

振动式水稻精密播种装置机理分析与试验

鹿芳媛 马旭 齐龙 邢绪坡 李宏伟 郭林杰

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为提高振动式水稻精密播种装置的播种性能,分别对其定量供种机构和振动匀种机构的工作机理进行了分析与试验研究。利用离散元软件 EDEM 模拟了定量供种机构在有无振动作用下的供种过程。通过对比分析可知种箱振动板周期性的小幅振动可缓解种子的漏斗流动,促进扩散流动,同时使排种轮充填区的种子分布状态更加“蓬松”,提高了供种频率,实现了稳定定量供种。通过模拟试验探究振动匀种机构不同种槽板对种子的流速和装置播种性能的影响,优选出 $V-90^\circ$ 、 $V-105^\circ$ 、 $V-120^\circ$ 和 U1 型 4 组种槽板,为装置优化试验提供了参考,减少了后续试验次数。分别进行常规稻供种和杂交稻低播量供种试验,得到了种箱振动板振动使排种轮供种频率提高 3.64% 和 5.52%,验证了定量供种机构仿真研究结果具有较高的准确性。进行不同种槽板、播量和气压全因素播种性能试验,得到播种效果最佳的种槽板为 $V-120^\circ$ 种槽板,在 40 g/盘杂交稻低播量播种时使用 0.26 MPa 气压播种,合格指数为 93.91%,空穴指数为 0.94%;80 g/盘常规稻播种时使用 0.28 MPa 气压播种,合格指数为 96.10%,空穴指数为 0,满足杂交稻和常规稻种子育秧播种的技术要求。

关键词: 水稻;精密播种;种槽板;离散元法

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0119-10

Theory and Experiment on Vibrating Small-amount Rice Sowing Device

LU Fangyuan MA Xu QI Long XING Xupo LI Hongwei GUO Linjie
(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to improve the sowing performance of vibrating small-amount rice sowing device, theoretical analysis and experimental research on the mechanism of the quantitative-seeds feeding mechanism and the vibration uniform-seeds mechanism were carried out respectively. Discrete elemental software EDEM was used to simulate the feeding process of quantitative-seeds feeding mechanism with or without vibration. Through the comparative analysis of the simulation process of the quantitative-seeds feeding mechanism, the periodic small amplitude vibrations of seed box vibrating plate could alleviate the rice seeds funnel flow and promote the diffusion flow, meanwhile made the distribution state of the seeds in the seed roller fluffier. The simulation results of the quantitative-seeds feeding test showed that the vibrating effect of the seed box vibrating plate could increase the seed frequency, and realize the quantitative and stable seeds feeding performance. The simulation experiment of seeding performance of nine kinds of grooved plates was carried out to study the effect of different kinds of grooved plates on the seeds flow velocity and sowing effect. The simulation results of sowing performance experiment showed that with the increase of the grooved plate's angle, the flow velocity of seeds on the grooved plate was gradually decreased and tended to be stable. The $V-90^\circ$, $V-105^\circ$, $V-120^\circ$ and U1-shaped grooved plates were optimized to provide reference for the vibration uniform-seeds mechanism optimization test, and reduced the number of subsequent tests. Through the sowing performance tests, it was obtained that the best sowing performance was using the $V-120^\circ$ grooved, and the qualified index was 93.91% while hole index was 0.94% when sowing hybrid rice with 0.26 MPa air pressure. The qualified index was 96.10% and the hole index was 0 when sowing conventional rice with 0.28 MPa. The research provided a research basis for the research and development of rice precision sowing device.

Key words: rice; precision sowing; seeds grooved plate; discrete element method

收稿日期: 2018-01-07 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700802)、国家自然科学基金项目(51675188)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-01-43)

作者简介: 鹿芳媛(1990—),女,博士生,主要从事农业机械化与装备工程研究,E-mail: lufy0127@163.com

通信作者: 马旭(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

0 引言

水稻是我国主要粮食作物,其种植机械化是我国水稻生产机械化的薄弱环节,也是我国水稻生产全程机械化发展中的瓶颈^[1],提高水稻秧苗育秧播种机械化水平是实现我国水稻种植机械化的关键环节之一。

目前,水稻机械化种植方式主要包括机栽植和机直播。美国、意大利、澳大利亚等发达国家采用机械化直播方式种植水稻,对秧盘育秧播种机械的研制较少^[2-3];亚洲的水稻秧盘育秧设备较多,其中日本和韩国的技术水平最高,如日本久保田、洋马、井关等株式会社生产的育秧播种流水线,采用机械式排种器,设备自动化程度高、工艺精湛,但主要适用于常规稻4~8粒/格的撒播或3~6粒/穴的穴播作业,不适用杂交稻1~3粒/穴的精密播种需要^[4]。

我国水稻机械化种植主要采用育秧移栽。水稻精密播种器的研发始于20世纪70年代,早期研究以机械式排种器为主,80年代初开始研究气力式排种器^[5],随着水稻秧盘育秧流水线的研制,90年代起振动式播种流水线发展起来^[6]。可以看出,我国对于水稻精密排种器的研究,按其播种方式分为机械式、振动式和气力式。传统机械式播种器结构简单、适应性强,主要适用于水稻大播量条播和撒播,较难满足杂交稻精密播种需求^[3]。气力式水稻精密播种器作业效率高,对种子损伤小,能够实现单粒精量点播^[7],但由于水稻主要采用芽种播种育秧,带芽播种时种芽的脱落易造成吸孔堵塞而影响播种性能,且吸孔堵塞问题较难解决。

振动式水稻精密播种是一种有效的精密播种方式,可分为机械振动式、电磁振动式和气力振动式。张学义、杨坚、李志伟等^[6,8-9]改进电磁振动式播种器用于水稻育秧播种,可实现3~5粒/穴的播种要求。张斌等^[10]提出利用导向板使稻种在振动式排种器上沿胚胎方向有序排列,实现了超级杂交稻定向播种。齐龙等^[11]采用交叉导流式振动种箱配合螺旋勺式槽轮定量供种,与气动振动匀种机构相结合,研制了一种振动式水稻精密播种装置,能够满足杂交稻和常规稻种子播种育秧要求,但该装置的结构与工作参数还需优化,以保证稳定的工作性能。

为此,本文将解析交叉导流式振动种箱的工作机理,利用离散元法^[12-15]模拟分析与试验探究该机构的供种性能,分析振动匀种机构的不同种槽板对水稻种子导向作用和流动速度(以下简称流速)的影响,探究不同类型种槽板对播种性能的影响,并通

过播种性能试验优化种槽板结构参数。

1 振动式精密播种装置工作原理

振动式水稻精密播种装置是水稻秧盘育秧精密播种流水线的关键技术部件,其播种质量直接影响育秧流水线的作业性能和效率。该播种装置主要由两部分组成:定量供种机构和振动匀种机构,其结构示意图如图1所示。

