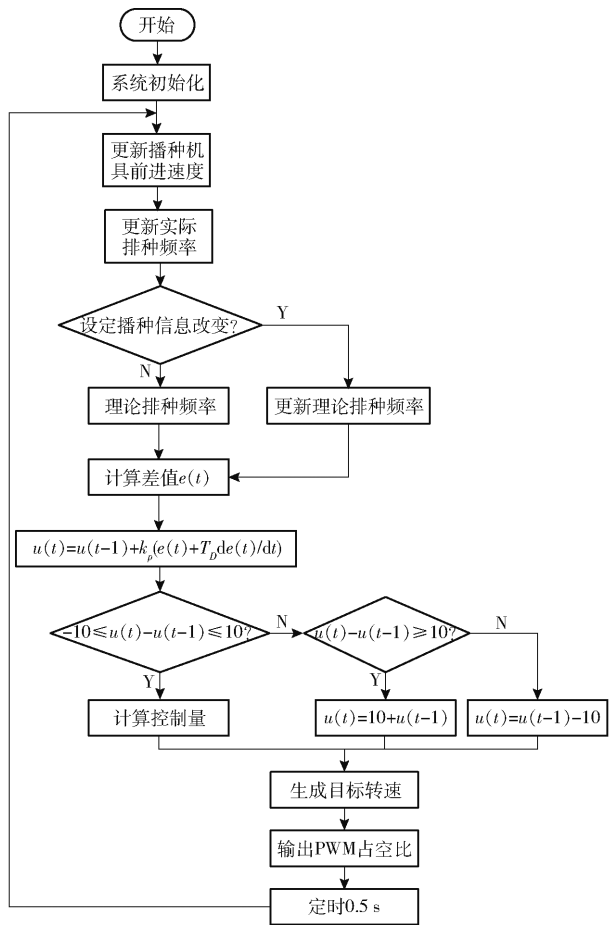


图9 油菜排种器排种频率控制系统程序流程图

Fig.9 Program flow chart of seeding frequency control system for seed metering device for rapeseed

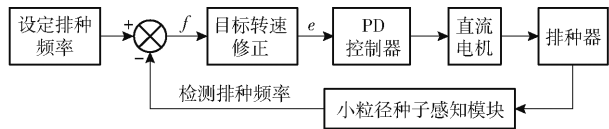


图10 油菜排种器排种频率控制系统框图

Fig.10 Control block diagram of seeding frequency system for seed metering device for rapeseed

准确率及排量稳定性台架试验。

试验材料选用中双11号油菜种子(试验前人工筛选出破碎的种子),油菜种子千粒质量为4.67 g,平均粒径为1.92 mm^[32]。主要试验设备有油菜排种器、浙江托普SLY-C型数粒仪、转速控制系统、步进电机、均布磁钢的水平圆盘、支架、电子天平(福州华志科学仪器有限公司,精度0.001 g)、速为SW6234C型激光转速测速仪等。台架试验装置如图11所示。

3.1.1 播量检测准确率试验

为验证补偿模型,进行播量检测准确率试验。通过按键输入控制单片机进而控制排种器在不同排种频率下工作。设定排种器排种频率为10~60 Hz,以5 Hz为一个水平,每组试验工作时间为1 min,每个水平重复3次,用塑封袋收集排出的种子并进行

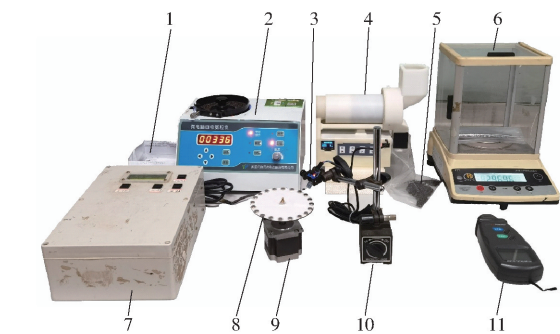


图11 油菜排种器台架试验装置

Fig.11 Bench test equipment of seed device for rapeseed

1. 接种盒 2. 数粒仪 3. 霍尔传感器 4. 油菜排种器 5. 塑封袋 6. 电子天平 7. 转速控制系统 8. 水平圆盘 9. 步进电机 10. 支架 11. 激光转速测速仪

计数,将检测的排种总量和实际排种总量进行记录,取平均值。表3为采用补偿模型后试验结果。

表3 采用补偿模型后不同排种频率下播量检测准确率试验结果

Tab.3 Test results of seeding quantity detection accuracy at different seeding frequencies of seed metering device

