

杂交稻气力滚筒集排式排种器楔形搅种装置设计与试验

王宝龙^{1,2}, 王在满^{1*}, 罗锡文¹, 张明华¹, 方龙羽¹, 刘顺财¹, 许 鹏¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 海南大学园艺学院, 海口 570228)

摘 要: 为提高杂交稻气力滚筒集排式精量排种器的排种精度, 该文设计了一种楔形搅种装置, 以解决滚筒型排种器由于充种时间短和吸种区稻种架空造成吸种精度低的问题。以厚度 1、2 和 1-2 mm 带有坡度(其最薄处厚度为 1 mm、最大厚度处为 2 mm)3 种楔形搅种装置为研究对象, 简化排种器模型, 进行了搅种过程离散元仿真模拟, 以吸孔附近稻种层的平均法向接触力和平均三轴合速度为评价指标, 分析了不同搅种装置对种群内摩擦力变化的影响, 得出 1-2 mm 带有坡度的搅种装置对稻种种群的搅动效果较好; 以杂交稻种晶两优 1212 为研究对象, 采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验, 研究在 1-2 mm 带有坡度的楔形搅种装置下吸种负压、滚筒转速、清种距离(清种指到吸孔边缘距离)对滚筒型排种器排种性能的影响。结果表明: 以漏吸率(X_1) (0 粒/穴), 合格率(X_2) (1~3 粒/穴), 重吸率(X_3) (≥ 4 粒/穴)为评价指标, 预测最优组合为吸种负压为 1.60 kPa、滚筒转速为 10 r/min、清种距离为 1.94 mm, 其合格率为 84.67%, 重吸率为 7.92%, 漏吸率为 7.41%, 试验验证上述最优组合: 合格率为 86.00%, 重吸率为 8.47%, 漏吸率为 5.53%。该研究结果表明, 安装 1-2 mm 带有坡度楔形搅种装置对稻种的分离、搅动和助吸有明显作用, 可提高排种器吸种性能, 为进一步优化杂交稻气力滚筒集排式精量直播机排种性能提供依据。

关键词: 作物; 农业机械; 试验; 杂交水稻; 气力滚筒; 搅种; 离散元

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.001

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0001-08

王宝龙, 王在满, 罗锡文, 张明华, 方龙羽, 刘顺财, 许 鹏. 杂交稻气力滚筒集排式排种器楔形搅种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 1—8. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.001 <http://www.tcsae.org>
Wang Baolong, Wang Zaiman, Luo Xiwen, Zhang Minghua, Fang Longyu, Liu Shuncai, Xu Peng. Design and experiment of wedge churning device for pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 1—8. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.001 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

水稻种植机械化是水稻生产全程机械化中难度实现的环节, 水稻种植机械化主要有有机直播、机抛秧和机插秧 3 种模式。近年来, 中国水稻机械直播技术发展很快, 其中水稻精量穴直播技术省工省时、稻田通风透气性好、病虫害少、水稻分蘖节位低和长势均匀等优势, 近年来推广面积逐年增大^[1-4]。

杂交水稻具有分蘖能力强和产量高等特点, 已在中国广泛推广, 2013 年杂交水稻种植面积为 1 617.87 万 hm^2 , 占水稻种植面积的 53.37%^[5-6]。现有机械式排种器主要适合中等或大播量要求, 不适应杂交稻精少播量的要求。气力式排种器具有对芽种损伤少、对稻种外形尺寸适应能力强等特点, 适合精少量播种。为提高气力式排种器排种性能, 国内外近年来对气力式排种器吸种过程中物

料颗粒的分布及吸取机理进行了研究。张国忠、邢赫等^[7-10]设计了一种垂直圆盘式气力排种器, 对直线型和导向型搅种装置进行了试验研究, 结果表明: 搅种装置对垂直圆盘型气力排种器的吸种性能具有显著影响。雷小龙等^[11]设计了一种油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置, 分析了搅种装置影响充种性能的主要因素, 确定了搅种装置与搅种轴的主要结构参数, 采用 DEM (discrete element method) 方法仿真分析和台架试验研究了搅种装置结构及其排布对充种性能的影响。刘月琴等^[12]通过离散元法对排种器内种群的离散度、种子间的作用力和种子速度进行仿真分析。国内外对滚筒型排种器吸种过程工作参数进行了广泛研究, 但对气力滚筒型排种器的研究都未涉及杂交稻稻种^[13-19]。