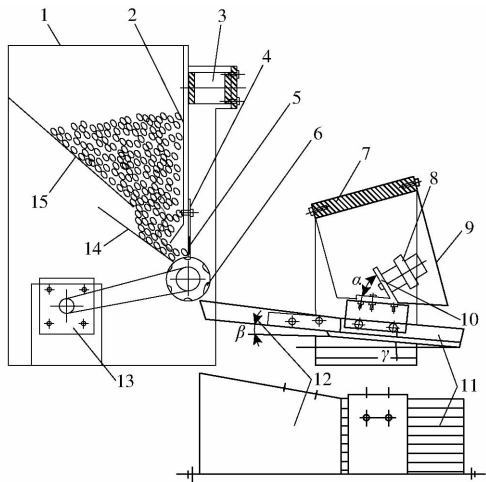


图1 振动式水稻精密播种装置结构示意图

Fig.1 Sketch map of vibrating precision sowing devise for rice

1.种箱 2.种箱振动板 3.电磁振动器 4.调节门 5.清种毛刷 6.螺旋勺式排种轮 7.支架 8.气动振动器 9.振盘振动臂 10.振动器安装板 11.种槽板 12.T型板 13.调速电动机 14.第二导种板 15.第一导种板

定量供种机构主要包括种箱、第一导种板、种箱振动板、第二导种板、电磁振动器、调节门、清种毛刷、螺旋勺式排种轮(以下简称排种轮)和调速电动机;振动匀种机构包括气动振动器、振动器安装板、振盘振动臂、振动种盘、支架等部件。其工作原理为:定量供种机构采用交叉导流式振动种箱(由图1中零件1、2、3、14、15构成),使水稻种子在排种轮上方的充填区形成“Z”型连续种流,然后随排种轮转动定量地排出种箱,落入振动匀种机构的振动种盘中。在振动匀种机构的振动作用下,水稻种子在振动种盘上部T型板中进行筛分匀种,在振动种盘下部种槽板的导向作用下有序排队,形成连续、均匀的种子流,最终精量地落入育秧流水线输送带上的秧盘中,完成精少量播种。

定量供种机构连续定量的供种性能和振动匀种机构均匀稳定的播种性能,是实现水稻精密播种的重要条件,二者缺一不可。因此,分别探究定量供种机构的供种机理与振动匀种机构的播种机理,分析影响装置播种性能的因素,使播种合格指数提高到92%以上,空穴指数控制在2%以下。

1.1 定量供种机构的供种机理

在播种过程中随着排种轮的转动种量不断减少,常规种箱内靠近排种轮出流口的种子流速较其他位置快,中部种子流速较种箱内壁快,排种轮中部与两侧充填特性不一致,导致供种量不稳定。为此,李志伟、马旭、周海波等^[6,16-17]提出了多层导种板结构的种箱,提高了种箱的供种性能,实现了均匀定量供种。

本文研究的定量供种机构交叉导流式振动种箱,采用第一导种板、种箱振动板和第二导种板交叠安装形成的交叉导流结构,利用多层导种板分担了种箱内种子的大部分重力,避免了种子直接堆积在排种轮上,而在排种轮上方充填区形成“Z”型连续种流,有效提高了充种性能,且减少了多余种子在清种毛刷部位旋转翻滚产生的涡流与碎种现象。此外,由于水稻种子自身的物理特性,外壳存在芒刺,种子间的摩擦因数较大,无序的分布状态使其在种箱内的流动性差。同时,催芽后的水稻种子抵抗损伤的能力很弱,种子间较大的摩擦力及排种轮的强制带动作用会加剧伤种。因此,通过电磁振动器连接振动板,在种箱内侧产生周期性的小幅振动,加速种箱内侧种子的流动性,并使排种轮充填区的种子分布状态较为“蓬松”,减少种子的机械损伤,优化供种性能。

1.2 振动匀种机构的匀种机理

振动种盘的振动性能直接决定了水稻种子的运动特性以及机构的播种性能。为分析振动种盘的运动特性,将振动匀种机构分为 3 部分:支架、气动振动器及受迫振动系统(包括振盘振动臂和振动种盘)。气动振动器对受迫振动系统产生激振力,在激振作用下振动种盘绕振盘振动臂与机架的固定点产生周期性的往复摆动。为探明该往复运动特性,对受迫振动系统进行动力学分析。

1.2.1 受迫振动系统动力学分析

通过振动特性测试分析可知,振动种盘产生的摆角始终小于 0.1°,对于该系统来说振动种盘在铅垂方向上产生的位移可忽略不计,位移主要产生于水平方向。因此,可将振盘振动臂的作用力在铅垂方向上等效为提拉振动种盘的拉力,在水平方向上等效为弹性力与阻尼力,则振动种盘在水平方向上做单自由度简谐受迫振动^[18],其力学模型如图 2 所示。为便于分析,将受迫振动系统简化为质量为 M 的等效物块。

气动振动器产生的激振力运动方程为

$$F(t) = H\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中 H ——激振力的振幅,mm

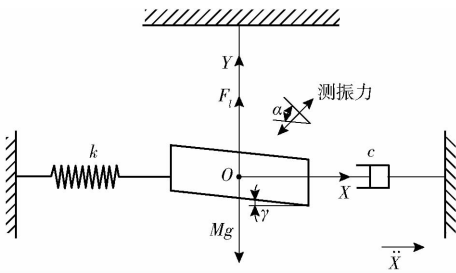


图 2 单自由度受迫振动系统力学模型
Fig. 2 Mechanical model of single degree of freedom forced vibration system

ω ——激振力的角频率,rad/s

以平衡位置 O 点为坐标原点, Y 轴铅垂向上为正,则等效物块沿铅垂方向的运动微分方程为

$$M\ddot{Y}(t) = F_l(t) - Mg + H\sin(\omega t)\cos\delta \tag{2}$$

其中

$$\delta = \alpha + \gamma$$

式中 F_l ——振动系统受到的支架拉力,N

α ——振动器安装板夹角,(°)

γ ——槽板与水平面夹角,(°)

由于振动种盘在 Y 轴方向上的位移忽略不计,即 $\ddot{Y} = 0$,则

$$F_l(t) = Mg - H\sin(\omega t)\cos\delta \tag{3}$$

表明振动匀种机构在工作过程中,振盘支架以及振盘振动臂所受到的拉力随激振力的变化而发生周期性改变。

对等效物块水平方向进行受力分析, X 水平向左为正,则等效物块的运动微分方程为

$$M\ddot{X}(t) = -c\dot{X}(t) - kX(t) + H\sin(\omega t)\sin\delta \tag{4}$$

式中 c ——等效阻尼系数

k ——等效弹簧系数

其解^[19]为

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) = Ae^{-nt}\sin(\omega_d t + \Psi) + B\sin(\omega t - \varphi)\sin\delta \tag{5}$$

其中

$$A = \sqrt{X_0^2 + \frac{(\dot{X}_0 + nX_0)^2}{\omega_d^2}}$$
$$\Psi = \arctan \frac{X_0\omega_d}{\dot{X}_0 + nX_0}$$
$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - n^2} \quad n = \frac{c}{2M}$$
$$B = \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2n\omega)^2}} \frac{H}{M}$$
$$\varphi = \arctan \frac{2n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

