

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.002

分体组合振动式超级稻精量播种匀种装置设计与试验

朱承天 刘彩玲 李方林 贾旋 曹铭健 王悦伟
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对超级稻育秧播种环节振动式排种器匀种性能差,难以实现精量播种的问题,设计一种分体组合振动式精量播种匀种装置,并提出了一种基于图像识别的振动匀种控制方法。对振动板关键结构参数:储种盒深度和转向槽角度进行匀种性能单因素离散元仿真分析,结果表明:输送阶段不同时间和空间匀种均匀性变异系数和振动板出口处供种均匀性变异系数随储种盒深度增大而增大,随转向槽角度增大先减小后增大,并确定储种盒深度和转向槽角度分别为 12 mm 和 48°。设计并搭建了种子流图像检测与控制系统,压电振动单体和匀种单元图像检测和整流验证试验表明,当检测到图像中白色低像素占比低于 20%,经整流后,白色像素占比可满足设计要求。对分体组合振动式播种匀种装置进行不同匀种电压和具有不同长宽比的 3 种超级稻品种进行播种性能试验。试验结果表明,当工作电压为 150 ~ 200 V 时,其播种合格率不小于 93.47%,漏播率不大于 1.00%;3 种水稻种子播种合格率均不小于 94.17%,漏播率不大于 0.67%。该装置能够满足超级稻精量播种要求,且对不同超级稻种子具有较好的适应性。

关键词: 超级稻; 匀种装置; 离散元法; 图像识别

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0027-10 **OSID:** 

Simulation and Experiment of Piezoelectric Vibration Super Rice Precision Seeding and Unifying Device

ZHU Chengtian LIU Cailing LI Fanglin JIA Xuan CAO Mingjian WANG Yuewei
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A split and combined vibration seeding and leveling device was designed to address the problem of poor seeding performance of the vibrating seed metering device in the super rice seedling cultivation and sowing process that made it difficult to achieve precision seeding, and a vibration seed leveling control method based on image recognition was proposed. The single factor discrete element simulation analysis of the key structural parameters of the vibration plate was carried out. The results showed that the variation coefficient of the uniformity of the vibration plate and the variation coefficient of the supply uniformity at the exit of the vibration plate was increased with the increase of depth of box. With the increase of angle of steering groove, the depth of the seed storage box and the angle of the steering groove were determined to be 12 mm and 48°, respectively. A seed stream image detection and control system was designed and built. The test of piezoelectric vibration monomer and homogenizing unit image detection and rectification showed that when the proportion of white low pixels in the detected image was less than 20%, after rectification, the proportion of white pixels could meet the design requirements. The results showed that the qualified rate was not less than 93.47% and the missed rate was not more than 1.00% when the operating voltage was 150 ~ 200 V. The qualified sowing rate of the three rice seeds was not less than 94.17%, and the missing sowing rate was not more than 0.67%. The device can meet the requirements of precision sowing of super rice and had good adaptability to different super rice seeds.

Key words: super rice; seed leveling device; discrete element method; image recognition

收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61511012)

作者简介: 朱承天(2000—),男,博士生,主要从事水稻生产智能化装备研究,E-mail: 2061838014@qq.com

通信简介: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: cailingliu@163.com

0 引言

水稻是重要的粮食作物,其中超级稻^[1-3]分蘖能力强,单产高,为我国粮食安全做出巨大贡献^[4-7]。单株栽插是目前超级稻种植亟待解决的关键技术^[8],提高工厂化穴盘育秧播种环节超级稻的单粒播种精度是确保单株栽植率的重要前提^[9]。

排种器是实现穴盘育秧精量播种的关键。目前水稻穴盘育秧精量播种排种器主要有机械式、气力式和振动式3种,机械式排种器以型孔轮为核心工作部件^[10-12],主要适合4~8粒/穴的撒播或3~6粒/穴的常规稻穴播作业;气力式排种器以吸盘或气吸滚筒为核心工作部件^[13-15],对纺锤形非球形水稻种子播种精度难以保证;振动式排种器通常将外槽轮供种和振动板匀种相结合,利用振动使板上种群间相互碰撞、离散完成匀种过程,特别对于流动性差的非圆水稻种子,易于在摩擦振动作用下形成有序均匀种子流,振动排种器可大大改善种子分布的均匀性^[16-19]。但现有振动匀种机构通常采用一体式多通道振动槽板,槽板各位置振型存在差异,特别是低播量下更降低了排种器振动匀种效果。

针对传统振动式排种器一体式槽板的通道间匀种性能差异较大的问题,提出一种分体组合式并不同步振动匀种方法,结合水稻种子纺锤形的外形特征,将振动输送技术、图像识别与控制技术相结合,通过仿真和试验进行参数分析与优化,并搭建超级杂交稻振动匀种装置,以提升振动式排种器的振动匀种性能,为我国超级杂交稻单粒精播排种器研发提供技术支撑。

1 分体组合振动式精量播种匀种装置结构与工作原理

分体组合振动式超级稻精量播种匀种装置(图1)与12×25的水稻育秧穴盘配套使用,其结构主要由机架、传送带、种箱、秧盘、计算机、摄像头、数字调频压电振动送料控制器、单片机和3组匀种单元分体并联组合而成。每组匀种单元包括由4个振动单体组成的4列输送振动板、4片弹簧板片、4个压电振子和4个连接座;每组匀种单元正上方中间位置安装摄像头,通过机器视觉检测各组种子在匀种单元上的分布情况,为振动板控制参数选择提供依据。

其工作原理为:槽轮电机转动,带动槽轮排种,种子落入各匀种单元的输送振动板上,压电振子在压电片逆压电效应下产生振动并通过弹簧片传递到输送振动板,在板上槽形的约束下实现振动输送种子,完成稻种姿态转变,实现由多到少至单粒有序排

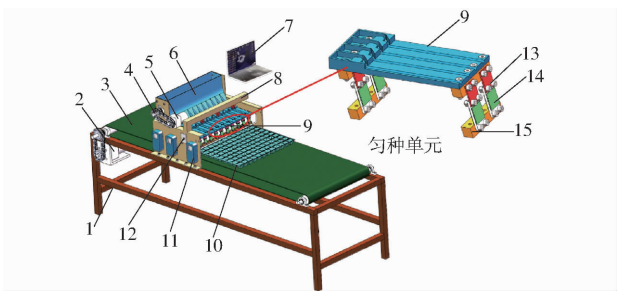


图1 分体组合振动式精量播种匀种装置结构图
Fig. 1 Structure diagram of split and combined vibration seeding and leveling device