排种频率/Hz	检测粒数	实际粒数	检测准确率/%
10.1	603	605	99.67
15.2	917	913	99.52
20.3	1 206	1 216	99.15
25.2	1 504	1 512	99.46
30.6	1 821	1 833	99.33
35.4	2 136	2 124	99.44
40.0	2 374	2 401	98.87
45.5	2 707	2 731	99.12
50.6	2 997	3 035	98.75
55.3	3 337	3 315	99.34
60.4	3 617	3 624	99.80

由表3可知,油菜排种器在排种频率10.1~60.4 Hz范围内,修正后准确率大于等于98.75%,为后续排种频率反馈控制提供了依据。

3.1.2 排量稳定性试验

试验目的在于评估排种器在不同条件下工作稳定性和可靠性,为后续田间试验提供支撑。排量稳定性检验所用的设备为油菜排种器、SLY-C型数粒仪、激光转速测速仪、转速控制系统、步进电机、水平圆盘和电子天平等。试验以NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》中排种量变异系数为评价依据(总排种量稳定性变异系数小于等于1.3%)。

稳定性试验中,在油菜排种器出种口安装塑封袋,收集出种口下落的种子。均布磁钢的圆盘通过联轴器固定于步进电机动力输出轴上,圆盘与电机轴同轴心。将连接排种器的霍尔传感器通过支架固

定于步进电机阵列磁钢上方,获取圆盘转速,同时在圆盘上贴反光胶布,利用激光测速仪测量圆盘转速。通过薄膜按键输入播种信息,排种器根据模拟转盘转速进行播种工作。分别设定步进电机转速为 25、30、35、40、45、50 r/min,共计 6 个水平,为了尽可能模拟田间工况,将圆盘转速 r_d 与理论排种频率 f 关系设定为 $f = 1.5r_d - 15$,设定圆盘转速 r_d 与对应的机具田间作业速度 v 关系为 $v = 0.04r_d - 0.6$,在步进电机工作范围内,理论排种频率范围为 15 ~ 60 Hz,播种机理论前进速度为 0.4 ~ 1.4 m/s。

首先,在圆盘转速恒定情况下进行试验,每个水平重复 3 次,每次试验时间为 1 min。最后,在圆盘转速变化情况下开展试验,每次试验设定 3 个转速,每个转速工作时间均为 20 s,排种时间共计 1 min,每组试验重复 3 次,将塑封袋收集的种子称量后进行人工计数,排量稳定性试验结果如表 4 所示。表中排种量稳定性变异系数是指 3 次试验排种粒数的标准差与平均值比值,播种量稳定性变异系数为 3 次试验的排种质量的标准差与平均值的比值。

表 4 排种器排量稳定性试验结果

Tab.4 Test results of seeding stability for seed metering device

工作条件	圆盘转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	排种 量/粒	播种 量/g	排种量稳 定性变异 系数/%	播种量稳 定性变异 系数/%
转速恒定	25	1 354	6.333	1.16	0.93
	30	1 819	8.512	1.03	0.76
	35	2 280	10.647	0.86	0.61
	40	2 745	12.083	0.67	0.48
	45	3 220	15.045	0.52	0.35
	50	3 686	17.223	0.32	0.22
转速变化	25/35/45	2 222	10.373	0.91	0.73
	25/30/40	2 853	13.177	0.84	0.69
	30/40/50	2 660	12.433	0.72	0.61
	45/35/25	2 285	10.677	0.78	0.62
	50/40/35	2 883	13.487	0.69	0.56
	50/40/30	2 742	12.804	0.66	0.49

注:25 是指水平圆盘在 25 r/min 条件下工作 1 min,理论排种量为 1 350 粒;25/35/45 是指水平圆盘在 25、35、45 r/min 条件下各工作 20 s,理论排种量为 2 250 粒。

由表 4 可知,排种器在圆盘恒定转速条件下,排种量稳定性变异系数不高于 1.16%,播种量稳定性变异系数不高于 0.93%。圆盘不同转速情况下,排种量稳定性变异系数不高于 0.91%,播种量稳定性变异系数不高于 0.73%。综上,排种器在不同工况下排种量稳定性变异系数均较好,满足油菜播种质量要求。

3.2 田间试验

为验证油菜排种器田间作业效果,于 2020 年 9 月在荆州监利市试验示范基地开展田间播种试验。选用东风井关 T954 - PVCY 型轮式拖拉机为动力,配套 2BYL - 8 型油菜直播机。油菜排种器固定于肥箱支架上端,将均布磁钢的水平圆盘固定于地轮上,安装时保证地轮与水平圆盘同轴心,同时与排种器测控系统连接的霍尔传感器安装在磁钢上方,用于获取水平圆盘的实时转速。导种软管安装于排种器出种口下方,在开沟器出种口处套塑封袋,田间试验如图 12 所示。



图 12 田间播种试验

Fig.12 Field test of sowing

1. 地轮 2. 霍尔传感器 3. 水平圆盘 4. 油菜排种器 5. 东风井关 T954 - PVCY 型拖拉机 6. 2BYL - 8 型油菜直播机 7. 导种软管 8. 塑封袋