式中 n ——系统的衰减系数

ω_d ——衰减振动的角频率,rad/s

Ψ ——自由振动的相位差,(°)

ω_n ——系统的固有角频率,rad/s

A ——初始振幅,mm

B ——受迫振动的振幅,mm

φ ——受迫振动的相位差,(°)

$X_0, \dot{X}_0$ ——系统 $t=0$ 时刻的运动初始条件

可以看出振动种盘的运动由两部分组成:角频率为 ω_d 的衰减振动和角频率为 ω 的受迫振动。在受迫振动系统的衰减振动中,由于阻尼的存在,衰减振动会逐渐消失,在衰减振动完全消失之前,系统的振动过程称为暂态响应。衰减振动消失后,系统振动的过程为稳定的等幅受迫振动,该过程称为振动系统的稳态响应。当受迫振动系统达到稳态响应阶段,其运动方程为

$$X(t) = X_2(t) = B \sin(\omega t - \varphi) \sin \delta$$

可以看出稳态过程即为简谐振动,其频率与激振力频率相等,相位角与激振力的相位角相差 φ 。通过上述分析,在使用振动匀种机构时,需开机运行等待衰减振动的振幅逐渐减小,在受迫振动系统振动状态稳定后再进行调试播种。

1.2.2 种子在振动种盘上的运动理论分析

振动匀种机构工作时,水稻种子大部分呈松散均匀的状态分布在振动种盘中。以单粒水稻种子为研究对象,探究种子在振动种盘上部 T 型板和下部槽板上的运动特性^[11]。分别对种子在 T 型板和种槽板上的受力进行分析(振动种盘结构见图 1),如图 3 所示。

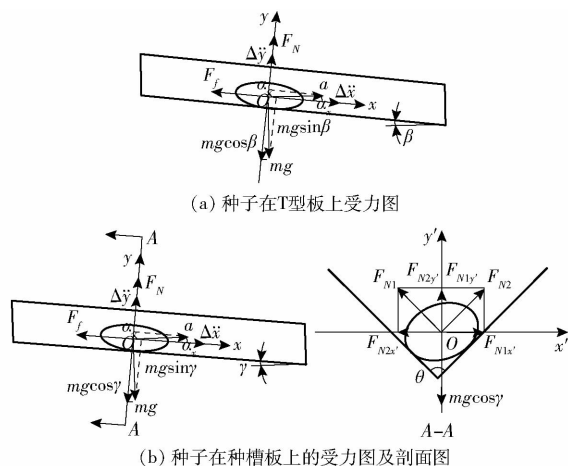


图 3 种子在振动种盘上的受力图

Fig. 3 Force diagrams of seed on vibration plate

基于上述单自由度振动系统分析,设激振力产生的振动幅值为 h (mm),则振动种盘的位移为

$$s = h \sin(\omega t - \varphi) \sin \delta$$

由图 3a 分析得到种子在 T 型板上的下滑条件

为

$$\frac{h\omega^2 \sin \delta}{g} \sin(\omega t - \varphi) > \frac{\sin(\mu - \beta)}{\cos(\mu - \beta)} \quad (6)$$

式中 μ ——种子在振动种盘上的滑动摩擦角,(°)

β ——T 型板与水平面夹角,(°)

种子在 T 型板上的跳动条件为

$$-\frac{h\omega^2}{g} \sin(\omega t - \varphi) > \frac{\sin \delta}{\tan \beta} \quad (7)$$

由图 3b 得到种子在槽板上的下滑条件为

$$\frac{\frac{h\omega^2 \sin \delta}{g} \sin(\omega t - \varphi) > \frac{\sin(\mu - \gamma) - \left(\cos \frac{\theta}{2} + 1\right) \sin \gamma \cos \mu}{\cos(\mu - \gamma) + \left(\cos \frac{\theta}{2} - 1\right) \cos \gamma \cos \mu} \quad (8)$$

式中 θ ——种槽板夹角,(°)

种子在槽板上的跳动条件为

$$-\frac{h\omega^2}{g} \sin(\omega t - \varphi) > \frac{\sin \delta}{\tan \gamma} \quad (9)$$

其中,当 $0 < \sin(\omega t - \varphi) \leq 1$ 时,式(7)、(9)恒不成立,即在振动种盘运动的半个周期内种子在振动种盘中不发生跳动,种子的运动为下滑行走与跳动交替进行^[14]。振动式水稻精密播种装置播种时常用振动种盘结构 $\beta > \gamma$,则满足种子在槽板上的下滑或跳动条件时,必定满足种子在 T 型板上的下滑或跳动条件。此外,由式(8)可知,种子在种槽板上的下滑行走条件与种槽板夹角 θ 有关,下面将通过离散元法探究种槽板夹角 θ 对种子运动状态的影响。

2 振动式精密播种装置仿真分析

利用离散元仿真软件 EDEM,分别对振动式精密播种装置的定量供种机构和振动匀种机构进行播种性能仿真。

2.1 定量供种机构的供种过程仿真

为探究供种时交叉导流式种箱内水稻种子的流动特性,以及振动对供种性能的影响,利用离散元仿真软件 EDEM 模拟定量供种机构的工作过程,以种箱振动板有、无振动作用进行仿真对比试验。通过三维建模软件 Solidworks 创建定量供种机构的三维实体模型并导入 EDEM 软件中,创建水稻芽种颗粒,由 23 个基础颗粒球组成^[20]。设置水稻泊松比为 0.25,剪切模量为 108 MPa,密度为 1 098 kg/m³;不锈钢板(种箱及导种板材料)泊松比为 0.30,剪切模量为 79 000 MPa,密度为 7 850 kg/m³;尼龙 1010(螺旋勺式排种轮材料)泊松比为 0.28,剪切模量为 1 070 MPa,密度为 1 050 kg/m³。水稻种子含水率约 37.3%,种子颗粒与各材料间的接触参数见表 1。

根据定量供种机构实际工作状态设置模型运动参数,排种轮模型运动设置为线性旋转,转速为 7.0 r/min。使用的电磁振动器型号为 DH180-2-1,振动频率为 50 Hz,通过振动测试分析得到种箱振动板在电磁振动器的作用下产生简谐振动,且振幅可调范围为 0~0.02 mm,因此设置振动板运动为正弦平移,频率为 50 Hz,根据播量要求振幅选用 0.015 mm。

表 1 仿真所需接触参数

Tab. 1 Contact parameters of simulation

接触参数	数值
水稻与水稻恢复系数	0.42
水稻与水稻静摩擦因数	0.354
水稻与水稻滚动摩擦因数	0.016
水稻与不锈钢板恢复系数	0.52
水稻与不锈钢板静摩擦因数	0.52
水稻与不锈钢板滚动摩擦因数	0.01
水稻与尼龙 1010 棒恢复系数	0.5
水稻与尼龙 1010 棒静摩擦因数	0.5
水稻与尼龙 1010 棒滚动摩擦因数	0.02