1. 机架 2. 传送带电机 3. 传送带 4. 槽轮 5. 槽轮电机 6. 种箱 7. 计算机 8. 摄像头 9. 4列输送振动板 10. 秧盘 11. 数字调频压电振动送料控制器 12. 单片机 13. 弹簧片 14. 压电振子 15. 连接座

列,落入秧盘上,完成播种过程。同时根据摄像头的图像数据,实现对各匀种单元输送振动板上种子流匀种情况的实时监控,并通过控制器调节压电振子的输入电压,提高种子均匀性。

以压电振动单体为研究对象(图2),研究水稻芽种在匀种装置振动板上的运动规律。压电振动单体包括单片机、底座、连接座、压电振子、单列输送振动板、摄像头、数字调频压电振动送料控制器、计算机和弹簧片组成。

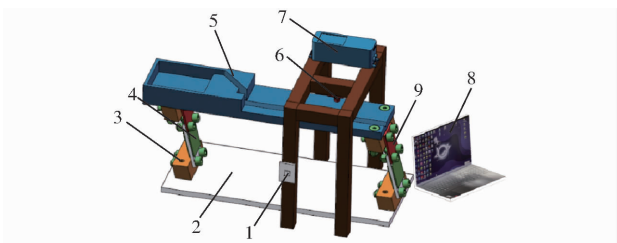


图2 压电振动单体结构示意图
Fig. 2 Schematic of piezoelectric vibration monomer structure

1. 单片机 2. 底座 3. 连接座 4. 压电振子 5. 单列输送振动板 6. 摄像头 7. 数字调频压电振动送料控制器 8. 计算机 9. 弹簧片

2 压电振动单体单列输送振动板仿真优化

单列输送振动板(以下简称振动板)包括储种盒、转向槽和V形槽(图3),根据前期研究,储种盒深度、转向槽角度对匀种性能影响显著,为进一步探究其对芽种单列输送的影响,在前期设计^[20-21]基础上以超级稻深两优5814芽种为研究对象进行储种盒深度、转向槽角度对匀种性能的单因素离散元仿真试验优化。

2.1 EDEM 仿真模型建立

水稻芽种模型如图4所示,包括23个基础颗粒球。振动板材料为PLA,仿真参数如表1所示^[20]。

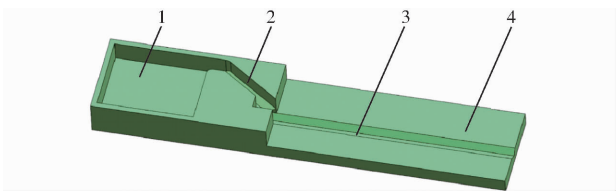


图 3 单列输送振动板结构图

Fig. 3 Single row conveying vibratory plate structure

1. 储种盒 2. 转向槽 3. V 形槽 4. 振动板主体

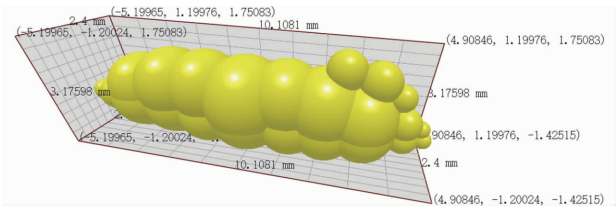


图 4 芽种仿真模型

Fig. 4 Bud seed simulation model

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
芽种泊松比	0. 25
芽种密度/(kg·m ⁻³)	1 270
芽种剪切模量/MPa	108
PLA 泊松比	0. 35
PLA 密度/(kg·m ⁻³)	1 280
PLA 剪切模量/MPa	4 000
芽种- PLA 碰撞恢复系数	0. 442
芽种- PLA 静摩擦因数	0. 334
芽种- PLA 滚动摩擦因数	0. 010
芽种-芽种碰撞恢复系数	0. 452
芽种-芽种静摩擦因数	0. 482
芽种-芽种滚动摩擦因数	0. 048

水稻种子质量影响振动板振动模态和种子输送均匀性。建立振动板仿真模型(图 5, α 为转向槽角度), 为确保振动板上水稻种子质量稳定, 在振动板右侧种子出口处建立一个 Grid Bin Group, 通过仿真预试验记录振动板每秒排出的种子数量, 并将颗粒工厂中水稻种子生成数量与之对应。

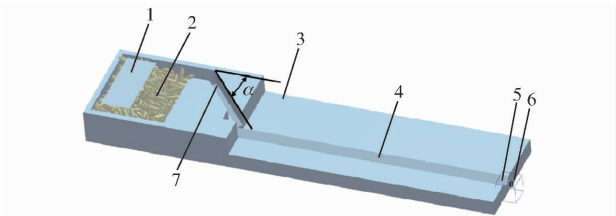


图 5 单列输送振动板仿真模型

Fig. 5 Simulation model of single row conveying vibratory plate

1. 颗粒工厂 2. 储种盒 3. 单列输送振动板 4. V 形槽 5. 出口槽 6. Grid Bin Group 7. 转向槽

2.2 试验设计与评价指标

在前期研究基础上设计储种盒深度为 8 ~ 12 mm,

转向槽角度为 40° ~ 56°, 压电振子振动方向角为 29°; 振动板振动参数设置为高频小振幅, 前期预试验结果表明高频小振幅下的排种过程不会产生种子破碎现象, 确定振动板振动频率为 125. 55 Hz, 振幅为 0. 12 mm^[20]。为明确储种盒深度、转向槽角度对振动板输送阶段匀种效果和振动板出口处供种效果的影响, 以水稻芽种长轴尺寸为依据, 将振动板输送阶段划分为 15 个区域, 编号 1 ~ 15, 如图 6 所示, 在 5 s 内, 每隔 0. 1 s 统计 15 个区域内种子数量。

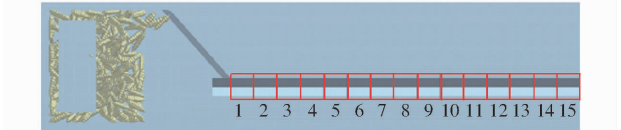


图 6 输送阶段区域划分

Fig. 6 Zone division during transportation stage

设定评价指标如下: 以 15 个区域内空间和时间上种子均匀性变异系数, 结合振动板出口处供种均匀性变异系数来反映种子在输送阶段的匀种均匀性和单列输送振动板出口处供种均匀性。