气力滚筒式排种器可实现连续转动过程中吸种和排种, 具有结构简单、高效排种的特点, 是气力式排种器的主要类型之一。为提高杂交稻气力滚筒集排式排种器的吸种精度, 本文设计了一种带有楔形搅种装置的气力滚筒集排式排种器。采用离散元法, 以晶两优 1212 种子为研究对象, 采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验, 研究了吸种负压、滚筒转速、清种距离(清种指到吸孔边缘距离)及不同类型搅种装置对滚筒型排种器吸种性能的影响, 进行了排种性能试验, 为气力滚筒集

收稿日期: 2018-11-08 修订日期: 2019-02-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0100800); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-01-41)

作者简介: 王宝龙, 博士, 主要从设施农业智能化生产装备技术研究。

Email: wangbaolong0205@163.com

*通信作者: 王在满, 副研究员, 主要从事农业机械化研究。

Email: wangzaiman@scau.edu.cn

排水稻精量穴直播机排种器的优化设计提供依据。

1 排种器结构及原理

1.1 总体结构

本文根据杂交稻精少量穴播的要求，设计了一种气力滚筒集排式水稻排种器及直播机^[20-22]。

如图 1a、1b 所示，气力滚筒集排式排种器主要由种箱 1、外滚筒 2、换气壳体 3、排种管 4、送种管 5、毛刷 6、搅种装置 7、清种指 8 等组成，内外滚筒与换气壳体 3 同轴安装，在弹簧和螺杆的作用下固定的换气壳体 3 与旋转的内外滚筒贴合，搅种装置 7 安装于外滚筒表面上，换气壳内 3 有正负压腔体，处于负压区的滚筒上的吸孔吸取种箱内稻种，多余的稻种在清种装置的作用下返回种箱 1 中，余下吸附的稻种随着滚筒的转动转入正压区，在自重和正压的作用下落入排种管 4 和送种管 5 中，在自重与正压气流的作用下落入播种沟中。

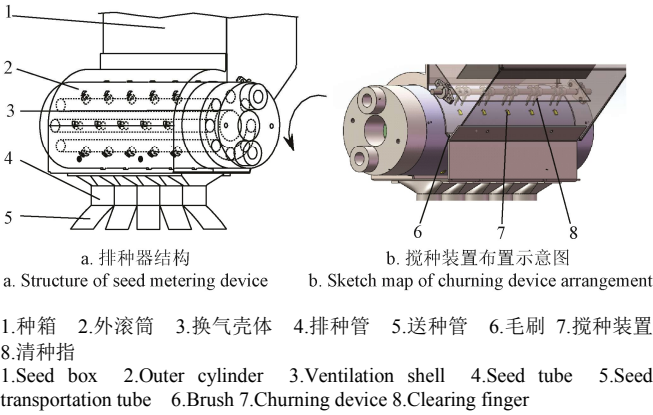


图 1 杂交稻气力滚筒集排式水稻排种器
Fig.1 Pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice

1.2 楔形搅种装置的设计

稻种形状呈现细、长、尖，有棱、有芒和绒毛、流动性差，并且滚筒类型排种器存在着吸种时间短，易在吸种区域形成架空不能吸取稻种等问题^[23-25]，不利于稻种的吸附，前期试验结果表明：在种箱下部安装一种电磁激振装置可有助于滚筒排种器吸种，但其不适合在田间使用。张国忠等在垂直圆盘水稻气力排种器上设计了导向型搅种装置与直线型搅种装置，试验结果显示导向型搅种装置对籼稻种子有分离、导向、摩擦和支撑等助吸作用，可提高排种器的排种精度。

本文在垂直圆盘导向型和直线型搅种装置对其吸种性能影响试验的基础上，设计了一种楔形搅种装置，紧固于滚筒外壁，尖端两侧分布 2 个吸孔，轴向 5 组，周向 8 组，贴近外径直径 135 mm 圆柱外表面，其两端直线距离为 10 mm，搅种装置采用 3D 快速成型机制作，材质为 ABS 塑料，布置如图 1b 所示，其结构如图 2 所示。根据常见杂交稻种的三轴尺寸统计分析（如表 1 所示），图 2a、2b 分别为厚度为 1 mm、2 mm 的搅种装置；2c 为一种带有坡度楔形搅种装置，其最薄处厚度为 1 mm、最大厚度处为 2 mm。

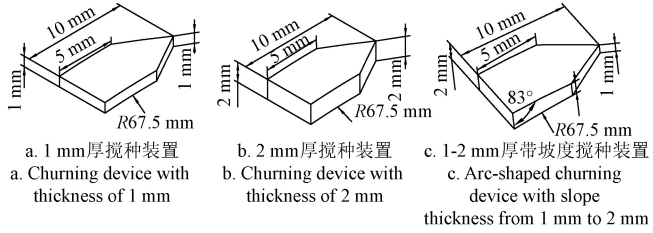


图 2 搅种装置示意图
Fig.2 Schematic draw of churning device

表 1 6 种典型杂交稻品种主要三轴尺寸平均值
Table 1 Average value of the triaxial size of seeds for 6 typical varieties of hybrid rice