2.1.1 种子在种箱内的流动特性分析

以振动板的振动作用作为试验因素,设计两组供种过程模拟试验,一组设置振动,另一组不设置振动,其余参数设置均相同,仿真时间为 85 s。仿真完成后,对种箱内的种子颗粒进行染色分层,由下至上将种子分为 10 层,以最底层为第 1 种层,以最顶层为第 10 种层。分别选取两组仿真试验过程中的 4 个时刻进行分析,如图 4 所示,左图为种箱振动板有振动作用,右图为无振动。

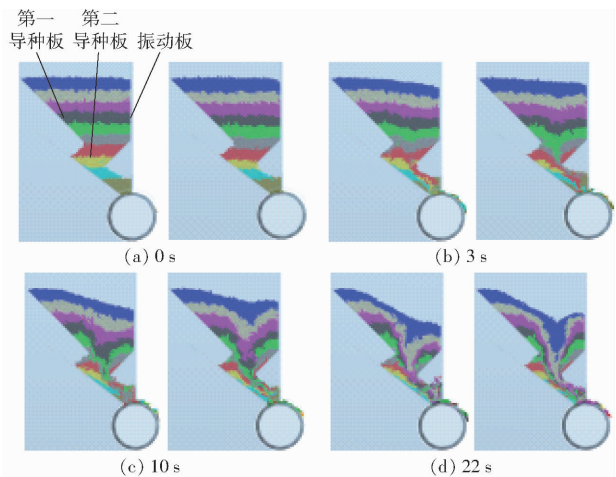


图 4 交叉导流式振动种箱供种过程仿真
Fig. 4 Feeding process simulation of cross-flow vibration seeds box

图 4a 为初始时刻水稻种子自然填充于种箱内第一导种板下部、种箱振动板下部及第二导种板之间,形成了“Z”型连续种流,缓解了大量种子直接堆积在排种轮上方产生的正压力。图 4b 为排种轮转

动了 3 s 时,在此过程中,左图供种机构在振动作用下第 1~4 种层种子按种层顺序排出种箱,第 5~10 种层种子整体流动平稳下落;右图供种机构无振动时第 1~4 种层种子随排种轮的转动相互混合,乱序排出种箱,第 5~7 种层种子开始呈现漏斗状流动^[21],第 8~10 种层平稳下落。图 4c、4d 分别为排种轮转动了 10 s 和 22 s 时,在此过程中,左图种箱右侧由于振动作用种子流速较快,故种子整体高度向右下方倾斜,呈现扩散流动,流速较平稳;右图种箱内漏斗状明显,各层种子均形成了漏斗流,流速不稳定。

观察两组仿真试验整个供种过程,与导种板内壁接触的种子均形成了不流动区。当右侧振动板无振动时,种箱左右两侧皆存在不流动区,因此种子形成漏斗流动,速率不稳定,种子密度不均匀,影响排种轮的充填性能。而当右侧振动板振动时,振动作用提高了右侧种子流速,仅左侧导种板上存在不流动区,缓解了漏斗流,促进种子扩散流动,稳定了种子整体的流速和密度,提高了供种稳定性。

根据两组试验仿真完成时间,有振动时供种试验种箱内的种子在 78 s 内被排空,无振动时则在 82 s 内被排空,表明在振动作用下排种轮的供种频率(单位时间内排种轮的供种质量, g/s)较高。为确定振动对供种频率的提高比率,对两组仿真试验的供种质量进行统计,绘制定量供种机构的供种质量随时间变化曲线对比,如图 5 所示。对图 5 中 2 条曲线做线性拟合,得到种箱振动板有振动时排种轮的供种质量

$$Q_1 = 10.177t \tag{10}$$

其决定系数 $R_1^2 = 0.9997$ 。无振动时排种轮供种质量

$$Q_2 = 9.851t \tag{11}$$

其决定系数 $R_2^2 = 0.9999$ 。两种工况下的线性拟合度均接近 1,表明定量供种机构在排种轮匀速转动条件下能够连续稳定地供种;有振动时排种轮供种频率为 10.177 g/s,无振动时供种频率为 9.851 g/s,表明振动作用促进了排种轮的供种性能,供种频率

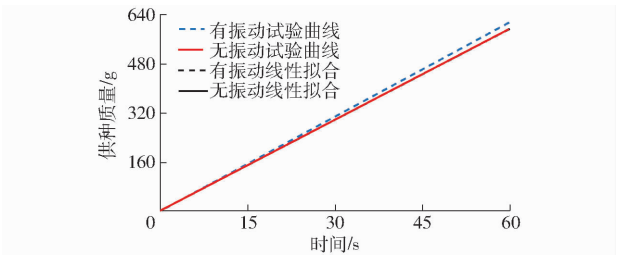


图 5 定量供种机构有无振动时供种质量对比
Fig. 5 Feeding weight comparison of quantitative-seeds feeding device with or without vibration

提高了 3.31%。

2.1.2 种子在充填区分布状态与流速分析

为研究振动对排种轮充填区内的种子分布“蓬松”程度和种子流速的影响,在排种轮的强制层和带动层添加网格进行分析,划分强制层、带动层Ⅰ、带动层Ⅱ、带动层Ⅲ,如图6所示。

随机选择仿真过程的4个时刻,分别统计强制层、带动层Ⅰ、带动层Ⅱ、带动层Ⅲ网格内的种子数量,统计结果如表2所示。通过表2中各网格内的颗粒数量对比可以看出,振动板有振动比无振动时强制层内的种子数量多,而带动层(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)内的种子数量少,表明种箱内侧的振动作用促进排种轮充填区的种子分布状态更为“蓬松”;振动使强制层

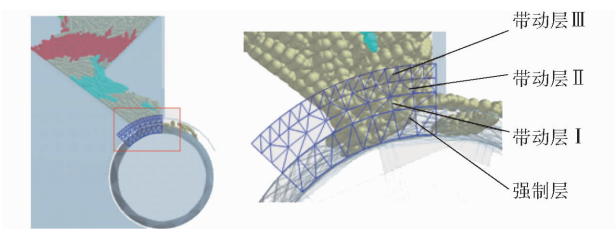


图6 排种轮强制层与带动层网格划分
Fig.6 Meshing for compulsion layers and driven layer of wheel

的种子获得较快的流速,单位时间内充填进入排种轮凹槽内的种子较无振动时多,因而排种轮的供种频率较高。此外,振动时的颗粒数量变异系数小于无振动,表明振动作用下排种轮的充种量更稳定。

表2 各网格区域颗粒数量和变异系数
Tab.2 Particle number of grid regions

区域	3.9 s 颗粒数量		18.2 s 颗粒数量		30.8 s 颗粒数量		46 s 颗粒数量		变异系数	
	有振动	无振动	有振动	无振动	有振动	无振动	有振动	无振动	有振动	无振动
强制层	13	10	15	11	12	6	12	10	0.11	0.24
带动层Ⅰ	15	17	15	17	14	17	15	16	0.03	0.03
带动层Ⅱ	14	16	13	22	14	20	15	15	0.06	0.18
带动层Ⅲ	12	16	18	18	15	19	14	19	0.11	0.22

