

正态分布规律变量调节式多功能条播装置设计与试验

兰玉彬^{1,2} 韩金钢^{1,2} 张同升^{1,2} 刘俐恋^{1,2} 杨雪¹ 宋灿灿^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学生态无人农场研究院, 淄博 255049)

摘要: 针对条播装置成条的需求,设计了一种基于正态分布规律变量调节的多功能条播装置,该装置能够实现均匀和不均匀等多种成条效果。该装置无需更换复杂配件,只需要改变调节单元结构布局,操作简单灵活,能够一机多用。从条播装置整体结构设计、原理阐述和仿真分析与台架测试方面开展研究,通过颗粒进料口喂入角仿真试验选定了进料口角度,并选取复合肥颗粒与水稻种子颗粒,经离散元仿真软件(Enhances discrete element method, EDEM)仿真和台架试验测试了变量调节性能,对条播装置在不同变量调节下的成条效果进行动态测试。进料口喂入角仿真试验结果表明,在70°喂入角下,网格间变异系数差异达18%,颗粒流变化相对较小,颗粒流相对均匀。条播装置变量调节性能试验结果表明,各排料管之间的复合肥颗粒流量差异最大为组合8(变异系数为92%),最大差值为0.214 kg,变量范围最大(6%~41%);各排料管之间的复合肥颗粒流量差异最小为组合11(44%),最小差值为0.100 kg,变量范围最小(11%~27%);各排料管之间的水稻种子颗粒流量差异最大为组合8(90%),变量范围最大(5%~40%);各排料管之间的水稻种子颗粒流量差异最小为组合11(40%),变量范围最小(11%~27%);12个组合的变异系数与变量范围差异显著,复合肥颗粒的变异系数整体为44%~92%,变量范围整体为6%~42%;水稻种子的变异系数整体为40%~90%,变量范围整体为5%~40%,装置可实现多样化变量调节。变量成条效果动态测试试验结果表明,所有组合下的复合肥颗粒与水稻种子颗粒的成条效果都明显,条带波动小,条带宽度和间距稳定。

关键词: 播种机; 条播装置; 变量调节; 正态分布; EDEM

中图分类号: S25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)09-0075-14

OSID:



Design and Testing of Multifunctional Strip-tillage Device Based on Normal Distribution Regular Variable Conditioning

LAN Yubin^{1,2} HAN Jin'gang^{1,2} ZHANG Tongsheng^{1,2} LIU Lilian^{1,2} YANG Xue¹ SONG Cancan^{1,2}

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Research Institute of Ecological Unmanned Farm, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming to address the problem of strip-tillers forming strips, a novel and adaptable strip seeding apparatus was introduced. This equipment represented a significant technological leap, which was capable of executing a wide array of strip patterns, ranging from uniform to non-uniform distributions. Its comprehensive scope encompassed multifaceted dimensions, notably focusing on the structural blueprint of the strip seeding apparatus. It included a detailed exposition of the intricate principles governing variable adjustments, an extensive analysis of the simulated effects under diverse configurations, and robust empirical validation through rigorous bench-scale testing. The EDEM simulation and benchtop experiments were utilized to test the variable adjustment performance of compound fertilizer and rice seed particles in the strip seeding device and the strip-forming effect under different variable adjustments was dynamically evaluated. Simulated results from the inlet feeding angle experiments showed that when conducted at a 70° angle, substantiating a gradual escalation in the coefficient of variation (CV), transitioning from the upper grid group (9%) to the lower grid group (27%), manifesting an 18% CV variance. This nuanced alteration barely disrupted particle flow, aligning meticulously with the intended

收稿日期: 2023-12-15 修回日期: 2024-01-31

基金项目: 淄博市重点研发计划项目(2019ZBXC200)和山东省自然科学基金项目(ZR2021QC154、ZR2023QC047)

作者简介: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空应用技术研究,E-mail: ylan@sdut.edu.cn

通信作者: 宋灿灿(1991—),女,讲师,博士,主要从事农用无人机精准播种与变量施肥技术研究,E-mail: songcc@sdut.edu.cn

uniformity envisaged in the design framework. The empirical findings regarding variable adjustment performance revealed stark disparities in granular flow among discharge tubes. The combination with the highest difference in compound fertilizer particle flow was Combination 8 (CV was 92%), with a maximum difference of 0.214 kg and the widest variable range (6% ~ 41%). The combination with the smallest difference was Combination 11 (CV was 44%), with a minimum difference of 0.100 kg and the narrowest variable range (11% ~ 27%). As for rice seed particles, the maximum difference also occurred in Combination 8 (CV was 90%) with a variable range of (5% ~ 40%), while the minimum difference was in Combination 11 (CV was 40%) with a variable range of (11% ~ 27%). Overall, there was a significant difference between the coefficient of variation and the variable range among the 12 combinations. The coefficient of variation for compound fertilizer particles ranged from 44% to 92%, with a variable range of 6% to 42%. The coefficient of variation for rice seeds ranged from 40% to 90%, with a variable range of 5% to 40%. Moreover, distinct configurations noticeably influenced particle quality alterations, facilitating differentiated adjustments in strip width and spacing between rows. This nuanced variation within similar variable adjustments further validated the instrument's robustness in achieving finer gradations in strip width and spacing. The culmination of these in-depth investigations served as an invaluable guide for refining and optimizing this variable strip seeding apparatus. The research results can offer comprehensive technical solutions and a reservoir of foundational knowledge.

Key words: sower; strip device; variables regulation; normal distribution; EDEM

0 引言

精细化播种和施肥技术对于提高作物产量和资源利用效率至关重要^[1],可以为通过有限的资源来满足不断增长的粮食需求提供解决方法。在这一领域中,条播作为一项关键技术,其应用范围不断扩展,满足了多样化物料和农艺要求。通过精细化的条播技术,可以更准确地控制作物种植密度和施肥量,从而优化土壤营养结构,提高耕地利用效率^[2-3]。

当前农业生产中,小麦、水稻等主要农作物的种植多采用条播,该播种方式能够实现更高的生产效率和资源利用效益^[4]。条播装置不仅在大田粮食作物上有广泛应用,在其他作物(如蔬菜和油料作物)的生产中同样具有适用性。条播装置的精细化设计使其能够根据不同作物的生长需求灵活调整条播作业,改善精细化播种效果,最大程度地促进作物更好生长。除了满足不同作物的播种需求外,肥料的条播精细化还直接关系到土壤的养分状况和结构。精细化施肥技术可以优化土壤的养分分布,改善土壤结构,提高土壤肥力,有助于提升作物品质,促进农田可持续利用^[5-7]。采用条播装置的农业生产方式相比传统的撒播播种方式^[8],能够更有效地利用土地资源,减少浪费,提高土地利用效率。

现有的条播装置,采用精准种子定位、变量播种和机器人辅助播种等技术,通过传统装置机械、视觉感知技术和自动化系统,实现播种过程的实时监测和变量调节,将种子准确排放,从而有效提高播种成