品种 Varieties	长度平均 Average length/mm	宽度平均 Average width/mm	厚度平均 Average thickness/mm
软华优 1179	9.82	2.28	1.82
顺两优 1179	9.72	2.64	2.04
晶两优 1212	8.94	2.30	1.94
特优 338	8.22	2.87	2.14
五优 1179	8.62	2.56	1.99

2 基于离散元的搅种过程仿真与分析

2.1 颗粒模型构建

试验选取杂交稻晶两优 1212 为模型，经测量其千粒质量为 21.2 g，采用滑动摩擦因数测定仪测定其滑动摩擦角为 24.5°，平均三轴尺寸 8.94 mm×2.30 mm×1.94 mm。按照平均三轴尺寸，采用半径 0.2 mm 至 1 mm 的多球面颗粒堆积填充，采用 EDEM 模型自动计算稻种颗粒模型质量、体积和转动惯量^[26]，颗粒模型如图 3 所示。

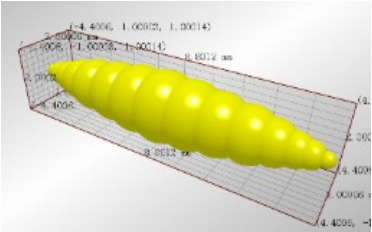


图 3 稻种模型示意图
Fig.3 Schematic diagram of rice seed model

离散元素法是把分析对象看作充分多的离散单元，每个颗粒或块体为一个单元，根据仿真过程中的每一个时间步长，计算各个颗粒之间的接触力，再运用牛顿运动定律计算单元的运动参数。颗粒模型的计算方法一般分为硬球模型和软球模型 2 种类型，软球模型主要用来模拟两个颗粒之间的碰撞过程，其碰撞发生在一定时间范围内，利用牛顿第二定律，根据球体之间的重叠量计算颗粒之间的接触力，本文稻种之间的碰撞属于软球模型。

EDEM 常用的接触模型有 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型、Hertz-Mindlin 黏结接触模型、线性黏附接触模型、运动表面接触模型、线弹性接触模型和摩擦带电接触模型^[27-29]，考虑到稻种表面无黏附力，选取 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型作为稻种与稻种、稻种与搅种装置之间的接触模型。

2.2 排种器模型构建与仿真参数设定

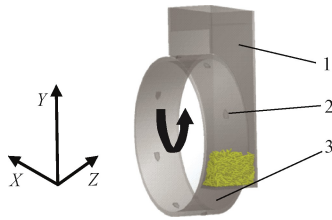
为研究不同厚度搅种装置对滚筒型排种器吸孔附近稻种搅动作用及其变化规律，以获较佳的搅种装置设计参数，在建立稻种颗粒模型和数值分析的基础上，进行 EDEM 离散元仿真试验研究。

气力式排种器在研究对象的扰动与充种过程中，普遍采用的是 CFD-EDEM 气固两相流的耦合，现有相关文献中^[25-27]多采用正压与离散元物料相运动相耦合，负压吸孔式排种器与正压气送式排种器不同的是负压区与物料堆积区不处于同一区域，如果用正压模拟负压会对种群造成不相关的扰动，影响搅动效果，故本文在离散元仿真的过程中只考虑搅种装置对稻种的搅动作用，在试验环节控制不同试验的相同负压条件，以研究不同搅种装置对稻种的搅种性能的影响。

影响滚筒型排种器搅种效果（以稻种种群受到的法向应力表征）的主要因素是滚筒转速、搅种装置厚度与类型，根据前期预试验，选取滚筒转速为 30 r/min，搅种装置厚度分别为 1 mm 厚、2 mm 厚和 1-2 mm 厚带有坡度搅种装置。

2.2.1 排种器模型构建

为了对搅种装置的搅动作用进行离散元仿真，简化模型，缩减一器五行集排式排种器为一行，去除排种装置与接触模型不相关的零件，将排种滚筒、搅种装置与种箱三维模型导入 EDEM 软件中，仿真结构模型如图 4 所示。



1.种箱 2.搅种装置 3.外滚筒
1.Seed box 2.Churning device 3.Outer cylinder

图 4 排种器简化模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of simplified seed metering device