对带动层和强制层的颗粒速度进行统计,绘制仿真3~21 s过程中种子的流速曲线,如图7所示,进一步分析振动对充种区种子流速的影响。通过图7a种子流速变化曲线对比,振动作用对排种轮强制层的种子流速大小影响不明显,而计算和比较两组种子流速平均值时则有振动略微大于无振动时。由图7b可知,有振动时种子流速曲线整体高于无振动时,表明振动作用加速了带动层Ⅰ区域的种子流速,从而促进种子充填进入排种轮的凹槽内,提高排种轮的供种频率。通过图7c可以看出,对于带动层Ⅱ的种子,在无振动时速度变化剧烈,而在有振动时

速度稳定,表明振动作用有效地稳定了该层种子流速。图7d为带动层Ⅲ种子流速,从两条速度对比曲线来看,种子流动速度变化差异不明显,通过趋势线对比表明有振动时种子流速变化稍平稳。

上述分析以定量供种机构大播种量供种(适用于常规稻,通常播量标准秧盘80~120 g/盘,即3~7粒/穴或格)为例进行探究。针对低播量供种(适用于杂交稻,通常播量标准秧盘40~60 g/盘,即1~4粒/穴)以相同的方法进行模拟分析,得到种子在种箱内交叉导流式结构上的流动特性以及在排种轮充填区的分布状态和流速,在有无振动作用对比仿

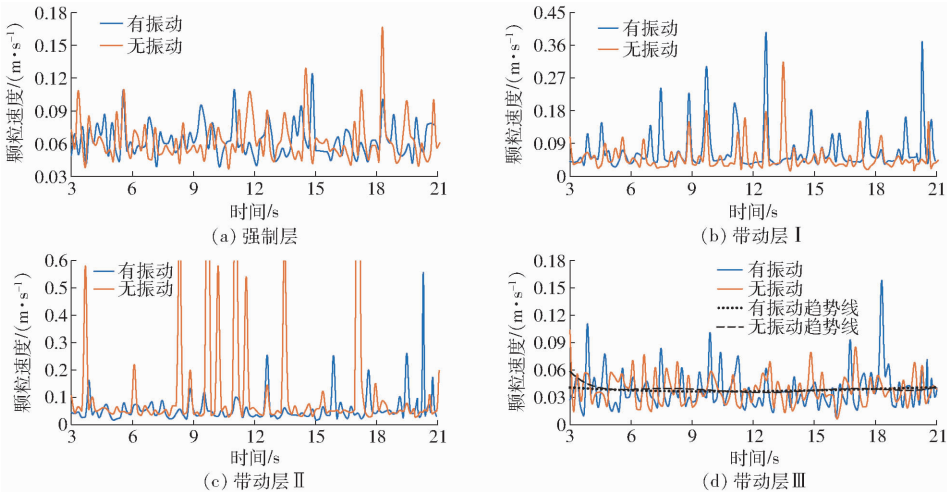


图7 不同区域颗粒流速对比曲线
Fig.7 Particles velocity comparison curves of different regions

真试验中表现出的规律与常规稻供种时基本一致，杂交稻低播量时有振动比无振动时排种轮的供种频率高 5.41%。

综上采用离散元法对定量供种机构在有振动与无振动条件下，分别进行常规稻及杂交稻供种过程模拟，从种箱内的种子流速变化及分布“蓬松程度”等方面分析，验证了交叉导流式结构能够为排种轮提供连续稳定的种子流，揭示了振动作用稳定种子流速和提高机构供种频率的机理，表明该定量供种机构较优的供种性能能够满足精密播种需求。

2.2 振动匀种机构的播种性能仿真

振动匀种机构的种槽板对种子的限位作用决定了种子的有序排队状态，进而影响条播或穴播时种子流与秧盘的对行或对穴性能。为了达到较好的播种性能，播种时到达种槽出流口的种子最好垂直落入该种槽对应的秧盘行或秧穴中，尤其当杂交稻低播量播种时需要种子在种槽板上保持沿长轴方向有序排队，同时避免剧烈跳动或摆动，防止掉落过程中发生弹跳落入相邻的秧盘行或秧穴中。

为探究不同类型与参数的种槽板对种子流速、排队状态及播种性能的影响，设计了 9 组种槽板，即不同种槽夹角 θ 的 V 型种槽板：V-60°、V-75°、V-90°、V-105°、V-120°、V-135°、V-150°，和不同半径的 U 型种槽板：U1（半径为 6.30 mm）、U2（半径为 7.00 mm），进行水稻精少量播种性能模拟试验。旨在筛选种槽板因素水平，为装置优化试验提供理论依据，减少试验次数，节省时间和成本。

仿真所需材料的物性参数及接触参数参照 2.1 节进行设置，秧盘运动设置为匀速行走，速度为 0.083 m/s（播种流水线生产率 500 盘/h），振动种盘运动参考文献[14]进行设置，仿真时间为 12 s。

2.2.1 不同种槽板对种子流速影响

统计在播种过程稳定后 4~10 s 内，9 组仿真试验种槽板上的种子流动速度，每组取 100 个数据，绘制种子速度箱线图，如图 8 所示。通过观察箱线图中每组数据箱体和线段的长短，可得到数据的四分位距大小，以及正常值的分布范围，从而直观地判断不同种槽板对种子流速及稳定性的影响。

从图 8 中各组箱线图的高度分布来看，V 型种槽板夹角 θ 从 60°到 150°，各组箱线的高度、速度最大值和中位数随 θ 增大而下降，表明随着种槽板夹角 θ 的增大，种子在种槽板上的流动速度整体呈减小的趋势；对于 U 型种槽板，U1 型种槽板上的种子流速略大于 U2 型种槽板，表明种槽半径较大时种子流速较慢。从各组箱线长度和异常值分布情况可以看出，随着种槽板夹角 θ 的增大，种子速度分布范

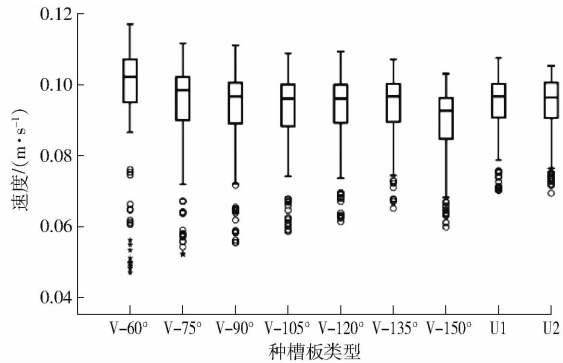


图 8 不同种槽板上种子速度箱线图

Fig. 8 Box plot of seeds velocity on different striper tanks

围逐渐集中，种子速度异常值逐渐减少，且在种槽板夹角 θ 大于等于 120°时，种子流速分布范围相近，表明随着种槽板夹角 θ 的增大，种子流速趋于稳定，且在 θ 达到 120°时种子流速稳定性随槽板夹角的增大变化不明显。两种 U 型种槽板上种子速度异常值少，表明种子在 U 型槽上的流速较 V 型槽稳定。