条宽度和播种变量调节性能^[9]。针对温室播种,研究聚焦于窝眼式排种装置与气吸式排种装置。窝眼式排种装置,通过调节窝眼轮转动速度,控制种子下落量的变化,通过种子的自由下落完成条播^[10]。气吸式排种装置,通过气压变化实现吸种、落种,向对应的种穴置入单粒种子^[11],实现温室播种自动化和智能控制。这些技术都能够实现特定场景下的播种,可以通过改变装置参数实现变量播种,但装置局限于特定情况下使用,功能比较单一。

除此以外,当前条播装置有些方面仍存在局限性。首先,针对多样的作物和地域特征,现有装置缺乏足够的灵活性,不能实现精准的调整以满足不同需求。其次,一些装置在适应不同的土壤条件和气候变化方面仍有改进的空间^[12-13]。此外,部分装置在大面积播种时的效率和覆盖率仍待提高^[14]。这些局限性使得现有条播装置难以完全满足农业生产对于精细化条播的要求,需要进一步的技术创新和改进以应对不断变化的农业需求。

为解决上述问题,本文提出一种通过改变模组中调节棒的位置,调节颗粒在锥形内腔的分散程度,从而改变颗粒进入不同出料管的概率,获得不同沉积量的条播装置,以实现不同性状颗粒均匀和不均匀等多种成条效果,并且具备一机多用的灵活性。无需更换复杂配件,通过改变条播机构中调节单元的参数即可实现变量调节,适应不同播种需求。

1 条播装置整体结构与工作原理

1.1 整体结构设计

基于正态分布规律变量调节的多功能条播装置

整体结构如图 1 所示。该条播装置主要包括变量调节机构和条播机构。变量调节机构主要包括壳体及内部的正态调节单元，壳体顶部中心的进料口与料箱相连，进料口设计为倒锥形，便于颗粒下落。壳体内部为锥形内腔，内腔设计为上宽下窄，顶部呈圆形，与进料口底部相连，内腔底部为长条矩形，沿长度方向设置有 6 个矩形小孔。正态调节单元设置在锥形内腔，主要由长短不一的 6 个模组组成。各模组沿内腔中心轴线自上而下呈栅格形居中排列。条

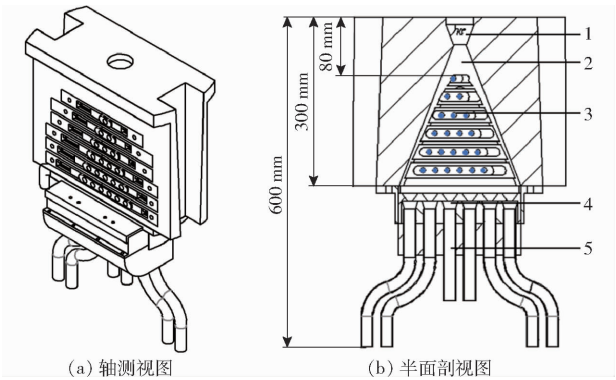


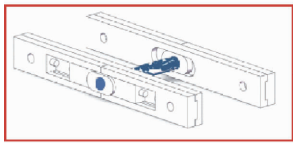
图 1 条播装置结构示意图

Fig. 1 Schematics of installation structure of normal spreading device

1. 进料口 2. 正态调节单元 3. 调节棒 4. 料管进料口 5. 料管

播机构主要包括引流机构和排料管，引流机构主要由 6 个漏斗形锥孔和固定支架组成，固定在变量调节机构壳体底部。漏斗形锥孔上端与锥形内腔底部的矩形小孔对应，下端与排料管连接。排料管沿变量调节机构壳体长度方向排列，间距为 1.5 cm (间距可调)，形成初步成条状态，两侧的排料管向外扩展为弯管 (弯管间距可调)，进一步增大条播间距。

图 2 为正态调节单元的 6 个模组排列情况。模组包括调节棒、滑块和固定支架。固定支架呈长条状，安装在锥形内腔的前后内壁上。滑块外侧嵌在固定支架中，且中间有圆形凹槽，便于插入调节棒。每个调节棒两端都固定在滑块上，所有调节棒平行排布，能够将锥形内腔分割为栅格状。由于每个模组中的调节棒个数不同 (为了实现良好的颗粒分流效果并能承受肥料下落产生的应力，同时考虑到复合肥颗粒直径为 1 ~ 3 mm，因此将调节棒直径设置为大约 2 倍颗粒直径，即 7.5 mm；为确保由调节棒分流下落的颗粒流畅，调节棒之间间隔设为大约 2 倍调节棒直径，即 20 mm)，滑块长度也不同，各模组总长度为 40 ~ 240 mm (第 1 个模组长为 40 mm，其余按 40 mm 的等差递增)，宽度均为 10 mm，上下间距为 10 mm。调节时，各个模组中的滑块固定的调



模组

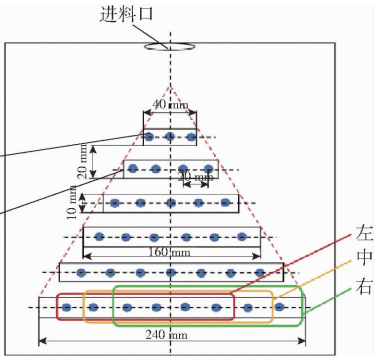
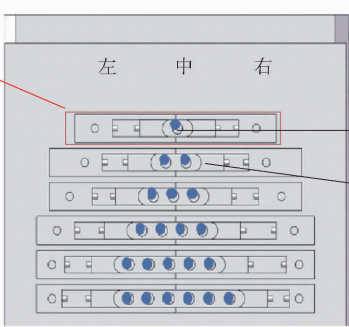


图 2 正态调节单元

Fig. 2 Normal regulation unit

节棒作为一个整体左右移动。以第 6 个模组 (包含 6 个调节棒) 为例，该模组在水平方向上共有左、中、右 3 个节点位置可以移动，此时，6 个调节棒分别对应图中左边 6 个原点、中间 6 个原点和右边 6 个原点。作业时，物料颗粒从进料口进入锥形内腔，经过各个模组组成的栅格后被分成 6 条细小颗粒流，分别进入 6 个出料管内。

1.2 变量调节原理

变量调节机构的变量原理来自正态分布曲线的概率变化。如图 3 所示，标准正态分布曲线中，横坐标表示随机变量的取值范围 (均值 $\pm$ 方差)，纵坐标表示概率。因为这条曲线左右对称，所以中间最高