试验以播量检测准确率、排种量稳定性变异系数及 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》中播种量误差率为试验依据(播种量误差率小于等于 10%),播种量误差率计算式为

$$\eta_p = \frac{P - P_0}{P} \times 100\%$$

(4)

其中

$$P = \frac{10\,000p}{50\omega_1}$$

(5)

式中 P ——实际单位面积播种量, g/hm^2
 p ——播种机行走 50 m 的排种总质量,g
 ω_1 ——播种机幅宽,m
 η_p ——播种量误差率,%
 P_0 ——当地农艺要求的理论单位面积播种量, g/hm^2

根据农业农村部《2018—2019 年度冬油菜生产指导意见》,设定单位面积播量 6 000 g/hm^2 。在拖拉机慢 I 挡至慢 V 挡进行试验,在每个挡位下进行 3 次试验,每次前进距离为 50 m。记录油菜排种器检测的排种总量和播种时间,并通过塑封袋收集每次试验排出的油菜种子,后期人工计数。试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,田间试验时,油菜排种器在排种频率 10.27 ~ 40.95 Hz 范围内,油菜种子监测误差不

表 5 油菜排种器田间试验结果

Tab.5 Field test results of seed metering device for rapeseed

挡位	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	播种时间/ s	平均排种 频率/Hz	检测 总粒数	实际 总粒数	播量检测 准确率/%	播种量/g	播种量误差 率/%	排种量稳定性 变异系数/%
慢 I	0.35	143	11.34	1 614	1 621	99.56	7.561	0.81	0.98
	0.37	136	11.89	1 606	1 617	99.34	7.548	0.64	
	0.32	155	10.27	1 587	1 592	99.68	7.439	-0.81	
慢 II	0.56	90	17.99	1 608	1 619	99.35	7.562	0.83	0.82
	0.54	94	17.32	1 619	1 628	99.43	7.598	1.31	
	0.58	86	18.63	1 590	1 602	99.26	7.488	-0.16	
慢 III	0.74	68	24.10	1 631	1 639	99.53	7.651	2.00	0.73
	0.71	71	22.86	1 615	1 623	99.48	7.579	1.05	
	0.72	70	23.09	1 610	1 616	99.64	7.551	0.68	
慢 IV	0.97	52	31.12	1 608	1 618	99.41	7.551	0.68	0.63
	1.01	50	32.42	1 610	1 621	99.35	7.571	0.95	
	0.97	52	31.48	1 625	1 637	99.28	7.635	1.80	
慢 V	1.20	42	39.24	1 627	1 648	98.75	7.691	2.55	0.52
	1.25	40	40.95	1 616	1 638	98.64	7.652	2.03	
	1.22	41	39.78	1 608	1 631	98.59	7.617	1.56	

超过 1.41%,检测准确率达到 98.59%,播种量误差率不高于 2.55%,排种量稳定性变异系数不大于 0.98%,满足 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》对排种量稳定性变异系数及 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》对播种量误差率的要求。

4 结论

(1)设计了基于排种频率实时反馈的油菜排种器,排种器由螺管排种机构、小粒径种子感知模块、检测及控制模块和驱动模块等组成。检测及控制模块根据设定的播种信息及霍尔传感器测量的磁钢信

息确定理论排种频率,将其与小粒径种子感知模块获取实际排种频率的差值,经过检测及控制模块转换为转速差值,并作为控制器输入,控制器决策出对应的占空比,作用于驱动模块带动螺管排种机构进行排种工作。

(2)油菜排种器台架试验表明,在排种频率 10.1~60.4 Hz范围内,检测准确率不低于 98.75%,不同转速下的排种量稳定性变异系数低于 1.16%。油菜排种器田间试验表明,在拖拉机不同前进速度情况下,播种量误差率不超过 2.55%,排种量稳定性变异系数不超过 0.98%,满足油菜播种质量要求。

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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[2] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:48-85.

[3] 丁幼春,张莉莉,杨军强,等. 油菜精量直播机播种监测系统传感装置改进及通信设计[J]. 农业工程学报,2018,34(14):19-26.
DING Youchun, ZHANG Lili, YANG Junqiang, et al. Sensing device improvement and communication design on sowing monitoring system of precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 19-26. (in Chinese)

[4] John Deere N530F [EB/OL]. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/n530f-separate-fertilizer-placement-air-drill/>.

[5] 2000 Series Early Riser Planters [EB/OL]. <https://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/planting-seeding/2000-series-early-riser-planter>.

[6] 气力式精量播种机 Solitaire 12K [EB/OL]. <http://www.lemken.cn/Proinfo.aspx?id=148##Menu=ChildMenu4>.