2.2.2 不同种槽板对种子排队状态影响

观察种子在种槽板上的排队状态及到达种槽板出流口落入秧盘内的掉落状态，分析播种过程中不同种槽板对种子的限位作用和对行、对穴性能影响。图 9 为 9 组种槽板上种子的排队状态，从图中可以看出，对于 V 型种槽板，当种槽板夹角 θ 较小（60°、75°和 90°）时，种槽板对种子的限位作用强，此时种槽内的种子可沿其长轴方向有序排队，并形成较均匀的单粒到 1.5 粒种子流；随着种槽板夹角 θ 增大，种槽板对种子的限位作用逐渐减弱，当 θ 为 105°和 120°时，种子与种槽的接触面积增大，种槽内的种子可前后交叠排列形成较均匀的 1.5 粒到 2 粒种子流；当 θ 为 135°和 150°时，种槽板夹角过大，此时种槽板对种子的限位作用弱，无法引导种子在槽板内有序排队形成均匀的种子流。对于 U 型槽板，种子与种槽板的接触面积大，种子排列较不规律，当 U 型槽半径较小（U1 半径为 6.30 mm）时可形成较均匀的 1.5 粒到 2 粒种子流，当 U 型槽半径较大（U2 半径为 7.00 mm）时形成无序的 2 粒种子流。

此外，通过观察种子在不同种槽板出流口落入秧盘时的形态，得到 V-60°、V-75°和 V-90°种槽板中，由于种槽板的限位作用好，种子能够垂直掉落到下方的秧盘中；V-105°和 V-120°种槽板限位性一般，但由于种子流速较稳定，种子随槽板振动作用前后摆动行走，也能够垂直掉落至秧盘中，较准确地实现对行对穴；而 V-135°、V-150°、U1 和 U2 型种槽板，由于限位性差，种子随槽板振动作用产生小幅度的左右摆动，掉落时易发生翻滚，对行对穴性能较

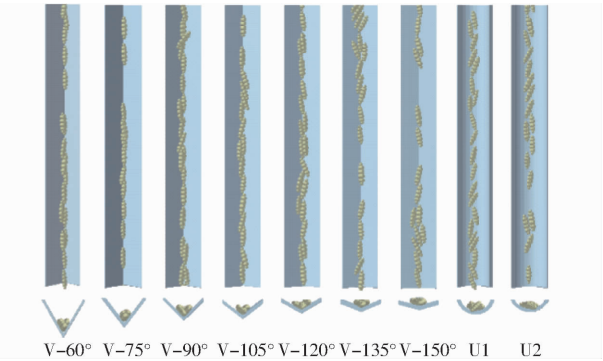


图9 种子在不同种槽板上的排队状态

Fig.9 Queue conditions of seeds on different striper tanks

差。

2.2.3 不同种槽板对播种性能影响的仿真分析

为进一步确定播种性能较优的种槽板,统计不同种槽板的播种合格指数与空穴指数等性能指标。每组仿真试验分别播种3个秧盘,统计秧盘中每穴内的种子数量,评价指标为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{N_2}{N} \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中 Y_1 ——播种合格指数
 Y_2 ——空穴指数
 N_1 ——合格穴数,合格区间为1~4粒/穴
 N_2 ——空穴数,无种子为空穴
 N ——总秧穴数

统计结果见表3。

表3 不同种槽板播种性能仿真试验结果

Tab.3 Simulation result of sowing performance on different striper tanks

种槽板 类型	合格 指数/%	空穴 指数/%	平均每穴 粒数	标准差
V-60°	87.96	9.26	1.94	1.13
V-75°	86.11	12.04	1.84	1.17
V-90°	91.67	4.63	2.37	1.32
V-105°	90.74	6.48	1.97	1.21
V-120°	92.12	2.04	2.02	1.25
V-135°	89.81	8.33	2.02	1.19
V-150°	90.59	10.19	1.92	1.03
U1	90.59	3.70	2.00	1.15
U2	89.81	10.19	1.81	1.10

从表3试验结果可以看出,V-60°和V-75°种槽板的播种空穴指数高,不能满足水稻精密播种要求,其原因是在种槽板上形成的是单粒种子流,存在断流的位置播入秧盘中即形成了空穴;V-135°、V-150°和U2型种槽板空穴指数高,其原因是槽板的限位性差,不能形成均匀的种子流;V-90°、V-

105°、V-120°和U1型种槽板的播种合格指数均超过90%,空穴指数较低,平均每穴粒数满足播种要求,且标准差较小,表明较稳定的种子流速和连续均匀的种子流是实现水稻精少量播种的重要条件。

综上对种子在不同种槽板上的流速及排队状态分析,以播种合格指数和空穴指数作为评判播种性能的指标,优选了播种效果较好的V-90°、V-105°、V-120°和U1型种槽板,为进行机构的播种性能优化试验提供了参考。

3 试验与结果分析

分别进行定量供种机构在种箱振动板有振动与无振动条件下的供种频率对比试验,以及不同种槽板播种性能试验,以验证仿真的准确性,确定最优种槽板能够提高精密播种装置的性能。试验地点在华南农业大学农业工程实验室,采用研制的振动式精密播种装置,安装在水稻秧盘育秧精密播种流水线上,装置如图10所示。试验所用水稻品种:杂交稻品种为培杂泰丰,种子含水率约为27.5%,千粒质量为28.20g;常规稻品种为华航38号,种子含水率约为27.38%,千粒质量为27.59g。两个水稻品种均进行催芽处理,种子破胸露白后再进行播种试验。

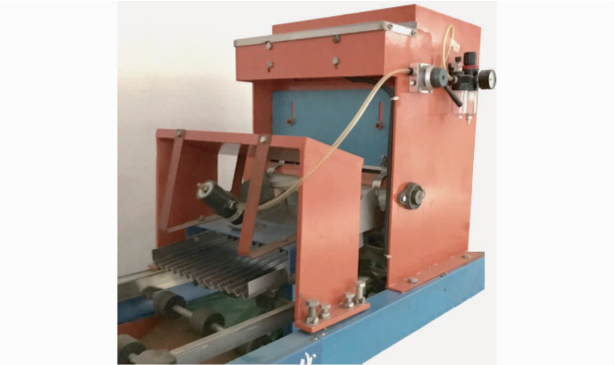


图10 振动式水稻精密播种装置实物图

Fig.10 Vibration rice precision sowing device

3.1 定量供种机构供种频率对比试验

为探明振动作用对定量供种机构供种稳定性和供种频率的影响,以种箱振动板的振动作用作为试验因素,对供种机构有、无振动时的供种频率进行测定分析。有振动时开启电磁振动器并调节振动板产生0.015mm的振幅(可通过振动测试得到),无振动时关闭电磁振动器,分别进行定量供种机构常规稻与杂交稻供种试验。常规稻供种时排种轮转速为7.0r/min,杂交稻低播量时转速为3.3r/min。