15 个区域内不同时间上种子均匀性变异系数反映振动输送阶段不同时刻下各个区域间种子运动的均匀性, 计算式为

$$y_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_1)^2}}{y_1} \times 100\% \quad (1)$$

其中

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n_1}$$

式中

- y_i —— t 时刻 i 区域内种子数量
- y_1 ——15 个区域内 t 时刻种子数量均值
- y_2 ——输送阶段 t 时刻种子均匀性变异系数, %
- n_1 ——区域数量, 取 15

15 个区域内不同空间上种子均匀性变异系数反映振动输送阶段一段时间内各个区域间种子运动的均匀性, 计算式为

$$y_4 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_3)^2}}{y_3} \times 100\% \quad (2)$$

其中

$$y_3 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n_2}$$

式中

- y_3 ——5 s 内每个区域内种子数量均值
- y_4 ——输送阶段 i 区域 5 s 时间内种子空间上均匀性变异系数, %
- n_2 ——5 s 内 0. 1 s 时间间隔数量, 取 50

振动板出口处供种均匀性变异系数反映供种均匀性,计算式为

$$y_6 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_3 - 1} \sum_{j=1}^n (y_j - y_5)^2}}{y_5} \times 100\% \quad (3)$$

其中

$$y_5 = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n_3}$$

式中

y_j ——相邻两个种子之间的时间间隔,s

y_5 ——平均供种时间间隔,s

y_6 ——供种均匀性变异系数,%

n_3 ——时间间隔数量

2.3 试验与结果分析

2.3.1 储种盒深度对振动输送的影响

储种盒深度决定储种盒中种子数量,进而影响种子流动性和均匀性。转向槽角度设置 28.5°,对储种盒深度 8、10、12 mm 3 个水平进行仿真试验,取稳定输送的 5 ~ 10 s 内仿真结果,每组仿真试验重复 3 次。

统计并计算 15 个区域不同时间上种子均匀性变异系数,如图 7 所示,种子均匀性变异系数随储种盒深度增大而增大。当储种盒深度为 8 mm 时均匀性变异系数最小;当储种盒深度为 10 mm 时,输送阶段种子存在少量堆叠,造成种子均匀性变异系数略增大;当储种盒深度为 12 mm 时,出现输送阶段断流情况,均匀性变异系数最大。

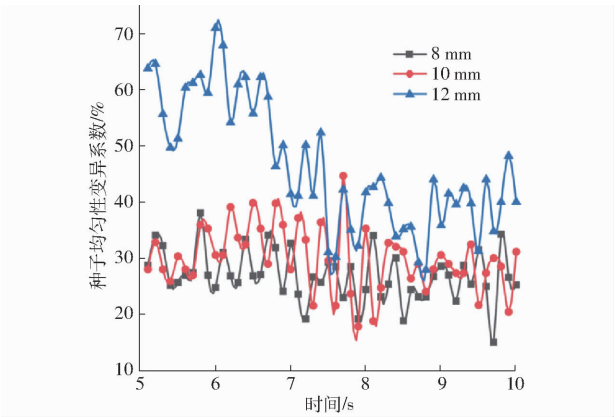


图 7 不同储种盒深度时时间维度上 15 个区域种子均匀性变异系数

Fig.7 Variation coefficient of seed uniformity in 15 regions in time dimension

不同空间种子均匀性变异系数如图 8 所示,种子均匀性变异系数随储种盒深度增大而增大。当储种盒深度为 8、10 mm 时,其变化趋势一致,且数值相近,区域 1 ~ 6 内的均匀性变异系数逐渐减小,在区域 7 ~ 15 内均匀性变异系数呈周期性稳定变化。由此可知,当种子刚离开转向槽进入输送阶段时,其

均匀性较差,当种子在输送阶段运动至区域 7 后,均匀性变异系数趋向稳定,种子输送也趋向稳定。

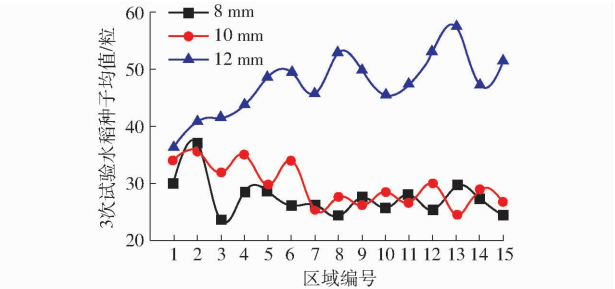


图 8 不同储种盒深度时空间维度上 15 个区域种子均匀性变异系数

Fig.8 Variation coefficient of seed uniformity in 15 regions in spatial dimension

振动板出口处供种均匀性变异系数如图 9 所示,由图 9 可知,其均匀性变异系数与不同时间和空间上匀种均匀性变异系数变化规律一致,当储种盒深度为 8 mm 时,供种均匀性变异系数最小,3 次试验的供种数量差异变化最小,供种稳定。

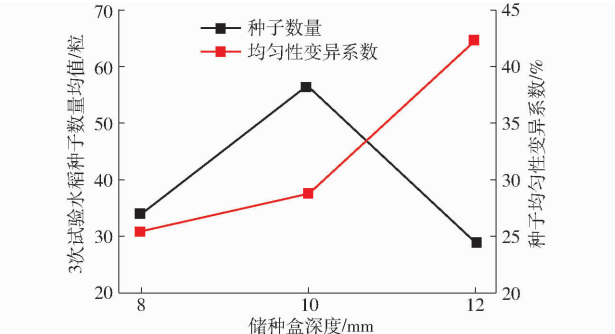


图 9 不同储种盒深度时振动板出口处供种均值和均匀性变异系数

Fig.9 Variation coefficient of supply mean and uniformity at exit of vibratory plate

其原因在于:随储种盒深度增加,种层厚度进一步增加,种子由储种盒进入转向槽时数量较多,一方面导致输送阶段种子堆叠;另一方面转向槽种子较多容易堵塞,导致输送阶段断流现象的产生。因此,本研究设计储种盒深度为 8 mm。

2.3.2 转向槽角度对振动输送的影响

储种盒深度为 8 mm、转向槽角度设置 40°、48°、56° 3 个水平进行仿真试验,取稳定输送的 5 ~ 10 s 内仿真结果,每组仿真试验重复 3 次。

统计并计算 15 个区域不同时间种子均匀性变异系数,结果如图 10 所示,种子均匀性变异系数随转向槽角度的增大先减小后增大。转向槽角度为 48°时最小;40°时由于输送阶段种子堆叠造成均匀性变异系数较高;当转向槽角度为 56°时种子均匀性变异系数最大,种子断流现象严重导致变异系数最大。