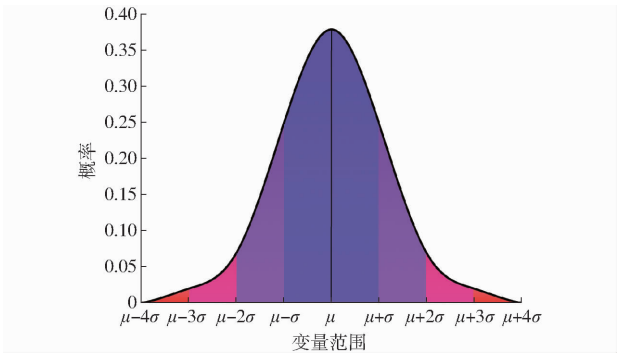


图 3 正态分布模型

Fig. 3 Normal distribution model

点表示平均值出现的概率最大，数据最多，而两边陡

峭下降。这就意味着越靠近平均值,数据越多,越远离平均值,数据越少。选择不同的取值范围,可以得到不同的平均值概率及相应的数据量。类似地,本文设计的变量调节机构中,可以根据各个模組的移动位置进行排列组合,形成多种栅格,不同的排列组合对应该曲线的横坐标取值,细分的6条颗粒流量对应曲线中不同概率下的数据量。即通过改变模組中调节棒的位置,调节颗粒在锥形内腔的分散程度,从而改变颗粒进入不同出料管的概率,获得不同的沉积量。本文设计的变量调节机构共有6个模組,每个模組都有左、中、右3个移动位置,共产生729种排列组合,即可以实现各个出料管之间的多样化差异,满足不同的条播需求。

各个模組具体的调节过程如图4所示。分别用 a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1,2,3,4,5,6$)来表示6个模組可移动的左、中、右3个位置。以前2个模組为例,当模組1位于 a_1 、 b_1 、 c_1 处,可分别与模組2的 a_2 、 b_2 、 c_2 组合,构成 a_1a_2 、 a_1b_2 、 a_1c_2 、 b_1a_2 、 b_1b_2 、 b_1c_2 、 c_1a_2 、 c_1b_2 、 c_1c_2 这9种组合。当6个模組都处在左边位置时,构成

$a_1a_2a_3a_4a_5a_6$ 组合,当6个模組都处在中间位置时构成 $b_1b_2b_3b_4b_5b_6$ 组合,当6个模組都处在右边位置时,构成 $c_1c_2c_3c_4c_5c_6$ 组合。其余组合情况原理相同。而 a_i 表示第1个模組处于左侧位置, b_i 表示第1个模組处于中间位置, c_i 表示第1个模組处于右侧位置;依次类推, a_6 表示第6个模組处于左侧位置, b_6 表示第6个模組处于中间位置, c_6 表示第6个模組处于右侧位置。不同组合方式体现在调节棒上的情况如图5所示,以其中典型的4个组合为例。组合1为 $a_1a_2a_3b_4b_5b_6$,即前3个模組中所有的调节棒作为一个整体位于长条方框最左边,后3个模組中的所有调节棒作为一个整体位于长条方框的中间;组合2为 $a_1a_2c_3c_4b_5b_6$,即前2个模組中所有调节棒作为一个整体分布于长条方框最左边,中间2个模組中所有调节棒位于中间,后2个模組中所有调节棒位于最右边;组合6为 $b_1b_2b_3b_4b_5b_6$,即所有调节棒作为一个整体位于长条方框的中间;组合10为 $c_1c_2c_3c_4c_5c_6$,即所有调节棒作为一个整体位于长条方框最右边。

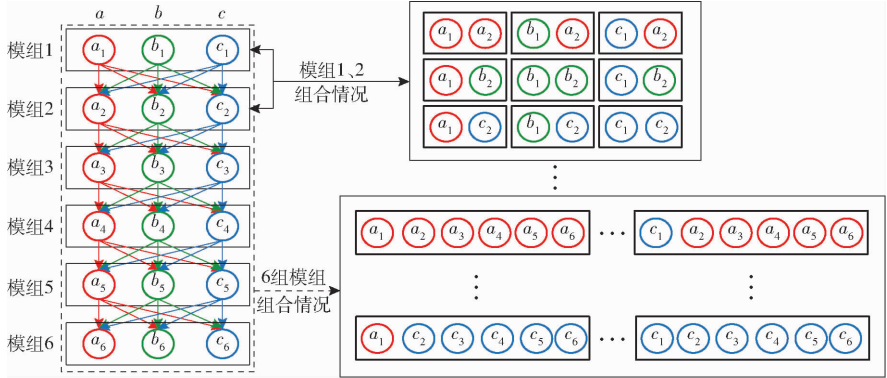


图4 正态调节单元排列组合图

Fig. 4 Arrangement and combination of regulation units of normal regulation unit



图5 各模組的不同组合情况示意图

Fig. 5 Diagrams of different combinations of adjustment units

2 仿真分析与台架测试试验

本文设计的条播装置中,物料颗粒进入锥形内腔的状态以及不同模組排列组合是影响颗粒分散程度和流动状态的关键因素。利用离散元仿真软件 EDEM 能够模拟颗粒进入进料口的状态,对影响颗粒下落状态的进料口喂入角进行参数优选。此外,

为了研究不同模組排列组合对颗粒差异化条播效果的影响,本文通过 EDEM 仿真模拟和台架试验测试该条播装置的变量调节性能,并通过动态测试验证整机的成条效果。本文进料口喂入角仿真试验以复合肥颗粒为研究对象,变量调节性能测试和成条效果动态测试以复合肥颗粒与水稻种子颗粒为研究对象。

2.1 进料口喂入角仿真试验

固体颗粒的流动特性会产生较大差异,确保进料口处的颗粒流集中在正态调节单元中心位置是变量调节的前提。合适的喂入角对于引导颗粒流从正态调节单元中心通过尤为重要。通过对颗粒流经过不同进料口喂入角下的状态进行 EDEM 仿真,可以更好地分析不同喂入角对颗粒分布的影响,确定最优喂入角。

2.1.1 进料口仿真模型

图 6 为进料口的简易剖视图和仿真三维图。其中,进料口的直径为 35 mm,喂入角指进料口内壁与水平方向的夹角。当进料口内壁竖直向下时喂入角为 90°,此时颗粒流量最大;当进料口内壁水平时喂入角为 0°,此时颗粒流量为 0。

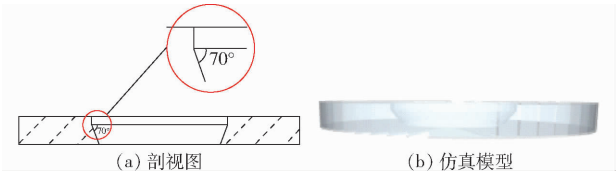


图 6 进料口剖视图与仿真三维图

Fig. 6 Cutaway views of inlet with simulated 3D view

2.1.2 仿真参数确定

复合肥颗粒用球型模型,颗粒直径为 2 mm。条播装置结构材料为 ABS 透明板。不考虑颗粒表面黏附力,选择 Hertz - Mindlin(no slip)模型作为基本模型。考虑摩擦,选择 Standard Rolling Friction 模型作为摩擦模型^[15-16]。复合肥颗粒和 ABS 材料的仿真参数如表 1 所示^[17-18]。仿真时间设定为 2 s,颗粒工厂颗粒生成速度设为 5 kg/s,喂入角设置 6 个水平:40°、50°、60°、70°、80°、90°。

表 1 复合肥颗粒仿真参数

Tab.1 Compound fertilizer particle simulation parameters

项目	参数	数值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	3.48×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 330
ABS	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.9×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 060
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.01
颗粒-ABS	碰撞恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.33
	滚动摩擦因数	0.01