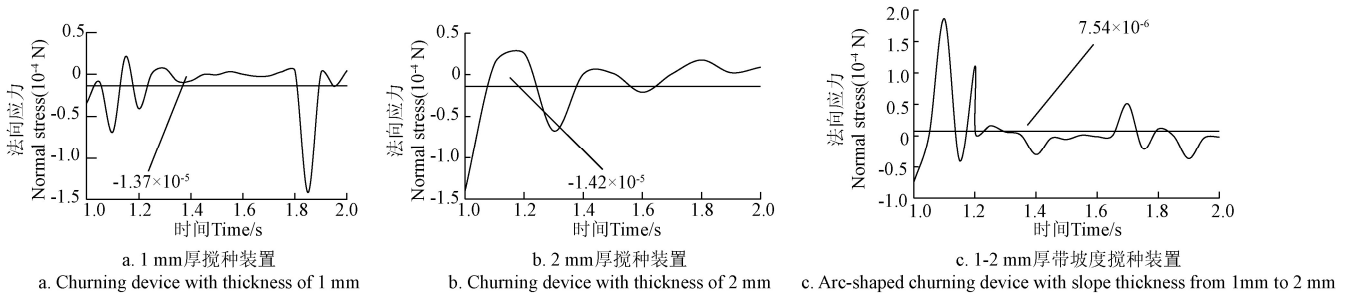


图 5 各种搅种装置稻种平均法向应力随时间变化曲线

Fig. 5 Varying curve of mean normal stress with time for different churning device

其中以 1 s 为界，稻种颗粒在重力的作用下下落至种箱底部，并且逐渐堆积，1 s 后为搅种过程，贴近搅种装置的稻种在其作用下接触力与速度逐渐变化，可以看出：1-2 mm 厚带有坡度搅种装置对稻种种群产生的平均法向

2.2.2 参数设定

根据相关文献报道^[30-31]，排种器材料参数及稻种与排种器材料接触参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料 Materials	泊松比 Poisson's ratio ν	剪切模量 Shear modulus G/GPa	密度 Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
稻种 Rice seed	0.5	181.5	1 139
ABS 塑料（排种器）	0.4	326.6	1 050

表 3 接触参数

Table 3 Contact parameters

接触类别 Contact category	恢复系数 Recovery coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient
稻种-稻种	0.3	0.56	0.15
稻种-ABS 塑料（排种器）	0.5	0.5	0.01

2.2.3 搅种效果评价指标

搅种装置效果评价的重要指标是稻种的扰动效果，稻种向排种器吸孔一侧运动的趋势，产生运动的重要原因是受力，本文以稻种种群在不同参数搅种装置下所受到垂直于排种滚筒的法向接触力和种群整体三轴合速度为指标，对 3 种参数搅种装置进行评价。

2.2.4 仿真结果分析

对 3 种不同类型搅种装置在滚筒转速 30 r/min（直播机前进速度约为 0.5~0.6 m/s）条件下进行仿真研究，设置仿真步长为 20%，时间间隔为 0.05 s，总仿真时间为 2 s，前 1 s 填充稻种，后 1 秒进行搅种。稻种颗粒数目为 1 000 粒，创建颗粒速度为 1 500 粒/s，尺寸分布为正态分布，标准差为 0.05，半径自动缩放。

吸种口附近是否产生架空是影响吸种效果的重要因素，搅种装置的作用是搅动吸孔附近的稻种，使稻种种群内摩擦力产生变化，因此针对吸孔附近层稻种展开讨论，滚筒垂直切线作为区域边界，使用 manual 方式框选吸孔附近层区域，区域内稻种数目约 350 粒，输出每个时间步长内的接触平均法向应力。

1-2 s 时间内对吸孔附近稻种层的平均法向接触力变化曲线与时间关系如图 5 所示。

接触力为正值 $7.54 \times 10^{-6} \text{N}$ ，与垂直于滚筒法向（X）正方向相同，说明在搅种装置的作用下种群内摩擦力增大；2 mm 搅种装置对稻种种群产生的平均法向接触力为 $-1.42 \times 10^{-5} \text{N}$ ，与 X 轴正方向相反，说明在 2 mm 搅种装

置的作用下向 X 轴负方向运动,内摩擦力减小;同理 1 mm 搅种装置对稻种种群产生的平均法向接触力为负值 -1.37×10^{-5} N,与 X 轴正方向相反,内摩擦力减小。表 4 为搅种过程时间内种箱稻种种群的三轴合速度(大小),从中可以看出 1-2 mm 厚带有坡度搅种装置稻种种群在扰动作用大于 1 mm 和 2 mm 厚搅种装置,综上,3 种搅种装置对稻种种群搅种效果大小依次为 1-2 mm 厚带有坡度搅种装置>2 mm 搅种装置>1 mm 搅种装置。