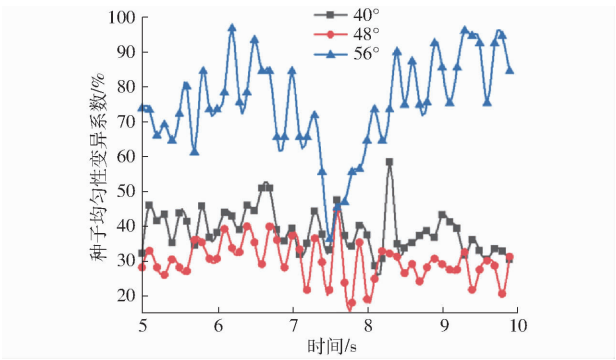


图 10 不同转向槽角度时时间维度上 15 个区域种子均匀性变异系数

Fig. 10 Variation coefficient of seed uniformity in 15 regions in time dimension

图 11 为 15 个区域空间上种子均匀性变异系数,结果表明,种子输送阶段均匀性变异系数随转向槽角度增大先减小后增大,当转向槽角度为 48°时,均匀性变异系数最小。3 个水平下,区域 1~7 种子均匀性变异系数逐渐减小,区域 8~15 其均匀性变异系数逐渐稳定。

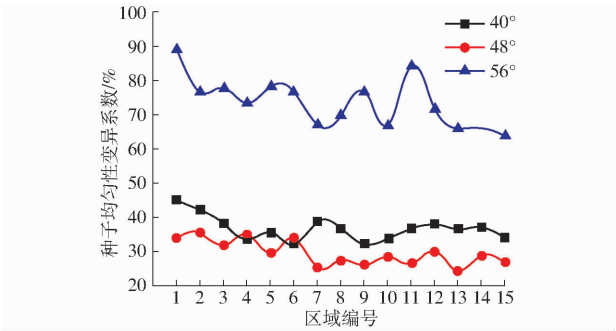


图 11 不同转向槽角度时空间维度上 15 个区域上种子均匀性变异系数

Fig. 11 Variation coefficient of seed uniformity in 15 regions in spatial dimension

图 12 为振动板出口处供种均匀性变异系数和供种数量均值的变化趋势,其供种均匀性变异系数与匀种均匀性变异系数变化规律一致,当转向槽角度为 48°时,供种均匀性变异系数最小。

供种均值和均匀性变异系数的变化趋势说明了转向槽角度对单列供种的影响,分析其原因:种子进入转向槽(图 13),转向槽对其支持力为 F_N ,其中种子水平分力 F_{Nx} 为运动阻力。随转向槽角度 ζ 的增大,转向槽对种子支持力的水平分力(运动阻力)增大,种子转动动力矩变小,运动受阻,速度降低,导致振动板出口处种子数量减少,供种均匀性变差。

图 14 为 3 种转向槽角度下振动板不同位置任意 3 粒种子运动速度,0~75 mm 范围内种子主要在储种盒和转向槽之间运动,75~230 mm 为单列输送振动板的输送阶段。当转向槽角度为 40°、48°和

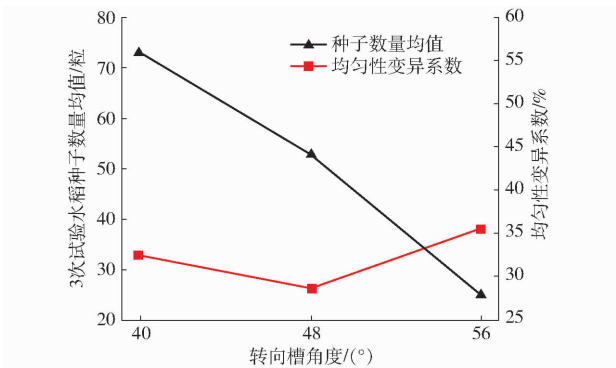


图 12 不同转向槽角度时振动板出口处供种均值和均匀性变异系数

Fig. 12 Variation coefficient of supply mean and uniformity at exit of vibratory plate

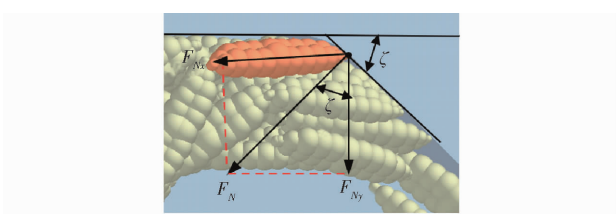


图 13 转向槽处种子受力图

Fig. 13 Steering groove structure and seed force diagram

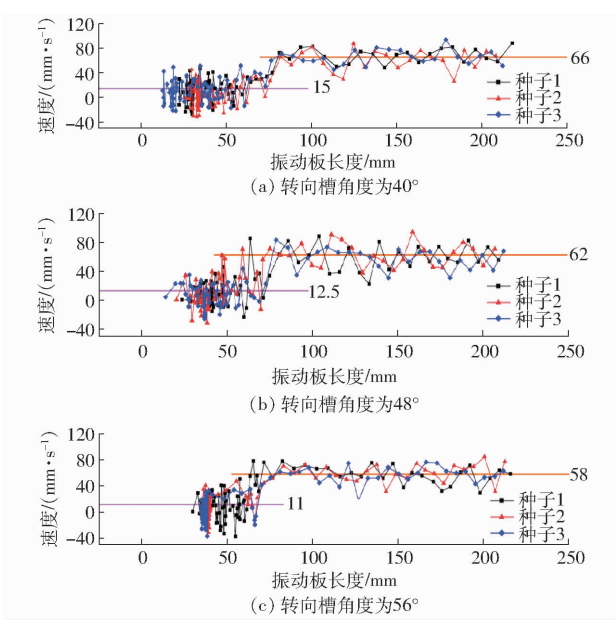


图 14 不同转向槽角度振动板各位置处种子的速度变化

Fig. 14 Seed velocity change at each position of vibratory plate with different steering groove angles