2.1.3 仿真试验后处理

如图 7 所示,为了更好地分析颗粒流由喂入角

流出到第 1 组调节棒上方时的分布状态,在 EDEM 后处理模块中分别在进料口正下方 25 mm 和 70 mm 处(为确保颗粒下落时有足够的空间,避免堵塞,并更好地引导颗粒流经正态调节单元中心,将进料口到第 1 组调节棒的距离设为 80 mm)设置上、下两组网格状虚拟传感器(简称上、下网格组),统计单位时间内流经进料口的颗粒质量流量。网格组为长方体(长×宽×高为 70 mm×90 mm×10 mm),被均匀划分为 9 份(编号为 1~9),其中,第 5 组处于进料口正中心下方位置。通过分析不同喂入角下的颗粒流变化速度和上、下网格组之间的变异系数,分析喂入角对颗粒流向中心集中的影响,优选出合适的参数。

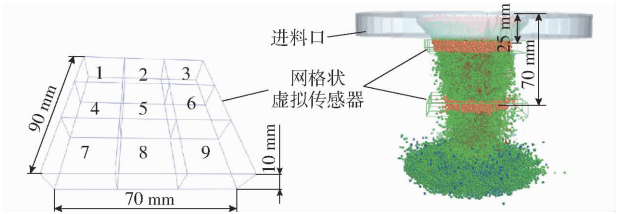


图 7 经过进料口的颗粒流量统计示意图

Fig. 7 Schematic of particle flow statistics through inlet

2.2 变量调节性能测试

选取正态调节单元的 12 组模组排列组合(具体组合方式如表 2 所示),与复合肥颗粒和水稻种子颗粒进行仿真模拟与台架测试,通过统计单位时间内 6 个排料管中的肥料质量,分析不同组合下各排料管内的颗粒质量差异以及变量调节效果。为了避免其他因素的影响,本次测试在最优的进料口喂入角下进行,确保颗粒流进入正态调节单元时的状态相同。

变量范围能够很好地反映该条播装置的变量调节情况。变量范围是该组合下颗粒质量最小值 Q_1 在总颗粒质量 Q 中的占比 V_1 到最大值 Q_2 的占比 V_2 。

2.2.1 仿真模拟参数设置

如图 8 所示,采用复合肥颗粒(粒径为 2 mm)与水稻种子颗粒(粒径长×宽×厚为 6 mm×2.5 mm×2 mm)分别进行仿真,复合肥颗粒的其余仿真参数同表 1,水稻种子仿真参数如表 3 所示。条播装置仿真模型如图 9 所示,颗粒喂入量设定为 4 443 g/s,仿真模拟时间设置为 2 s,为了更加准确地统计各排料管内的颗粒质量,在仿真软件后处理中,将网格状虚拟传感器(长×宽×高为 180 mm×60 mm×10 mm)设置在模组 6 下方 2 mm、排料管上方 10 mm 处。虚拟传感器被划分为 6 个子网格(编号 1~6),分别对应 6 个排料管。

表 2 正态调节单元中的模组排列组合
Tab.2 Combinations of adjustment units

组合情况	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6	组合 7	组合 8	组合 9	组合 10	组合 11	组合 12
模组 序号	1	●○○	●○○	●○○	●○○	○●○	○●○	○●○	○●○	○○●	○○●	○○●
	2	●○○	●○○	●○○	○●○	○●○	○●○	○●○	○●○	○○●	○○●	○○●
	3	●○○	○○●	●○○	○○●	○○●	○○●	○○●	○○●	○○●	○○●	○○●
	4	●○○	○○●	●○○	○●○	○○●	○●○	○●○	●○○	○○●	●○○	○●○
	5	○●○	○●○	●○○	●○○	○●○	○●○	○●○	○○●	○○●	○○●	○○●
	6	○●○	○●○	●○○	○●○	○●○	○●○	○●○	●○○	○○●	●○○	○●○
组合	$a_1 a_2 a_3$	$a_1 a_2 c_3$	$a_1 a_2 a_3$	$a_1 b_2 c_3$	$b_1 b_2 c_3$	$b_1 b_2 b_3$	$b_1 c_2 c_3$	$b_1 b_2 c_3$	$c_1 b_2 b_3$	$c_1 c_2 c_3$	$c_1 a_2 c_3$	$c_1 b_2 b_3$
名称	$a_4 b_5 b_6$	$c_4 b_5 b_6$	$a_4 a_5 a_6$	$b_4 a_5 b_6$	$c_4 b_5 b_6$	$b_4 b_5 b_6$	$b_4 b_5 b_6$	$b_4 b_5 b_6$	$a_4 c_5 a_6$	$c_4 c_5 c_6$	$a_4 c_5 a_6$	$b_4 b_5 b_6$

注：●表示模组所处调节位置，○表示模组可调节位置。

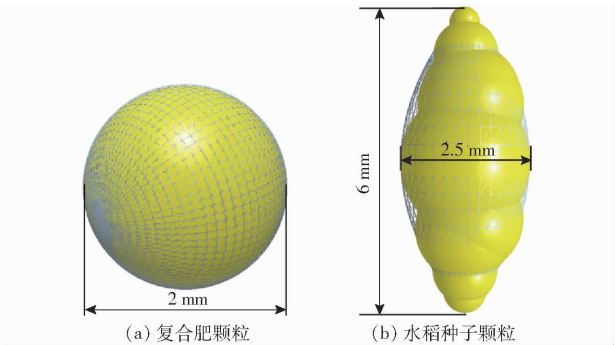


图 8 仿真颗粒模型

Fig.8 Simulated particle models

表 3 水稻种子仿真参数

Tab.3 Rice seed simulation parameters

项目	参数	数值
水稻种子	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	3.78×10^8
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 350
ABS	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.9×10^8
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 060
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	滚动摩擦因数	0.1
颗粒-ABS	碰撞恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.33
	滚动摩擦因数	0.01

2.2.2 台架测试参数设置

图 10 为条播装置性能测试台架。为了确保颗粒以聚拢的状态稳定且准确地进入变量调节机构，在料箱的底部安装流量控制开关，并通过一段螺纹管(直径 35 mm)连接到变量调节机构的进料口。条播装置下端连接自制的肥料收集装置(材料为纸板和 PVC 板)，收集装置内设置 6 个间隔，分别对应 6 个排料管。所有测试中喂入量均为 0.067 kg/s，测试时间均为 10 s，各测试重复 3 次。采用精密电子秤(型号:YHC - A6)称量复合肥颗粒(颗粒平均粒度 2 mm,干燥程度在 98% 以上)和水稻种子(干燥