[7] 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 & Electronics in Agriculture, 2018, 144: 71-79.

[8] WaveVision 监测器 [EB/OL]. <http://www.precision-planting.com/Products/WaveVision/Default.aspx>.

[9] JOHN Deere. Monitoring and documentation [EB/OL]. (2015-08-04)[2016-01-08]. http://www.deere.com/en_US/parts/parts_by_industry/ag/seeding/monitoring/monitoring. Page.

[10] Sistema Full Semina 精准播种系统[EB/OL]. https://www.-mcelectronica.it/it/prodotti/semina/semina-di-precisione/full-semina_272c28.html.

[11] 吴福通. 正负气压组合式油菜籽精量直播排种器的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2007.

- WU Futong. Research on positive and negative pressure combination precision metering device for rape seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [12] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68–73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012. (in Chinese)
- [13] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9–17.
LI Zhaodong, LEI Xiaolong, CAO Xiuying, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 9–17. (in Chinese)
- [14] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10–18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feed device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)
- [15] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210207&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.007. (in Chinese)
- [16] 张青松, 余琦, 王磊, 等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 47–54, 64.
ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 47–54, 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200605&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.005. (in Chinese)
- [17] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51–59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design test of electronic control seeding system for maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)
- [18] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 33–41.
CHEN Liqing, XIE Binbin, LI Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 33–41. (in Chinese)
- [19] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42–49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.005. (in Chinese)
- [20] 赵天才, 余洪锋, 郝向泽, 等. 基于 PID 算法的水稻直播机播量控制系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 118–125.
ZHAO Tiancai, YU Hongfeng, HAO Xiangze, et al. Design and experiment of sowing control system for rice direct seeder based on PID algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 118–125. (in Chinese)
- [21] 杨硕, 王秀, 高原源, 等. 电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 57–67.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of motor driving bus control system for corn vacuum seed meter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 57–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)
- [22] 周利明, 王书茂, 张小超, 等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 16–21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16–21. (in Chinese)
- [23] 周利明, 李树君, 张小超, 等. 基于电容法的棉籽棉质量流量检测[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 47–52.
ZHOU Liming, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of seed cotton mass flow based on capacitance approach[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 47–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.008. (in Chinese)
- [24] 陈建国, 李彦明, 覃程锦, 等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 66–74.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat-planter seeding quantity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 66–74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190107&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.007. (in Chinese)

- using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347–356.
- [21] 雷小龙, 杨文浩, 杨龙君, 等. 油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 54–64. LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 54–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002007&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007. (in Chinese)
- [22] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54–66. SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54–66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)
- [23] 陈玉龙. 基于有序充种方式的滚筒鸭嘴穴播器的设计研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015. CHEN Yulong. Design and research of the duckbill pattern roller dibbler based on characteristics of ordered system[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [24] 王吉奎, 付威. 脱绒棉种的物料学特性研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(1): 169–172. WANG Jikui, FU Wei. The study of delinted cottonseed physical characteristics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1): 169–172. (in Chinese)
- [25] 胡梦杰, 周勇, 汤智超, 等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 175–180. HU Mengjie, ZHOU Yong, TANG Zhichao, et al. Mechanical properties of the delinted and coated cottonseed[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(1): 175–180. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 82 页)

- [25] 杨硕, 王秀, 高原源, 等. 玉米精密播种粒距在线监测与漏播预警系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 17–24, 35. YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design of on-line seed spacing monitoring and miss seeding warning system for maize precision planting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 17–24, 35. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20210302&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210302&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.002. (in Chinese)
- [26] 丁幼春, 杨军强, 朱凯, 等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 29–36. DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29–36. (in Chinese)
- [27] 丁幼春, 朱凯, 王凯阳, 等. 薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 12–20. DING Youchun, ZHU Kai, WANG Kaiyang, et al. Development of monitoring device for medium and small size seed flow based on thin surface laser-silicon photocell[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 12–20. (in Chinese)
- [28] 丁幼春, 王凯阳, 杜超群, 等. 高通量小粒径种子流检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 20–28. DING Youchun, WANG Kaiyang, DU Chaoqun, et al. Design and experiment of high-flux small-size seed flow detection device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 20–28. (in Chinese)
- [29] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11–21. DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 11–21. (in Chinese)
- [30] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜, 等. 油菜籽漏播螺旋式补种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 16–24. DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on spiral-tube reseeding device for loss sowing of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 16–24. (in Chinese)
- [31] 丁幼春, 杨军强, 张莉莉, 等. 油菜精量排种器变量补种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 27–36. DING Youchun, YANG Junqiang, ZHANG Lili, et al. Design and experiment on variable reseeding system for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 27–36. (in Chinese)
- [32] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 10–17. LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum simulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10–17. (in Chinese)