56°时,3 粒种子在转向阶段速度均值分别为 15、12.5、11 mm/s,输送阶段速度均值分别为 66、62、58 mm/s。每组水平下 3 粒种子两阶段的速度差值随着转向槽角度的增大而减小。分析可知,种子在经过转向阶段后很快加速进入输送阶段,两阶段速度差值反映种子加速度,加速度过小将会增加种子在转向槽处的堵塞现象,过大会导致供种不均匀,转向槽角度为 48°时,种子可以顺利进入输送阶段,能实

现均匀供种。分析结果表明输送阶段不同时间和空间匀种均匀性变异系数随转向槽角度增大先减小后增大,确定转向槽角度为 48° 时匀种效果最好。

分析可知,储种盒深度的增加,提高了储种盒中种层厚度,种层越高,越容易造成种子的堆叠和断流现象的产生,影响单列输送振动板出口处种子数量;转向槽角度的增加会造成转向槽处种子堵塞,影响出口处种子数量,进而影响种子均匀性变异系数。

2.4 振幅对种子运动影响

当储种盒深度为 8 mm 、转向槽角度为 48° 、振动方向角为 29° 时,振动板出口处供种均匀性变异系数反映供种均匀性,为 18.2% 。为探究振幅对供种均匀性的影响,对最优参数下的振动板进行 0.10 、 0.12 、 0.14 、 0.16 、 0.18 mm 5 组振幅水平下仿真试验,结果如图 15 所示。由图 15 可知,随着振幅增大,振动板出口处供种均匀性变异系数先减小后增大,该规律可为通过控制电压改变振幅进而提高供种均匀性提供依据。

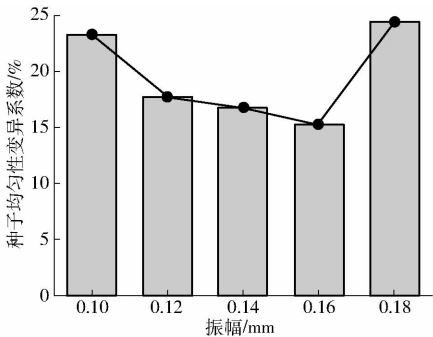


图 15 振幅对振动板出口处供种均匀性变异系数的影响
Fig. 15 Effect of amplitude on variation coefficient of supply uniformity at exit of vibratory plate

3 种子流检测控制系统设计

3.1 压电振动单体种子流形态检测

图像检测目的为识别是否出现断流。最优参数组合下,当种子流连续时其供种均匀性变异系数为 18.2% ,规定当供种均匀性变异系数高于 18.2% 时为断流。通过定义图像区域内白色像素的占比来区别种子流连续和断流,因此需确定种子流连续和断流时图像区域内白像素占比的范围。

图像检测区域为振动板输送阶段,摄像头采集的图像如图 16a 所示。经裁剪定位得图像如图 16b 所示。

随机选取种子连续流动(供种均匀性变异系数低于 18.2%)和断流(供种均匀性变异系数高于 18.2%)时的图像,如图 17 所示。

对灰度图进行二值化处理,得图 18 所示图像。

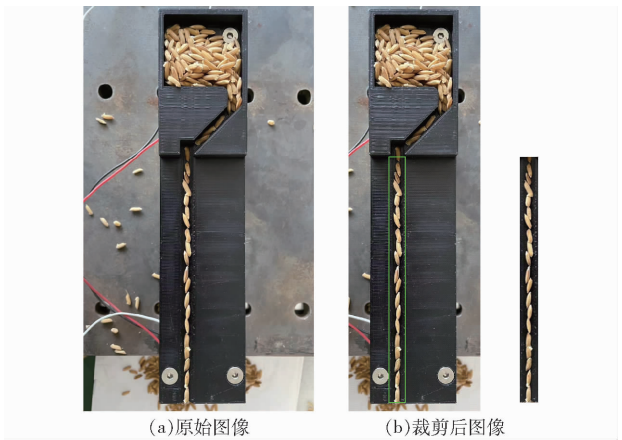


图 16 图像采集

Fig. 16 Image collection

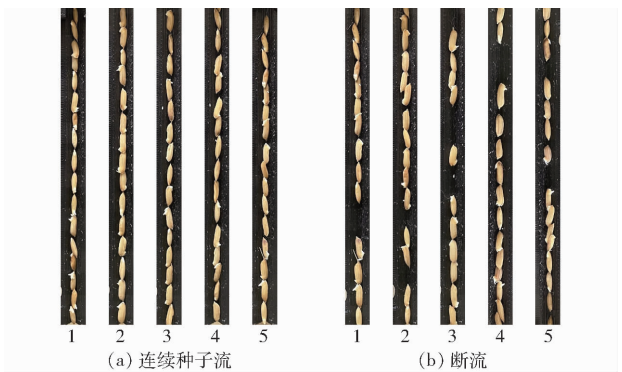


图 17 两种种子流状态

Fig. 17 Two seed flow states

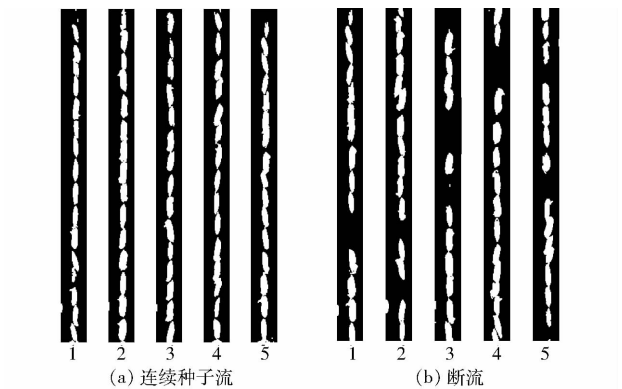


图 18 两种种子流状态二值化图

Fig. 18 Binary graphs of two kinds of seed flow states

计算图中种子面积(白色像素点)占整个矩形区域内的比值,结果见表 2。由表 2 可知,供种均匀性变异系数低于 18.2% ,即种子流连续时 5 幅图像中白色像素占矩形框像素比值在 20% 以上,供种均匀性变异系数高于 18.2% ,即种子流断流时 5 幅图像中白色像素占矩形框像素比值低于 20% ,因此以种子流连续时种子面积占图像识别区域的比值即对应的矩形框中白色像素占比 20% 为阈值,判定输送阶段种子是否断流,其结果可为后续判断种子流出现断流时进行调控和控制系统设计提供依据。

表 2 白色像素占矩形框像素比值

Tab.2 Ratio of white pixels to rectangular box pixels

编号	连续种子流白色像素占	断流白色像素占矩形框
	矩形框像素比值	像素比值
1	23.59	15.62
2	22.83	18.07
3	20.55	14.14
4	20.34	17.80
5	21.50	16.14