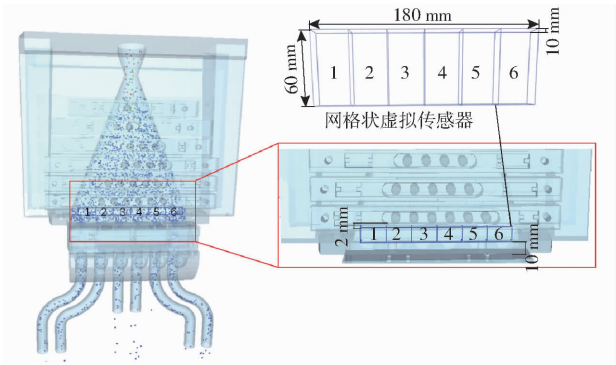


图 9 仿真模型和网格状虚拟传感器示意图

Fig.9 Schematic of simulation model and grid-like

virtual sensor

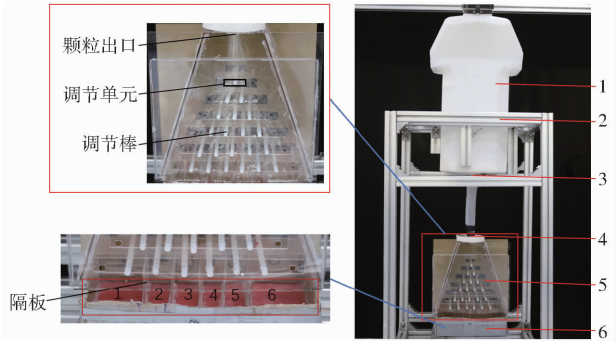


图 10 性能测试台架

Fig.10 Test bench equipment

1.料箱 2.支撑架 3.流量控制开关 4.进料口 5.正态调节单元 6.肥料收集装置

程度在 95% 以上)。

2.3 条播装置不同变量调节下的成条效果动态测试

为了更好地验证该条播装置在不同变量调节下的成条效果,设计了动态测试试验。如图 11 所示(图中 01 ~ 06 为料管编号),在条播装置排料管下方 5 cm 处设置颗粒收集布,并沿垂直于各排料管的方向设置收集布向前移动速度为 2 m/s(如图中黄色箭头所示),用以模拟条播装置在实际作业中的行走,从而获得一定宽度的条带状颗粒沉积分布。各组测试时间为 3 s,颗粒喂入量为 0.067 kg/s,每组重复 3 次。各组试验后,测量各排料管中的颗粒流

在地面的成条宽度,并对不同变量调节下的颗粒(复合肥颗粒与水稻种子颗粒)成条效果进行分析。

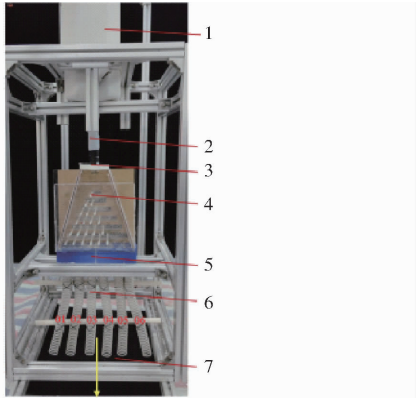


图 11 条播装置成条性能动态测试示意图
Fig. 11 Schematic of dynamic test of strip forming performance of strip planting device

1. 料箱 2. 出料管 3. 进料口 4. 调节棒 5. 连接件 6. 料管
7. 黑色采集布

3 试验结果与分析

3.1 进料口喂入角仿真结果

图 12 为不同喂入角下颗粒流动仿真结果。从图中可以看出,随喂入角变大,肥料颗粒由上端中间汇集逐渐向外部扩散。当喂入角为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,肥料颗粒由上网格组流到下网格组过程中趋向于中间位置,收缩现象明显。当喂入角为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,肥料颗粒流没有明显收缩趋势,分布状态均匀。此外,喂入角对颗粒流的速度分布也有一定的影响,当喂入角为 40° 时,肥料颗粒流在进料口中间落下的速度为 9.68 m/s ,肥料往周围扩散的速度逐渐降低至 3.62 m/s 。在同一喂入角下,从进料口中间经过的颗粒速度大于周边颗粒的(例如喂入角为 40° 时,中心位置的颗粒速度为 9.68 m/s ,周边颗粒的速度为 4.83 m/s),但随着喂入角增大,这种差异会逐渐缩

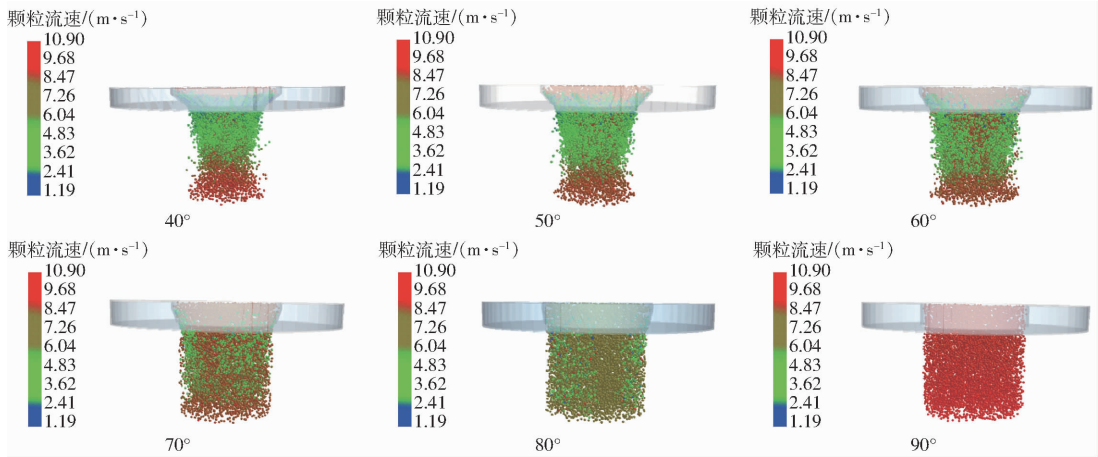


图 12 不同喂入角下颗粒流速仿真结果

Fig. 12 Simulation results of particle flow rate at different feeding angles

小(当喂入角为 80° 与 90° 时,中心位置的颗粒速度与周边颗粒速度保持在 10.90 m/s)。

图 13 为不同喂入角下各网格组内的颗粒质量统计结果。整体上颗粒流从上网格组到下网格组的过程中,随着喂入角的增大,颗粒质量分布逐渐离散,喂入角为 80° 和 90° 时,颗粒流变化已不明显,上、下网格组内的质量分布相对均匀。此外,对于同一组别,上、下网格组内的颗粒质量分布也有较大差异,且这种差异随着喂入角的增大而减小。组别 1、3、7、9 的颗粒流量由上网格到下网格显著减小,组别 2、4、5、6、8 的颗粒流量由上网格到下网格显著增加。其中组别 5 差异最大,最大值约为 0.8 kg (喂入角为 40°),最小值约为 0 kg (喂入角为 90°)。在同一个网格组内,不同组别下的颗粒质量分布也与喂入角有一定关系。从图 13a 可以看出,当喂入角为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,组别 1 ~ 9 内的肥料颗粒分布离散,图形波动较大,肥料颗粒质量在 $0.15 \sim 0.30\text{ kg}$ 之间,