前期预试验研究发现:由于厚度为 2 mm 的搅种装置大于稻种平均厚度,其在吸附水稻种子过程种易存在携种现象,然而厚度为 1 mm 搅种装置过薄搅种效果不佳,综合离散元仿真选取 1-2 mm 带有坡度搅种装置为研究对象进行排种性能试验。

表 4 稻种种群平均三轴合速度

Table 4 Average triaxial resultant velocity of rice seed

搅种装置 Churning device	三轴合速度 Triaxial resultant velocity/(m·s ⁻¹)
1 mm 厚搅种装置	2.80×10^{-05}
2 mm 厚搅种装置	5.65×10^{-04}
1-2 mm 厚带有坡度搅种装置	9.21×10^{-04}

3 排种性能台架试验

根据上述离散元仿真结果,为验证 1-2 mm 带有坡度的搅种装置的搅种效果,进行三因素五水平二次正交旋转组合试验,验证设计的合理性。

3.1 试验材料

试验时间 2018 年 1 月,试验条件:JPS-12 机器视觉排种器试验平台,试验材料为籼型杂交水稻品种晶两优 1212,除杂后清水浸种至破胸露白、晾干^[32-33]。试验在 JPS-12 机器视觉排种器试验平台上进行,采用高速摄像机对滚筒排种器的吸种情况进行连续拍摄记录并统计分析。

3.2 试验条件

如图 6 所示,试验装置为杂交稻气力滚筒集排式精量排种器,根据机具田间行走速度,取试验转速范围为 3.18~36.82 r/min;根据预试验吸附效果,设定负压范围为 0.82~4.18 kPa,清种距离为 1.16~2.82 mm。

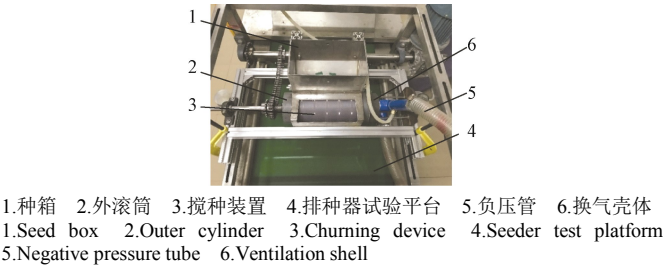


图 6 气力滚筒排种装置试验台

Fig.6 Experiment platform of cylinder-type seed metering device

3.3 试验指标与计算方法

1) 评价指标

根据杂交稻精少量播种要求,本文以每组吸孔吸附稻种 2 ± 1 粒为标准,提出气力式滚筒式排种器排种性能综合评价指标为:0 粒/穴率定为漏吸,1~3 粒/穴率为合格, ≥4 粒/穴率定义为重吸。

2) 计算方法

参照国家标准 GB-T6973-2005^[34],连续记录每组每群吸孔吸附并排出种子的数量 X_i ,以 250 次为 1 组,共计 3 组,每群吸孔每次吸附并排出种子的数量平均穴播粒数 \bar{X} 用式(1)计算。

$$\bar{X}=\frac{1}{750}\sum_{j=1}^3(\sum_{i=1}^{250}X_i),i=0,1,2,3,4,5,6,\dots,250;j=1,2,3\quad(1)$$

同时记录每组每群孔吸附 0、1、2、3、4、5 及以上粒数出现的次数 x_k ,则气力滚筒排种器吸附不同粒数稻种频率 $P(i)$ 的表达如下:

$$P(i)=\frac{\sum_{j=1}^3x_{kj}}{750}\quad(2)$$

$k=0,1,2,3,4,5,6,\dots;j=1,2,3$

3) 试验方案

以吸种负压、滚筒转速、清种距离为试验因素,进行高速摄像试验,通过正交试验分析三因素在有 1-2 mm 带坡度的搅种装置下对稻种的吸附精度的影响,采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验,以吸种负压、滚筒转速和清种距离为试验因素,进行气力滚筒式水稻排种器性能试验,因素水平编码见表 5,试验结果见表 6。

表 5 试验因素与水平编码

Table 5 Experimental variables and levels

水平 Level	因素 Factors		
	吸种负压 Negative pressure p / kPa	滚筒转速 Rotation speed of cylinder n /(r·min ⁻¹)	清种距离 Cleaning distance H / mm
1.68	4.18	36.82	2.82
1	3.50	30	2.50
0	2.50	20	2.00
-1	1.50	10	1.50
-1.68	0.82	3.18	1.16