3.2 控制系统设计

3.2.1 系统方案

系统主要包括图像采集系统、计算机、图像处理和信号输出系统、压电控制系统和压电振动精量播种匀种装置。以摄像头采集图像信息为输入信号，经计算机图像处理后，分析其白色像素占比，判断其白色像素占比是否高于设置阈值 20%，若高于阈值，则继续检测，若低于阈值，则向单片机发送电压调节数值，数字调频压电振动送料控制器接收到电压调节信号后，调节电压。其控制系统框图如图 19 所示。

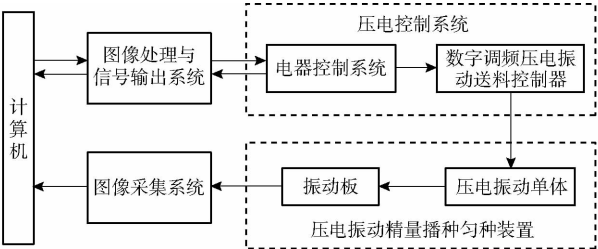


图 19 压电振动匀种均匀性控制系统框图

Fig.19 Block diagram of piezoelectric vibration uniformity control system

3.2.2 控制流程和硬件连接

图像检测和计算机处理流程如图 20 所示，摄像头采集一幅图像，计算机对图像进行处理，并将结果发送给单片机，单片机判断其中白色像素占比是否高于 20%，若高于则复位当前电压，若低于则提高电压输出，每次调节 3 V，调节区间为 0 ~ 12 V，直至确保图像中白色像素占比高于 20% 后，恢复电压初始值。

根据 3.2.1 节控制系统框图，硬件连接如图 21 所示，由摄像头和计算机组成图像采集和处理系统，由 MEGA2560 单片机和 SDVC40 - S 型数字调频压电振动送料控制器组成压电控制系统，以实现对接电振动单体输入电压的调控。

3.3 控制系统试验验证

为验证控制系统对接电振动单体和匀种单元种子流检测的准确性，搭建如图 22 所示试验台，试验对象为深两优 5814 种子，含水率为 28.6%，摄像头

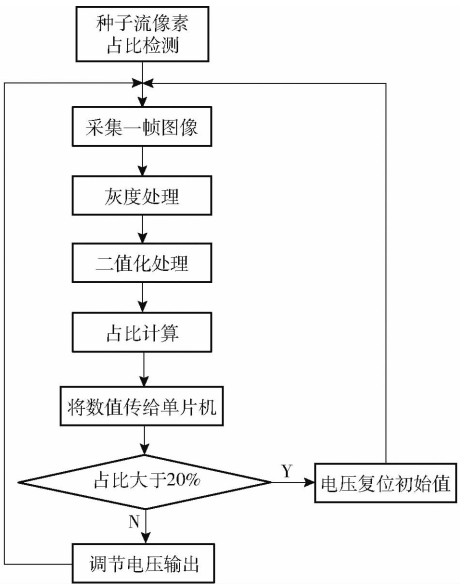


图 20 图像采集处理流程

Fig.20 Image acquisition and processing process

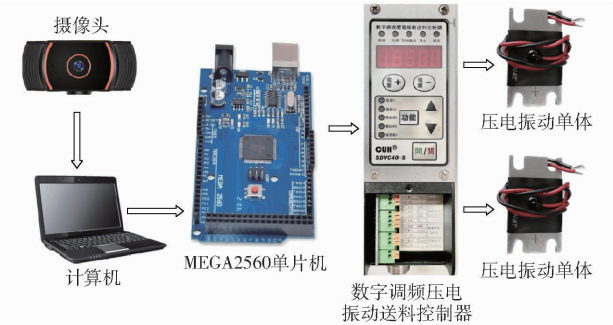


图 21 硬件连接图

Fig.21 Hardware connection diagram

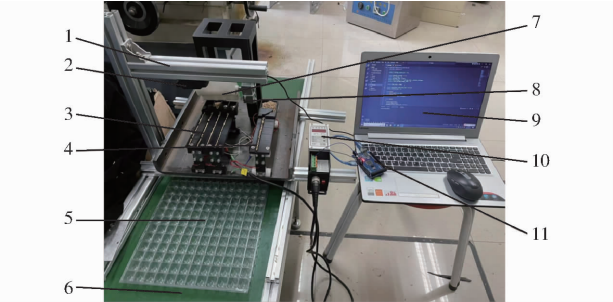


图 22 图像检测试验装置

Fig.22 Image detection test device

1. 摄像头安装支架 2. PA930 型摄像头 3. 匀种单元 4. 压电振动单体 5. 秧盘 6. 传送带 7. 种箱 8. 供种电机 9. 计算机 10. SDVC40 - S 型数字调频压电振动送料控制器组 11. MEGA2560 单片机

位于压电振动单体、匀种单元上方 153 mm 处，纵向距离为振动板输送槽中点处。

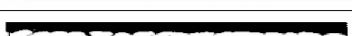
3.3.1 压电振动单体图像检测和控制验证试验

输入频率为 125.55 Hz，初始电压为 150 V，对种子流进行检测和调控，若检测到白色像素占比低于 20%，则单片机控制数字调频压电振动送料控制器

提高输出电压。试验结果如表 3 所示,表明整流后其白色像素(种子)占比均达到 20% 以上,且种子流连续。

表 3 单列输送振动板图像检测和识别结果

Tab.3 Image detection and recognition results of single row conveying vibration plate

序号	种子流状态	图像	4列中最小白色像素占比/%
1	断流		18.5
	整流		23.2
2	断流		14.3
	整流		20.8
3	断流		16.4
	整流		22.5

3.3.2 匀种单元图像检测和控制验证试验

对匀种单元进行模态分析(图 23),其前 4 阶共振频率分别为 115.4、363.2、618.75、726.7 Hz,结合振动板变形情况,确定匀种单元输入频率为 115.4 Hz。