颗粒在组别 2、4、6、8 内分布较为集中,最高值在 0.3 kg ,在组别 1、3、5、7、9 内分布相对较少,最低值在 0.1 kg ;当喂入角为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,组别 1 到组别 9 内的肥料颗粒分布均匀,肥料颗粒质量在 $0.1 \sim 0.2\text{ kg}$ 之间,图形整体变化波动较小。从图 13b 可以看出,当喂入角为 80° 和 90° 时,组别 1 到组别 9 内的肥料颗粒分布均匀,料颗粒质量平均在 $0.1 \sim 0.2\text{ kg}$ 之间,图形整体变化波动较小,当喂入角为 60° 和 70° 时,颗粒在组别 2、4、6、8 内分布较为集中,最高值在 $0.3 \sim 0.4\text{ kg}$ 之间,组别 1、3、5、7、9 内分布相对较少,最小值为 0.1 kg ,但当喂入角为 70° 时,组别 5 内颗粒分布状态明显低于 60° 的,差距为 0.05 kg ,当喂入角为 40° 和 50° 时,颗粒在组别 2、5、8 内分布较为集中,组别 1、3、4、6、7、9 内分布相对较少,最低值在 0.1 kg 以下,尤其在组别 5 内,颗粒分布达到峰值 0.8 kg 。

图 14 为不同喂入角下两组网格组内的颗粒质

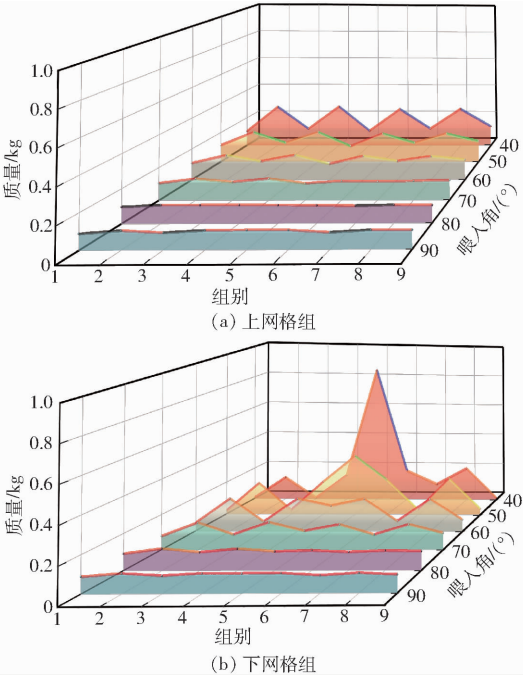


图 13 不同喂入角下各网格组内颗粒质量统计结果
Fig. 13 Statistical results of particle quality within each grid group at different feeding angles

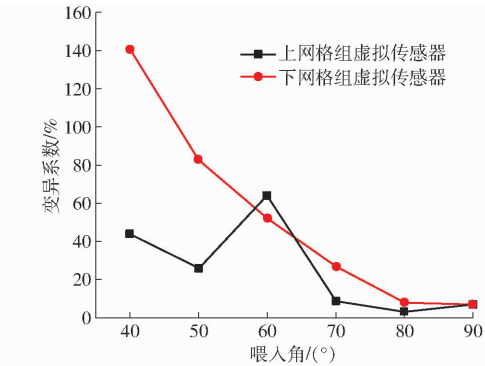


图 14 不同喂入角时上、下网格组颗粒变异系数统计结果
Fig. 14 Statistical results of coefficient of variation of particles in upper and lower grid groups at different feeding angles

量变异系数。如图 14 所示,喂入角在 40°~90°变化时上网格组中颗粒流的变异系数先降低再升高,在 60°时达到最大值(64%),60°后开始降低,下网格组中颗粒流的变异系数逐渐降低。当喂入角为 40°时,变异系数由上网格组(44%)向下网格组(141%)递增,变异系数差值最大(97%);喂入角为 60°时,变异系数由上网格组(64%)向下网格组(52%)递减,变异系数差值为 12%;当喂入角为 90°时,上网格组与下网格组的变异系数保持一致(7%)。上、下网格组内的变异系数差异,说明颗粒流由上网格组到下网格组的流动过程中,颗粒分布状态发生改变。

根据前期设计需求,变量调节的前提是确保进料口处的颗粒流集中在正态调节单元中心位置,并

且颗粒流由喂入角流出到第 1 组调节棒上方时都保持均匀分布状态。在进料口喂入角仿真试验中,当喂入角为 40°和 50°时,上、下网格组内的颗粒变异系数差距较大,颗粒流由上网格组到下网格组变化过程中,颗粒分布变化不均匀,不符合设计需求;当喂入角为 60°时,颗粒流在上网格组变异系数到下网格组组变异系数减小,颗粒流由均匀状态变得离散,不符合设计需求。当喂入角为 80°和 90°时,颗粒流在上网格组与下网格组的变异系数差异较小,但当喂入角为 80°和 90°时,喂入角属于垂直状态,颗粒流速度较大(10.90 m/s),易对装置调节棒产生损坏以及破坏颗粒完整性,不符合设计需求。而当喂入角为 70°时,变异系数由上网格组(9%)向下网格组(27%)递增,变异系数差值为 18%,颗粒流变化相对较小,颗粒相对均匀。综合以上考虑,本文喂入角选择 70°。

3.2 条播装置变量调节性能测试

3.2.1 仿真试验结果与分析

不同组合下网格状虚拟传感器的 6 个子网格中的复合肥颗粒沉积量如图 15 所示。整体来看,不同组合方式下各子网格内的颗粒沉积量有很大差异,形成了多种类型的变量分布。颗粒整体分布呈 U 形变化(组合 1、2、4、12 与组合 5~8)、单调变化(组合 3、10)、均匀变化(组合 9、11)。对于 U 形变化,各组合之间的差异也不一样。其中组合 6 颗粒集中分布在组别 1(0.023 kg)和组别 6(0.023 kg)内,组别 2 到组别 5 内颗粒分布相对较少,可达到 0.013 kg 的变量调节;对于单调变化,组合 3 可实现颗粒质量左低右高的变量调节,组别 1 内颗粒沉积最少(0.01 kg),组别 6 内颗粒沉积最多(0.025 kg),最大差异为 0.017 kg。组合 10 可实现颗粒质量左高右低的变量调节,最大差异为 0.016 kg;对于均匀变化,各组别的均值也因组合不同而有差异。组合 9 整体呈均匀状态,肥料颗粒质量平均为 0.015 kg。组合 11 中,整体均值 0.016 kg。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量的差异化调节,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量差异。

表 4 为不同组合下的复合肥颗粒差异化分析结果。从表中可以看出,12 个组合的变异系数与变量范围之间具有显著差异,变异系数整体为 12%~47%,变量范围整体为 10%~31%,可以实现多样化的变量调节。尤其是组合 3 时,肥料分布差异性较为明显,差值为 0.017 kg,变异系数为 47%,可实现的肥料变量范围最广泛(11%~31%)。当组合 11 时,肥料分布相对于其余组合下的情况最均