供种频率测定方法为:在机构工作稳定后,有、无振动条件下分别接取排种轮转动60s所排出的种子质量,使用精度0.01g的电子秤进行称量,计算排种轮的供种频率,每组试验重复6次,求取平均

供种频率;供种稳定性的测定方法为:接取排种轮转动 5 s 所排出的种子质量并称量,有、无振动条件下各重复 5 次,求取供种频率变异系数。试验结果见表 4。

表 4 定量供种机构供种频率对比试验结果

Tab. 4 Feeding frequency comparison test result of quantitative-seeds supply device

参数	常规稻供种		杂交稻供种	
	有振动	无振动	有振动	无振动
排种轮供种频率/(g·s ⁻¹)	9.96	10.01	4.73	4.46
	9.67	9.92	4.35	4.38
	10.21	9.38	4.49	4.31
	9.89	9.83	4.66	4.02
	10.13	8.96	4.71	4.59
变异系数/%	2.12	4.59	3.56	4.89
平均供种频率/(g·s ⁻¹)	9.97	9.62	4.59	4.35
振动供种提高率/%	3.64		5.52	

由表 4 可知,常规稻供种时电磁振动作用使供种频率提高 3.64%,杂交稻低播量时提高 5.52%,与 2.1.2 节仿真结果进行对比,仿真相对误差分别为 9.07% 和 1.99%,表明仿真结果精度较高。常规稻供种时有、无振动条件下的供种频率变异系数均较低播量供种时小,表明常规稻供种时排种轮单位时间内排出的稻种量更加稳定;在振动板有振动作用时,可提高常规稻供种稳定性 2.47%,杂交稻供种稳定性提高 1.33%,表明振动板振动对常规稻供种稳定性提高作用更明显。

3.2 不同种槽板播种性能试验

以种槽板类型、播种量、气压作为试验因素进行全因素播种性能试验。仿真试验优选的种槽板类型因素(A)水平为:V-90°、V-105°、V-120°和 U1 型种槽板;播种量因素(B)水平为:常规稻(80 g/盘)和杂交稻(40 g/盘);常用气压(C)水平为:0.24、0.26、0.28 MPa,共进行 24 组试验。

水稻秧盘育秧精密播种流水线播种生产率为 500 盘/h,秧盘为 14×29 钵体毯状软盘。每组试验播种 6 盘,每盘随机选取 2 个区域,区域 1 横向完整 2 行(14 格×2 行)和区域 2 横向 6 行、纵向 7 列(6 格×7 格),统计并计算每组的播种合格指数、空穴指数、平均每穴粒数和标准差。杂交稻低播量播种合格区间为 1~4 粒/穴,常规稻大播量播种合格区间为 3~7 粒/穴。分别计算 4 组种槽板在播种杂交稻和常规稻时的性能指标平均值 k ,试验结果见表 5,播种效果如图 11 所示。

通过表 5 播种性能试验结果比较,杂交稻低播量播种时和常规稻大播量播种时,试验因素 A 在 k_3

表 5 播种性能试验结果

Tab. 5 Test result of sowing performance

序号	槽板类型	播种量 B/ (g·盘 ⁻¹)	气压 C/ MPa	合格 指数/ %	空穴 指数/ %	平均 每穴 粒数	标准 差
	A						
1	V-90°	40	0.24	80.98	5.98	2.30	1.82
2	V-90°	40	0.26	90.38	4.27	2.15	1.59
3	V-90°	40	0.28	88.25	1.50	2.50	1.54
4	V-90°	80	0.24	84.36	0.26	5.54	1.99
5	V-90°	80	0.26	85.00	0.83	5.39	2.01
6	V-90°	80	0.28	92.74	0.21	5.64	1.54
7	V-105°	40	0.24	92.40	1.90	2.39	1.46
8	V-105°	40	0.26	85.38	5.13	2.33	1.65
9	V-105°	40	0.28	90.17	2.56	2.47	1.50
10	V-105°	80	0.24	82.91	0.21	5.78	1.72
11	V-105°	80	0.26	93.80	0	5.59	1.39
12	V-105°	80	0.28	93.08	0	5.91	1.21
13	V-120°	40	0.24	86.36	2.60	2.39	1.61
14	V-120°	40	0.26	93.91	0.94	2.05	1.49
15	V-120°	40	0.28	90.26	2.16	2.37	1.52
16	V-120°	80	0.24	90.72	0	5.53	1.71
17	V-120°	80	0.26	94.29	0	5.59	1.65
18	V-120°	80	0.28	96.10	0	5.42	1.60
19	U1 型	40	0.24	82.25	3.06	2.32	1.76
20	U1 型	40	0.26	90.72	1.90	2.15	1.52
21	U1 型	40	0.28	86.36	1.56	2.42	1.59
22	U1 型	80	0.24	90.38	0.26	5.74	1.72
23	U1 型	80	0.26	92.64	0	5.54	1.56
24	U1 型	80	0.28	90.56	0.21	5.63	1.58
合格指数	k_1	86.95	88.12	86.30			
	k_2	89.62	90.55	90.77			
	k_3	91.94		90.94			
	k_4	88.81					
空穴指数	k_1	2.18	2.80	1.78			
	k_2	1.63	0.17	1.63			
	k_3	0.95		1.03			
	k_4	1.17					
平均每穴粒数	k_1	3.92	2.32	4.00			
	k_2	4.08	5.61	3.85			
	k_3	3.89		4.05			
	k_4	3.97					
标准差	k_1	1.75	1.59	1.72			
	k_2	1.49	1.57	1.61			
	k_3	1.60		1.51			
	k_4	1.62					

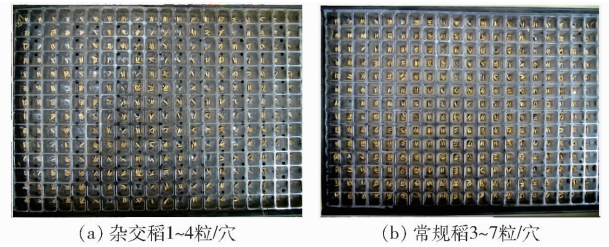


图 11 播种效果

Fig. 11 Seeding effect

水平下的播种平均合格指数最高、平均空穴指数最低,平均每穴粒数满足播种要求且标准差较小,表明

两种播量下 $V-120^\circ$ 种槽板的播种性能均最优,与 2.2.2 节仿真试验优选结果一致。同时,采用该种槽板进行低播量播种,当气压为 0.26 MPa 时播种合格指数为 93.91%,空穴指数为 0.94%;常规稻播种时当气压为 0.28 MPa,播种合格指数为 96.10%,空穴指数为 0,满足常规稻与杂交稻精少量播种育秧技术要求,优化了振动式水稻精密播种装置的播种性能。

4 结论

(1)采用离散元法进行了有无振动时定量供种机构的工作过程仿真研究,得出在振动条件下进行供种,可提高供种频率和稳定性。通过分析种箱内不同种层的种子流动特性,验证了交叉导流式振动种箱可为排种轮提供连续稳定的种子流;通过对比分析充填区种子的流速与“蓬松”程度得知,振动作用能够有效地稳定种子流速和分布密度,提高供种频率。