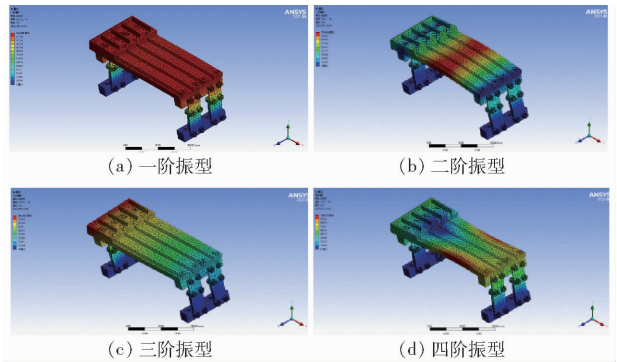


图 23 匀种单元前 4 阶模态分析结果

Fig. 23 Results of the first four modal analysis of uniform seeding unit

匀种单元输入电压 U 与振幅 A 的关系如图 24 所示。拟合电压 U 与振幅 A 关系式为

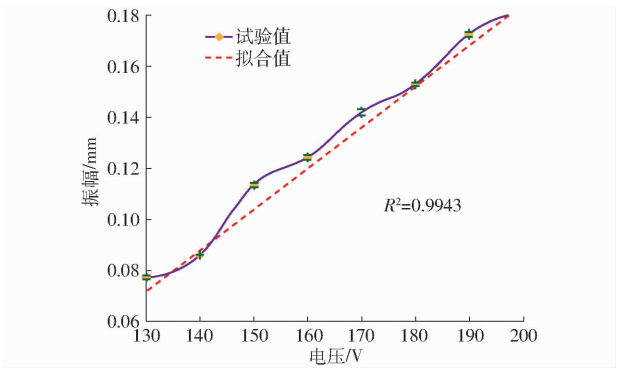


图 24 匀种单元电压与振幅关系曲线

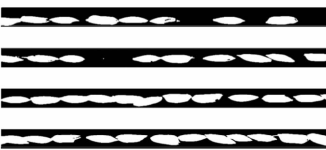
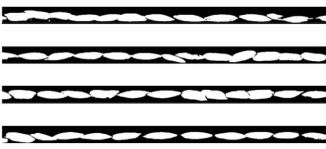
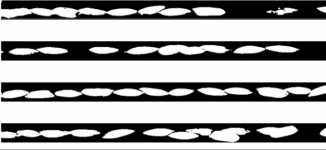
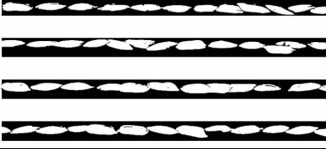
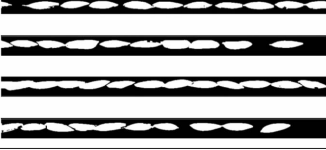
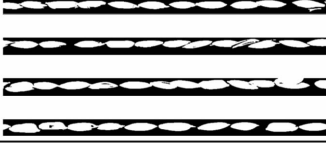
Fig. 24 Relationship between voltage and amplitude of uniform seeding unit

$$A = -0.0003U^2 + 0.0184U + 0.0567$$
$$(R^2 = 0.9943) \tag{4}$$

输入频率为 115.4 Hz,电压为 150 V,对匀种单元进行图像识别,当图中 4 列输送阶段最小白色像素占比低于 20% 时,提高输送电压。试验结果见表 4,表明经整流后图中各列白色像素占比均大于 20% ,种子流可实现连续输送。

表 4 匀种单元图像识别和整流结果

Tab.4 Uniform seeding unit image recognition and rectification results

序号	种子流状态	图像	4列中最小白色像素占比/%
1	断流		13.3
	整流		21.1
2	断流		14.6
	整流		21.3
3	断流		17.3
	整流		20.8

4 匀种装置性能试验

4.1 试验条件与试验指标

为进行不同振幅、不同种子条件下的播种性能,搭建了分体组合振动式超级稻精量播种匀种试验装置,如图 25 所示,包括种箱、供种电机、3 组匀种单元、秧盘、传送带、3 个 SDVC40-S 型数字调频压电振动送料控制器、MEGA2560 单片机、计算机和 3 个 PA930 型摄像头。3 个摄像头分别检测 3 组匀种单元,安装位置和其余试验条件参见 2.3 节。当检测

到某一组匀种单元输送阶段某列白色像素占比低于 20% 时,单片机控制单元数字调频压电振动送料控制器提高输出电压,实现对均匀种子流的调控。

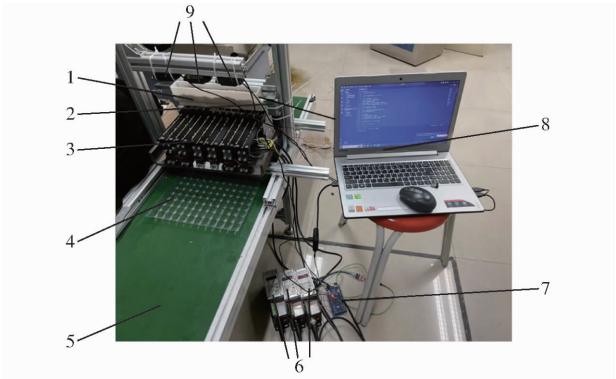


图 25 分体组合振动式超级稻精量播种匀种试验装置
Fig. 25 Piezoelectric vibration type super rice precision sowing and uniform planting experimental device
1. 种箱 2. 供种电机 3. 3 组匀种单元 4. 秧盘 5. 传送带
6. SDVC40-S 型数字调频压电振动送料控制器 7. MEGA2560 单片机 8. 计算机 9. PA930 型摄像头

根据超级稻农艺要求以 1~2 粒/穴为播种合格,以播种合格率和漏播率为试验指标,统计育秧盘中种子的数量,播种合格率 Y_1 和漏播率 Y_2 计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{x_1}{y} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{x_2}{y} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_1 ——1~2 粒种子的穴数
 x_2 ——空穴数
 y ——总穴数

4.2 试验结果

基于前述研究确定电压(振幅)为 150~200 V,不同匀种电压下的播种试验每组重复 3 次,取平均值,结果如表 5 所示。

表 5 不同匀种电压试验结果
Tab. 5 Test results of different uniform voltages

电压 U/V	播种合格率 $Y_1/\%$	漏播率 $Y_2/\%$
150	93.47	0.83
160	94.37	1.00
170	95.20	0.67
180	96.47	0.83
190	95.67	0.67
200	94.67	0.83

由表 5 可知,随着供种电压的提高,其播种合格

率先增大后减小;且播种合格率均不小于 93.47%,漏播率不大于 1.00%,符合超级稻的精播要求。

为验证振动匀种装置对不同品种超级稻的适应性,选取华中优 1 号(长宽比 2.5)、川优 6203(长宽比 3.9)、宜优 2108(长宽比 3.0) 3 种超级稻。选取工作电压 150、170、190 V 进行试验,以播种合格率和漏播率为试验指标,试验结果如表 6 所示。