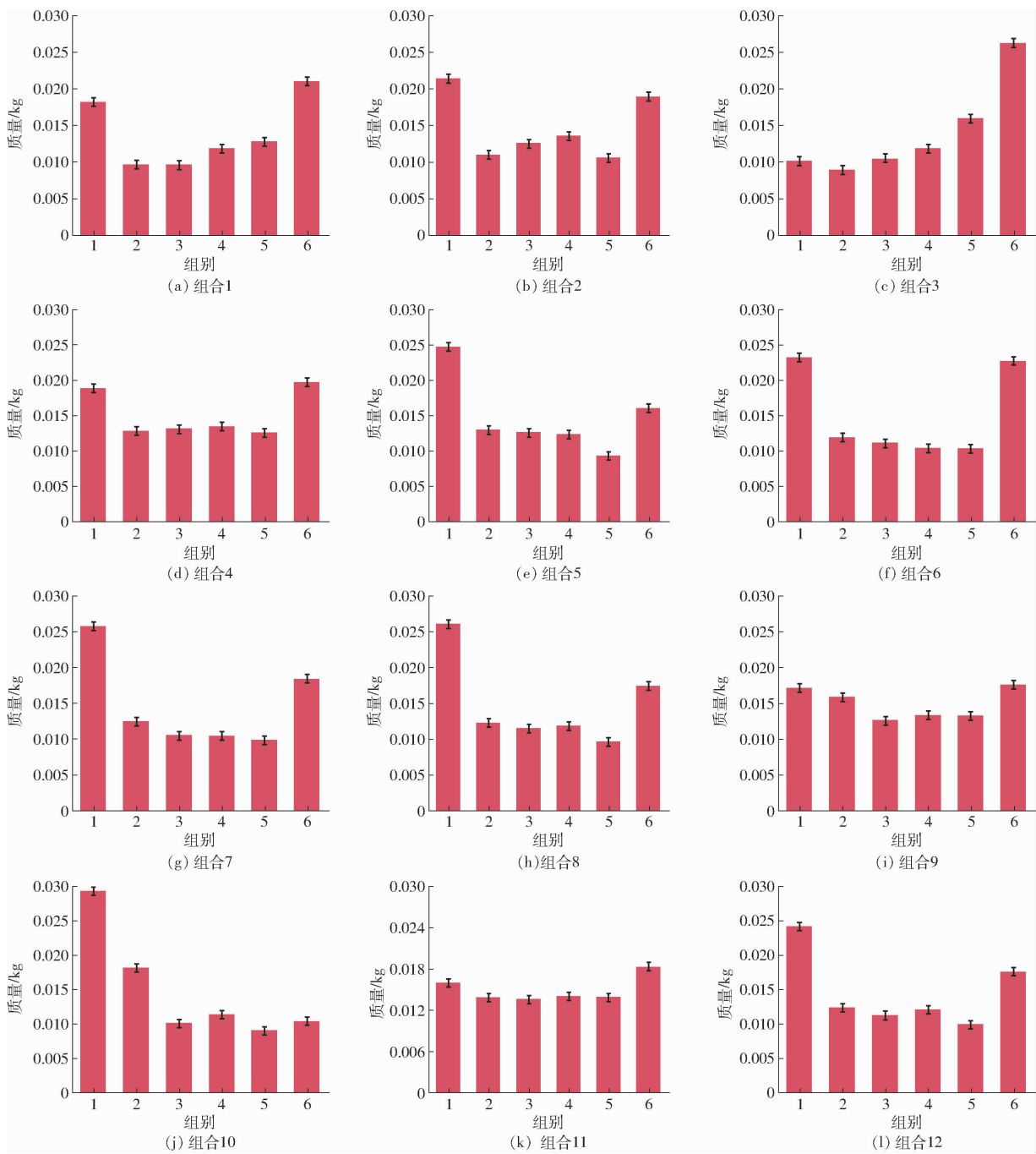


图 15 复合肥颗粒在不同组合下网格状虚拟传感器统计的颗粒质量

Fig. 15 Particle mass of compound fertilizer particles in different combinations of mesh virtual sensor statistics

匀,变异系数达到 12%,肥料质量最大值与最小值相差 0.005 kg,变量范围最小(15% ~ 20%)。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量变量范围,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量范围,显示更加精细化的变量差异。

表 5 为不同组合下的水稻种子颗粒差异化分析结果。从表中可以看出,12 个组合的变异系数与变量范围之间具有显著差异,变异系数整体为 12% ~ 43%,变量范围整体为 10% ~ 31%,可以实现多样化的变量调节。尤其是组合 3 时,肥料分布差异性较为

明显,差值为 0.018 kg,变异系数为 43%,可实现的肥料变量范围最广泛(10% ~ 31%)。当组合 11 时,肥料分布相对于其余组合下的情况最均匀,变异系数达到 12%,肥料质量最大值与最小值相差 0.005 kg,变量范围最小(14% ~ 20%)。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量的变量范围,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量范围,显示更加精细化的变量差异。

3.2.2 台架测试结果与分析

不同组合下,6 个排料管中的复合肥颗粒沉积量如图 16 所示。整体来看,不同组合方式下各排料

表 4 不同组合下复合肥料颗粒差异化分析结果

Tab.4 Results of differential analysis of compound fertilizer particles in different combinations

组合	质量差值/kg	变异系数/%	变量范围/%
1	0.011	34	12~25
2	0.011	30	12~24
3	0.017	47	11~31
4	0.007	22	14~22
5	0.015	36	11~28
6	0.013	42	12~26
7	0.016	41	11~29
8	0.014	37	11~28
9	0.005	14	14~20
10	0.016	44	10~30
11	0.005	12	15~20
12	0.016	43	11~29

表 5 不同组合下水稻种子颗粒差异化分析结果

Tab.5 Results of grain differentiation analysis of rice seeds under different combinations

组合	质量差值/kg	变异系数/%	变量范围/%
1	0.012	33	12~26
2	0.012	36	12~25
3	0.018	43	10~31
4	0.007	20	13~21
5	0.014	35	12~28
6	0.010	35	13~24
7	0.014	39	12~27
8	0.014	39	12~28
9	0.006	19	13~20
10	0.017	42	11~30
11	0.005	12	14~20
12	0.017	41	11~29

管内的颗粒沉积量有很大差异。肥料整体分布呈 U 形沉积(组合 1、2、4、11、12 与组合 5~9)、类单调变化(组合 3 和组合 10)。其中组合 6,肥料总体呈现 U 形沉积,肥料集中分布在组别 1(0.250 kg)和组别 6(0.180 kg)内,组别 2 到组别 5 内肥料分布相对较少,可达到 0.170 kg 的变量调节;组合 12,肥料呈现 U 形沉积,肥料集中分布在组别 1(0.180 kg)和组别 6(0.150 kg),组别 2 到组别 5 内的肥料分布相对较少,可达到 0.105 kg 的变量调节;组合 3 肥料整体呈现左低右高的单调变化,但组别 1 时出现增高(0.100 kg),组别 2 内肥料沉积最少(0.070 kg),组别 6 内的肥料沉积最多(0.275 kg),组别 2 到组别 5 肥料分布呈现递增变化,可达到 0.205 kg 的变量调节。组合 10 可实现颗粒质量左高右低的变量调节,可达到 0.200 kg 的变量调节。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量的差异