4 结果与分析

试验结果如表 6 所示,安装有 1-2mm 的搅种装置的排种器,排种器的排量集中于(1~3)粒/穴,采用试验设计与分析软件 Design expert 软件^[35]预测最优解,预测最优组合为吸种负压为 1.60 kPa、滚筒转速为 10 r/min、清种距离为 1.94 mm,合格率为 84.67%,重吸率为 7.92%,漏吸率为 7.41%。

4.1 最佳参数组合模型预测与验证试验

根据最优解组合,以真空负压 1.60 kPa、滚筒转速 10 r/min、清种距离 2 mm 为因素组合,以晶两优 1212 为试验材料,进行验证试验,统计 750 穴稻种吸种情况,试验结果表明:在此因素组合下合格率为 86%,重吸率为 8.47%,漏吸率为 5.53%,与预测模型结果相近。

4.2 方差分析

排种器设计的核心目的是提高合格率减少漏播的产生,根据表 6 试验结果,进行了排种量的合格率和空穴率方差分析,研究在安装有 1-2 mm 厚带坡度搅种装置的排种器的情况下,排种器吸种负压、滚筒转速、清种距离(清种指与吸孔距离)三者对排种器影响的主次因素,结果如表 7 所示。

表 6 试验结果数据
Table 6 Experiment result data

编号 No.	因素 Factors			评价指标 Evaluation index		
	吸种负压 Negative pressure X_1	滚筒转速 Rotation velocity of cylinder X_2	清种距离 Cleaning distance X_3	漏吸率 Rate of seed empty/%	合格率 Qualified rate/%	重吸率 Over sucked rate/%
1	1.68	0	0	1.47	75.46	23.07
2	0	1.68	0	18.13	78.54	3.33
3	-1	1	1	43.33	56.54	0.13
4	1	1	1	6.60	81.33	12.07
5	-1	-1	1	15.53	76.00	8.47
6	0	0	0	7.73	83.40	8.87
7	1	-1	-1	7.87	84.66	7.47
8	-1	-1	-1	16.53	82.00	1.47
9	0	0	1.68	7.95	82.41	9.64
10	0	-1.68	0	2.80	83.87	13.33
11	-1	1	-1	35.27	64.07	0.67
12	0	0	0	7.87	83.20	8.93
13	0	0	0	7.27	83.80	8.93
14	0	0	0	7.93	83.61	8.46
15	0	0	0	7.69	83.64	8.67
16	0	0	0	7.56	83.97	8.47
17	0	0	0	7.27	83.93	8.80
18	0	0	-1.68	22.4	71.67	5.93
19	0	0	0	7.47	83.86	8.67
20	1	1	-1	17.33	71.34	11.33
21	0	0	0	7.87	83.40	8.73
22	-1.68	0	0	17.60	75.20	7.20
23	1	-1	1	15.73	78.00	5.87

注：0 粒·穴⁻¹为漏吸，1~3 粒·穴⁻¹为合格，≥4 粒·穴⁻¹重吸。
Note: 0 seeds per hill means seed empty, 1-3 seeds per hill is defined as qualification, ≥4 seeds per hill is defined as over sucked.

表 7 方差分析表
Table 7 Analysis of variance

指标 Index	来源 Source	离均差平方和 Sum of squares of mean deviation	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
合格率 Qualified rate	Corrected Model	1 113.422a	14	79.530	45.439	0
	X_1	279.032	3	93.011	53.140	0
	X_2	266.639	3	88.880	50.780	0
	X_3	169.130	3	56.377	32.210	0
	X_1X_2	73.205	1	73.205	41.825	0
	X_1X_3	0.005	1	0.005	.003	0
	X_2X_3	0.125	1	0.125	.071	0.959
	$X_1X_2X_3$	7.605	1	7.605	4.345	0.796
	Error	14.002	8	1.750	14.002	8
	Total	144 212.590	23		144 212.590	23
漏吸率 Rate of seed empty	Corrected Total	1 127.424	22		1 127.424	22
	Corrected Model	2 613.860a	14	186.704	242.473	0
	X_1	404.090	3	134.697	174.931	0
	X_2	547.660	3	182.553	237.082	0
	X_3	361.281	3	120.427	156.399	0
	X_1X_2	30.420	1	30.420	39.506	0
	X_1X_3	0.045	1	0.045	0.058	0.815
	X_2X_3	0.08	1	0.080	0.104	0.755
	$X_1X_2X_3$	3.38	1	3.380	4.390	0.069
	Error	6.16	8	0.770		
	Total	6 936.890	23			
	Corrected Total	2 620.020	22			

从表 7 中合格率方差分析可以看出 X_1 、 X_2 、 X_3 、交互项 X_1X_2 、对吸种合格率影响显著，其余项影响不显著，影响顺序依次为 $X_1>X_2>X_3$ ，其中吸种负压对排种合格率影响最显著。