表 6 播种适应性试验结果
Tab. 6 Seeding adaptability test results

品种	工作电压/V	播种合格率 $Y_1/\%$	漏播率 $Y_2/\%$
华中优 1 号	150	96.67	0.67
	170	96.00	0.50
	190	96.17	0.67
川优 6203	150	95.83	0.50
	170	94.83	0.33
	190	94.37	0.50
宜优 2108	150	96.83	0.50
	170	95.00	0.67
	190	94.17	0.67

试验结果表明,与深两优 5814 的试验结果一致,3 种水稻种子播种合格率均不小于 94.17%,漏播率不大于 0.67%,表明该装置对不同类型超级稻种子具有较好的适应性。

5 结论

(1)设计一种分体组合振动式精量播种匀种装置,对振动板储种盒深度和转向槽角度进行单因素仿真试验,结果表明,不同时间和空间上匀种均匀性变异系数和振动板出口处供种均匀性变异系数随储种盒深度的增大而增大;随转向槽角度增大先减小后增大,并依此确定了储种盒深度和转向槽角度分别为 12 mm 和 48°。

(2)提出了一种基于图像识别的控制方法并搭建种子流控制系统,压电振动单体和匀种单元图像检测和整流验证试验表明,当检测到图像中白色低像素占比低于 20%,经整流后,白色像素占比大于 20%。

(3)不同匀种电压试验表明,当工作电压为 150~200 V 时,播种合格率均不小于 93.47%,漏播率不大于 1.0%。不同长宽比 3 种超级稻品种性能验证试验结果表明,3 种水稻种子的播种合格率均不小于 94.17%,漏播率不大于 0.67%,满足超级稻精量播种要求。

参 考 文 献

[1] LI Shuo, LU Zhou, ZHAO Jie, et al. Changes in planting methods will change the potential distribution of rice in south China under climate warming[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 331: 109355.

- [2] 赵立军,陈海涛,蔡晓华,等. 密闭式立体秧秧系统水稻育苗基质配方研究[J]. 农业工程学报,2017,33(9):204-210.
ZHAO Lijun, CHEN Haitao, CAI Xiaohua, et al. Research on matrix formula of substrate for seeding in rice closed stereo seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(9):204-210. (in Chinese)
- [3] 袁隆平. 超级杂交水稻育种研究的进展[J]. 中国稻米,2008(1):1-3.
- [4] 蒋维金,陈雷,孙瑞建. 超级稻宁粳4号优质高产绿色高效机插栽培技术[J]. 农业科技通讯,2020(4):251-253.
- [5] 袁隆平. 超级杂交稻研究进展[J]. 农学学报,2018,8(1):71-73.
YUAN Longping. Progress in breeding of super hybrid rice[J]. Journal of Agriculture,2018,8(1):71-73. (in Chinese)
- [6] RASHID M H, GOSWAMI P C, HOSSAIN M F, et al. Mechanised non-puddled transplanting of boro rice following mustard conserves resources and enhances productivity[J]. Field Crops Research, 2018, 225: 83-91.
- [7] LI Yuan. Progress in super-hybrid rice breeding[J]. The Crop Journal, 2017,2(5):100-102.
- [8] 陈辰州. 杂交水稻机械化种子生产相关技术研究[D]. 北京:清华大学,2016.
CHEN Chenzhou. Related technology of hybrid rice seed production mechanization[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [9] 刘俊华,吴正锋,李林,等. 单粒精播密度对花生冠层结构及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2020,42(6):970-977.
LIU Junhua, WU Zhengfeng, LI Lin, et al. Effect of different density on canopy structure and pod yield of peanut under single seed precision sowing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(6): 970-977. (in Chinese)
- [10] 刘柱,由莉莉,王淑兰,等. 浅谈我国水稻育秧设备的现状及发展趋势[J]. 农业开发与装备,2020(11):26-27.
- [11] 陆伟安,黄世明,冯天玉,等. 型孔式排种器的设计与试验[J]. 湖北农业科学,2020,59(16):149-152,157.
LU Weian, HUANG Shiming, FENG Tianyu, et al. Design and test of hole-type seed meter[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(16): 149-152, 157. (in Chinese)
- [12] 李兰兰,朱德泉,张顺,等. 滑片型孔轮式水稻精量穴直播排种器设计与试验[J]. 浙江农业学报,2018,30(12):2153-2160.
LI Lanlan, ZHU Dequan, ZHANG Shun, et al. Design and experiment of slider-hole-wheel precision hill-direct-seeding metering device for rice[J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2018, 30(12): 2153-2160. (in Chinese)
- [13] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1-20. (in Chinese)
- [14] 刘彩玲,宋建农,张广智,等. 气吸式水稻钵盘精量播种装置的设计与试验研究[J]. 农业机械学报,2005,36(2):43-46.
LIU Cailing, SONG Jiannong, ZHANG Guangzhi, et al. Design and experimental study on rice precision suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(2): 43-46. (in Chinese)
- [15] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):42-48.
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed-filling room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42-48. (in Chinese)
- [16] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [17] 梁玉玥,郑侃,杜俊,等. 稻麦兼用排种器振动供种装置性能试验[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52(6):708-717.
LIANG Yuyue, ZHENG Kan, DU Jun, et al. Performance test on vibrating feeder of seed metering device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(6):708-717. (in Chinese)
- [18] 鹿芳媛. 两级双振动式水稻精密播种器机理分析与试验研究[D]. 广州:华南农业大学,2018.
LU Fangyuan. Working mechanism analysis and experimental research on two-stage double vibration rice precision seeder[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 齐龙,谭祖庭,马旭,等. 气动振动式匀种装置工作参数的优化及试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(6):1684-1691.
QI Long, TAN Zuting, MA Xu, et al. Optimization and test of operational parameters of pneumatic vibration uniform-seeds device[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1684-1691. (in Chinese)
- [20] 刘彩玲,李方林,袁昊,等. 超级杂交稻压电振动式匀种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):58-68.
LIU Cailing, LI Fanglin, YUAN Hao, et al. Design and experiment of piezoelectric vibration seed homogenizer for super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 58-68. (in Chinese)
- [21] 袁昊,刘彩玲,宋建农,等. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动供种装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):31-40.
YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong, et al. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 31-40. (in Chinese)