(2)进行了不同类型与参数种槽板播种性能仿真试验,得到了种子在不同种槽板上的流速规律。

通过分析不同种槽板对种子流速、有序排列及播种性能的影响可知,种子流速随着种槽板夹角 θ 增大而减小并趋于稳定,且当 θ 达到 120° 时,流速稳定性随 θ 增大的变化不明显;以播种合格指数和空穴指数为指标,筛选出了 $V-90^\circ$ 、 $V-105^\circ$ 、 $V-120^\circ$ 和 U1 型 4 组种槽板的播种效果较好,为装置优化试验减少了试验次数。

(3)进行了定量供种机构的供种频率试验和精密播种装置性能优化试验,确定了播种效果最佳的种槽板为 $V-120^\circ$ 种槽板。通过定量供种机构试验,得到常规稻、杂交稻供种时电磁振动作用分别可提高供种频率 3.64% 和 5.52%,验证了定量供种机构在有无振动作用下的仿真结果误差较小;通过精密播种装置性能优化试验,得到采用 $V-120^\circ$ 种槽板,以 0.26 MPa 气压进行低播量播种时,合格指数为 93.91%,空穴指数为 0.94%,以 0.28 MPa 气压进行常规稻播种时,合格指数为 96.10%,空穴指数为 0,满足常规稻与杂交稻精密播种育秧技术要求,为水稻精密播种装置的研究提供了基础。

参 考 文 献

- 李泽华,马旭,李秀昊,等.水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1-20. (in Chinese)
- YOO S N, CHOI Y S, SUH S R. Development of a precision seed metering device for direct seeding of rice[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2005, 30(5):261-267.
- 李洪昌,高芳,赵湛,等.国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2014,35(2):12-16,56.
LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2):12-16,56. (in Chinese)
- 李耀明,徐立章,向忠平,等.日本水稻种植机械化技术的最新研究进展[J].农业工程学报,2005,21(11):182-185.
LI Yaoming, XU Lizhang, XIANG Zhongping, et al. Research advances of rice planting mechanization in Japan[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11):182-185. (in Chinese)
- 孙勇飞,吴崇友,张文毅,等.水稻育秧播种机的发展概况与趋势[J].农机化研究,2013,35(12):210-215.
SUN Yongfei, WU Chongyou, ZHANG Wenyi, et al. Development situation and tendency of rice seedling planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12):210-215. (in Chinese)
- 李志伟,邵耀坚.电磁振动式水稻穴盘精量播种机的设计与试验[J].农业机械学报,2000,31(5):32-34.
LI Zhiwei, SHAO Yaojian. Study and test of electromagnetic vibrating type rice seeder for hill seedling nursery box[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5):32-34. (in Chinese)
- 张石平,陈进,李耀明,等.振动气吸式穴盘精播装置振动条件理论分析与试验[J].农业机械学报,2008,39(7):56-59,79.
ZHANG Shiping, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Theoretical analysis and experiment on vibration conditions for vibrational air-suction tray precision seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):56-59,79. (in Chinese)
- 张学义,邵耀坚.电磁振动排种器种子运动分析及试验研究[J].农业工程学报,1996,12(1):81-86.
ZHANG Xueyi, SHAO Yaojian. Theoretical analysis and experiment on the kinematics of feeding device under electromagnetic vibration[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(1):81-86. (in Chinese)
- 杨望,杨坚,周晓蓉,等.电磁振动排种器振动系统参数的确定[J].农机化研究,2009,31(2):47-50,54.
YANG Wang, YANG Jian, ZHOU Xiaorong, et al. Parameters study on the vibrant system electro magnetic vibrated seeding apparatus[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(2):47-50,54. (in Chinese)
- 张斌,俞亚新,赵匀.超级稻稻种定向播种的原理研究[J].浙江理工大学学报,2008,25(4):454-456.
ZHANG Bin, YU Yaxin, ZHAO Yun. Study on principle of the rice seeds embryo oriented seeding[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(4):454-456. (in Chinese)

- GAO Xiaowei. Research on the application of Crop Circle sensor in real-time nitrogen nutritional status diagnosis and management of winter wheat[D]. Beijing:China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 30 黄珊瑜. 基于多光谱作物冠层传感器的寒地水稻氮营养实时诊断研究[D]. 北京:中国农业大学, 2010.
HUANG Shanyu. Research on multi-spectral canopy sensors-based real-time diagnosis of rice nitrogen status in cold region[D]. Beijing:China Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 31 王备战, 冯晓, 温暖, 等. 基于 SPOT-5 影像的冬小麦拔节期生物量及氮积累量监测[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3049-3057.
WANG Beizhan, FENG Xiao, WEN Nuan, et al. Monitoring biomass and N accumulation at jointing stage in winter wheat based on SPOT-5 images[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(15): 3049-3057. (in Chinese)
- 32 YUE S, MENG Q, ZHAO R, et al. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 523-528.
- 33 千怀遂. 农作物遥感估产最佳时相的选择研究——以中国主要粮食作物为例[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 50-57.
QIAN Huaisui. Selection of the optimum temporal for crop estimation using remote sensing data—main food crops in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(1): 50-57. (in Chinese)
-

(上接第 128 页)

- 11 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)
- 12 ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23): 5728-5770.
- 13 YU A B. Discrete element method: an effective method for particle scale research of particulate matter [J]. Engineering Computations, 2004, 21(2-4): 205-214.
- 14 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17-25. (in Chinese)
- 15 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83, 100.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis on rice seeds motion on vibrating plate using EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83, 100. (in Chinese)
- 16 玉大略, 马旭, 周海波, 等. 振动流动式水稻秧盘育秧播种器的试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 137-139.
YU Dalu, MA Xu, ZHOU Haibo, et al. Experimental research of vibration flow type rice seedlings seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 137-139. (in Chinese)
- 17 周海波, 梁秋艳, 魏天路, 等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 57-61, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.009.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57-61, 83. (in Chinese)
- 18 胡继云, 廉振红, 邵洪涛. 单自由度简谐振动机械弹性支承刚度和激振力的设计[J]. 河南工业大学学报:自然科学版, 2006, 27(4): 11-14.
HU Jiyun, LIAN Zhenhong, SHAO Hongtao. The design of elastic supporting stiffness and exciting force for simple harmonic vibration machine with single-degree-of-freedom [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 27(4): 11-14. (in Chinese)
- 19 刘习军, 贾启芬. 工程振动理论与测试技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 39-41.
- 20 鹿芳媛, 马旭, 谭德妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment of rice bud seeds discrete elements main contact parameters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93-99. (in Chinese)
- 21 陈长冰. 基于整体流型的粉体料仓设计分析[J]. 化工设备与管道, 2006, 43(3): 34-38.
CHEN Changbing. Design and analysis of silos with mass flow [J]. Process Equipment and Piping, 2006, 43(3): 34-38. (in Chinese)