从表 7 中漏吸率方差分析所示，对漏吸率有显著性影响的有 X_1 、 X_2 、 X_3 、交互项 X_1X_2 ，其余项影响不显著，影响顺序依次为 $X_2>X_1>X_3$ ，其中排种转速对漏吸率影响最显著。

5 结 论

针对水稻稻种流动性差、易架空等问题，本文设计了一种带有楔形搅种装置的杂交稻气力滚筒集排式精量排种器，给出主要设计参数及工作原理，对稻种种群建立了接触模型、进行了接触力学分析。

1) 通过离散元仿真软件 EDEM 对不同厚度参数的楔形搅种装置对稻种的搅动作用进行了仿真模拟,通过对吸孔附近层稻种种群所受到的平均法向接触力和平均三轴合速度进行比较，厚度 1 mm、厚度 2 mm、厚度 1-2 mm（带有坡度）的楔形搅种装置，对吸孔附近稻种种群搅动的法向接触力分别为 -1.37×10^{-5} 、 -1.42×10^{-5} 、 7.54×10^{-6} N，只有 1-2 mm 带有坡度的楔形搅种装置对稻种种群运动方向为正向（趋向吸孔），其效果优于其他 2 种搅种装置。

2) 1-2 mm 厚带坡度搅种装置的 design expert 优选试验结果：在吸种负压 1.60 kPa、滚筒转速为 10 r/min、清种距离为 1.94 mm 下，合格率为 84.67%，重吸率为 7.92%，漏吸率为 7.41%。在此参数下进行试验，合格率为 86%，重吸率为 8.47%，漏吸率为 5.53%，楔形搅种装置对稻种的分离、搅动、助吸作用，为进一步优化滚筒集排式水稻精量穴直播机的排种性能提供依据。

[参 考 文 献]

[1] 罗锡文，蒋恩臣，王在满，等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报，2008，24(12): 52—56.
Luo Xiwen, Jiang Enchen, Wang Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 52—56. (in Chinese with English abstract)

[2] 曾山，汤海涛，罗锡文，等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报，2012，28(20): 12—19.
Zeng Shan, Tang Haitao, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 12—19. (in Chinese with English abstract)

- [3] Singh R S, Gite L P. Technological change in paddy production: A comparative analysis of traditional and direct seeding methods of cultivation[J]. AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2012, 43(3): 41—46.
- [4] Dixit A, Manes G S, Singh A, et al. Evaluation of direct-seeded rice drill against Japanese manual transplanter for higher productivity in rice[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 80(10): 884—887.
- [5] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Annual data, Rice sown area (thousand hectares) [Z/OL]. [2018-11-10]http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01.
- [6] Hu Z X, Tian Y, Xu Q S. Review of extension and analysis on current status of hybrid rice in China[J]. Hybrid Rice 2016, 31(2): 1—8.
- [7] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 1—9.
Zhang Guozhong, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(17): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1—8.
Zhang Guozhong, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张国忠, 罗锡文, 臧英, 等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 13—20.
Zhang Guozhong, Luo Xiwen, Zang Ying, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 13—20. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 42—48. (in Chinese with English abstract)
- [11] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 26—34.
Lei Xiaolong, Liao Yitao, Li Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 26—34. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65—72.
Liu Yueqin, Zhao Manquan, Liu Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65—72. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵湛, 李耀明, 陈进, 等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 112—116.
Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Dynamic analysis on seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 112—116. (in Chinese with English abstract)
- [14] 左彦军, 马旭, 齐龙, 等. 窝眼窄缝式气吸滚筒排种装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 141—144.
Zuo Yanjun, Ma Xu, Qi Long, et al. Seeding experiments of suction cylinder-seeder with socket-slot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [15] 左彦军, 马旭, 玉大略, 等. 水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 58—62.
Zuo Yanjun, Ma Xu, Yu Dalu, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket slot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 58—62. (in Chinese with English abstract)

- [16] 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20—28.
- Gao Xiaojun, Zhou Jinhua, Lai Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for panax notoginseng[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 20—28. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡建平, 郑赛男, 刘文东. 磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 60—63.
- Hu Jianping, Zheng Sainan, Liu Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder-seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [18] Karayela D, Wiesehoff M, Özmerzia A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-velocity camera system[J]. Computers and Electronics In Agriculture, 2006, 50(2): 89—96.
- [19] Singh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cotton seeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429—438.
- [20] 罗锡文. 一种同步开沟起垄的滚筒气力水稻穴直播机: 107852904A[P]. 2018-03-30.
- [21] 罗锡文. 一种气力双层滚筒式排种装置: 105993319A [P]. 2016-10-12.
- [22] 罗锡文. 一种气力滚筒式排种器: 105659998B [P]. 2016-06-15.
- [23] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [24] 陈卓如, 王洪杰, 刘全忠. 工程流体力学(第 3 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [25] 张德良. 计算流体力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [26] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294—300.
- Liu Cailing, Wang Yali, Song Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 294—300. (in Chinese with English abstract)
- [27] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 99—107.
- Gao Xiaojun, Xu Yang, Yang li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 99—107. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(10): 17—25. (in Chinese with English abstract)
- [29] 周韩. 超级稻精密播种机离散元分析与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011. (2011-08-24) http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=degree&id=Y1894528. (in Chinese)
- [30] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43—51.
- Han Dandan, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43—51. (in Chinese with English abstract)
- [31] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [32] 陈坤杰, 徐伟梁. 含水率对稻谷机械特性的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 171—172, 175.
- [33] 於海明. 特种稻谷(粳稻)物理特性的实验测定[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- Yu Haiming. The Experimental Measurement of Physical Characteristics for Special Grain (Xiandao) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [34] 国家标准《单粒(精密)播种机试验方法》GB-T 6973-2005[S]. <https://wenku.baidu.com/view/02ea2428001ca300a6c30c22590102020640f249.html>
- [35] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

Design and experiment of wedge churning device for pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice

Wang Baolong^{1,2}, Wang Zaiman^{1*}, Luo Xiwen¹, Zhang Minghua¹, Fang Longyu¹, Liu Shuncaai¹, Xu Peng¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Horticulture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: To meet the requirement of the precise direct-seeding for hybrid rice, the study aimed to design the wedge type churning device, which on the basis of pneumatic cylinder-type seed metering device. As the shape of rice seed is slender, long and sharp, with edges, villus, and poor fluidity, the wedge-shaped churning device was designed to improve suction accuracy. The previous experimental results show that the installation of an electromagnetic vibration device at the bottom of the seed box can help the cylinder metering device to suck seeds, but it is not suitable for field use. A directional churning device and a linear churning device for a vertical disc rice pneumatic metering device was designed, the experimental results show that the directional churning device can improve the seed suction precision of the metering device according the previous research of the author's team. According to the triaxial size of typical hybrid rice varieties, three kinds of churning devices with thickness of 1 mm, 2 mm and arc-shaped churning device with slope thickness from 1mm to 2 mm were designed, which was made of ABS plastic and fixed on the outer surface of the cylinder, with two suction holes on both sides of the churning device. The straight-line distance between the two ends of churning device is 10mm, and five groups in the cylinder axial direction, eight groups in the cylinder circumference. In order to test the churning performance, the virtual simulation was investigated by means of discrete element method, the model of the seed metering device was drawing out by 3D cad design software. According to the average triaxial size, the rice seed model made by multi-spherical particles with radius from 0.2 mm to 1 mm were packed and filled in EDEM software. The mass, volume and moment of inertia were calculated automatically by EDEM model. The average normal contact force and triaxial resultant velocity towards to the cylinder of the rice seed near suction holes were compared. The average normal contact forces produced by seed agitator on rice population were respectively -1.37×10^{-5} , -1.42×10^{-5} and 7.54×10^{-6} N. The results showed that the churning effect of arc-shaped churning device with slope thickness from 1mm to 2 mm was better than the others. Taking the Jingliangyou 1212 rice seeds as the experiment material, using three factors and five level orthogonal rotatory experiment for arc-shaped churning device, the influence of negative pressure of the suction chamber, rotation velocity of cylinder, and cleaning distance (distance between the cleaning device and the hole edge) on the suction performance were studied. The results showed that the prediction optimal parameters of the regression model were as follows: the negative pressure was 1.60 kPa, rotation velocity of cylinder was $10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the cleaning distance was 1.94 mm, with the qualified rate ((2 ± 1) seeds per hill) of 84.67%, the over sucked rate (≥ 4 seeds per hill) of 7.92% and rate of seed empty of 7.41%. The test results showed that the qualified rate was 86%, the over sucked rate was 8.47%, and the rate of seed empty was 5.53% under condition with optimal parameters. The results showed that the arc-shaped churning device with slope thickness from 1 mm to 2 mm for cylinder-type seed metering device had a significant effect on the separation, agitation and suction for the hybrid rice, which could improve the seed suction performance, and provide a reference for the further optimization.

Keywords: crops; agricultural machinery; experiments; hybrid rice; cylinder-type pneumatic seeder; churning; discrete element method