化调节,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量差异。

表 6 为装置不同组合对复合肥料台架试验排量性能测试结果。12 个组合的变异系数与变量范围差异显著,变异系数整体为 44%~92%,变量范围整体为 6%~42%,实现多样化变量调节。而装置处于组合 8 时,肥料分布差异性最为明显,差值为 0.214 kg,变异系数为 92%,所处肥料的变量范围最为广泛(6%~41%)。而当装置处于组合 11 时,肥料分布相对于其余组合下的情况最为均匀,变异系数达到 44%,肥料质量最大值与最小值之差达到 0.100 kg,变量范围最小(11%~27%)。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量的变量范围,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量范围,显示更加精细化的变量差异。

表 7 为装置不同组合对水稻种子台架试验排量性能测试结果。12 个组合的变异系数与变量范围差异显著,变异系数整体为 40%~90%,变量范围整体为 5%~40%,实现多样化变量调节。而装置处于组合 8 时,颗粒分布差异性最为明显,差值为 0.221 kg,变异系数为 90%,所处颗粒的变量范围最为广泛(5%~40%)。而当装置处于组合 11 时,肥料分布相对于其余组合下的情况最为均匀,变异系数达到 40%,颗粒质量最大值与最小值之差达到 0.102 kg,变量范围最小(11%~27%)。综上,通过设置不同的组合方式,可以得到各组别间的颗粒质量的变量范围,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量范围,显示更加精细化的变量差异。

综上,仿真和台架测试结果均表明通过改变模组的组合方式能够分散颗粒,改变颗粒的运动轨迹,形成多种类型的颗粒质量分布,实现各排料管内的颗粒变量调节。虽然台架测试和仿真测试时的颗粒流量有些许差异,但在同一组合下的各排料管内的颗粒流量相对变化趋势一致。针对复合肥料,尤其是组合 2,在仿真和台架试验下颗粒流分布总体呈下降趋势,颗粒集中分布在组别 1 和组别 6 中,颗粒在组别 2 到组别 5 中的分布呈现先递增后降低的趋势,在组别 4 时呈现高点。其中,相比较复合肥料颗粒的仿真试验结果分析,组合 3、组合 9、组合 10 和组合 11 的结果差异可能是因为不可避免的试验误差,比如颗粒碰撞、弹跳等。仿真试验和台架试验采取的试验时间不同,主要为了更好地对比装置在仿真试验和台架试验下的结果,也存在一部分考虑到台架试验中料箱容积和流量限制的问题,但整体对试验结果没有明显影响。在仿真和台架测试试验



图 16 复合肥料颗粒在不同组合下各料管内颗粒沉积量台架试验结果

Fig. 16 Bench test results on deposition of compound fertilizer particles in different combinations in each material tube

中,通过改变模组的组合方式能够分散颗粒,试验经过多次重复后结果偏小、变量调节稳定,各排料管的颗粒质量差异范围大,可以实现多种变量调节要求。

3.3 变量成条效果动态测试结果

该条播装置在不同模组组合下的复合肥颗粒成条效果动态测试结果如图 17 所示。从图中可以看出,组合 1 ~ 12 的 01 ~ 06 行,纵向成条宽度明显,横向行间距适中,装置整体成条效果显著;组合 8、9、12 与组合 1 ~ 6 的第 06 行成条较宽,组合 7、10、11 的第 01 行成条较宽;组合 1、3、5、7、11、12 的第 03 行成条较窄,组合 2、4、6 的第 04 行成条较窄,组

合 8 ~ 10 的第 02 行较窄;不同组合下的第 01、02 行的间距较宽;组合 1、4、5 与组合 10 ~ 12 下的 03、04 行间距较窄,组合 2、3 与组合 6 ~ 9 的 04、05 行间距较窄。通过设置不同的组合方式,影响颗粒质量变化,可以得到各行成条宽度与行间距的差异化调节,而且同一类型的变量调节也可以得到更加精细化的变量成条宽度与行间距,进一步验证了变量调节的可行性。

表 8 为不同组合下复合肥颗粒变量成条测试结果。当装置处于组合 6 时,平均成条宽度最大,为 97.67 mm,最大成条宽度为 99 mm,最小成条

表 6 不同组合对复合肥颗粒台架试验排量性能测试结果

Tab.6 Different combinations of compound fertilizer granule bench test discharge volume performance

test results			
组合	质量差值/kg	变异系数/%	变量范围/%
1	0.165	53	9 ~ 33
2	0.142	63	9 ~ 30
3	0.220	76	10 ~ 42
4	0.125	45	11 ~ 29
5	0.162	68	8 ~ 35
6	0.169	84	7 ~ 37
7	0.173	60	7 ~ 33
8	0.214	92	6 ~ 41
9	0.140	53	10 ~ 31
10	0.198	62	8 ~ 37
11	0.100	44	11 ~ 27
12	0.117	45	11 ~ 29

表 7 不同组合对水稻种子颗粒台架试验排量性能测试结果

Tab.7 Different combinations of test results on displacement performance of rice seed grain bench test

组合	质量差值/kg	变异系数/%	变量范围/%
1	0.139	41	10 ~ 30
2	0.111	47	10 ~ 27
3	0.208	74	9 ~ 40
4	0.104	41	11 ~ 28
5	0.112	42	10 ~ 28
6	0.166	74	8 ~ 36
7	0.161	56	7 ~ 31
8	0.221	90	5 ~ 40
9	0.145	56	10 ~ 33
10	0.162	56	10 ~ 35
11	0.102	40	11 ~ 27
12	0.108	43	11 ~ 29

宽度为 96 mm,不同行之间最大行间距为 100 mm,最小行间距为 84 mm,成条效果稳定。当装置处于组合 9 时,平均成条宽度较小,为 89.83 mm,最大成条宽度为 105 mm,最小成条宽度为 73 mm,不同行之间最大行间距为 100 mm,最小行间距为 84 mm,成条效果稳定。12 个组合下整体成条效果稳定,各行成条宽度最小为 72 mm,最大为 105 mm;各行间距最小为 80 mm,最大为 102 mm;整体各行成条宽度在 85 mm 波动,整体各行间距在 90 mm 波动,装置不管处于哪种组合下,都呈现很好的成条效果。

表 9 为不同组合下的水稻种子颗粒变量成条测试结果。当装置处于组合 6 时,平均成条宽度最大,为 95.83 mm,最大成条宽度为 106 mm,最小成条宽度为 90 mm,不同行之间最大行间距为105 mm,最小行间距为 81 mm,成条效果稳定。当装置处于组合 9 时,平均成条宽度较小,为 91.50 mm,最大成条宽度为 103 mm,最小成条宽度为 83 mm,不同行之间最大行间距为 100 mm,最小行间距为81 mm,成条效果稳定。12 个组合下的整体成条效果稳定,各行成条宽度最小为 78 mm,最大为106 mm;各行间距最小为 80 mm,最大为 105 mm;整体各行成条宽度在 93 mm 波动,整体各行间距在91 mm 波动,装置不管处于哪种组合下,都呈现很好的成条效果。

复合肥颗粒试验中,组合 6 和组合 11 中,虽然台架试验变量成条效果显著,但采取的料管较大和人工移动黑色采集布的速度较慢,导致颗粒成条量较为集中。平均成条宽度分别为 97.67 mm 和 95.67 mm,各行间距为 91.47 mm。并且最左侧料管

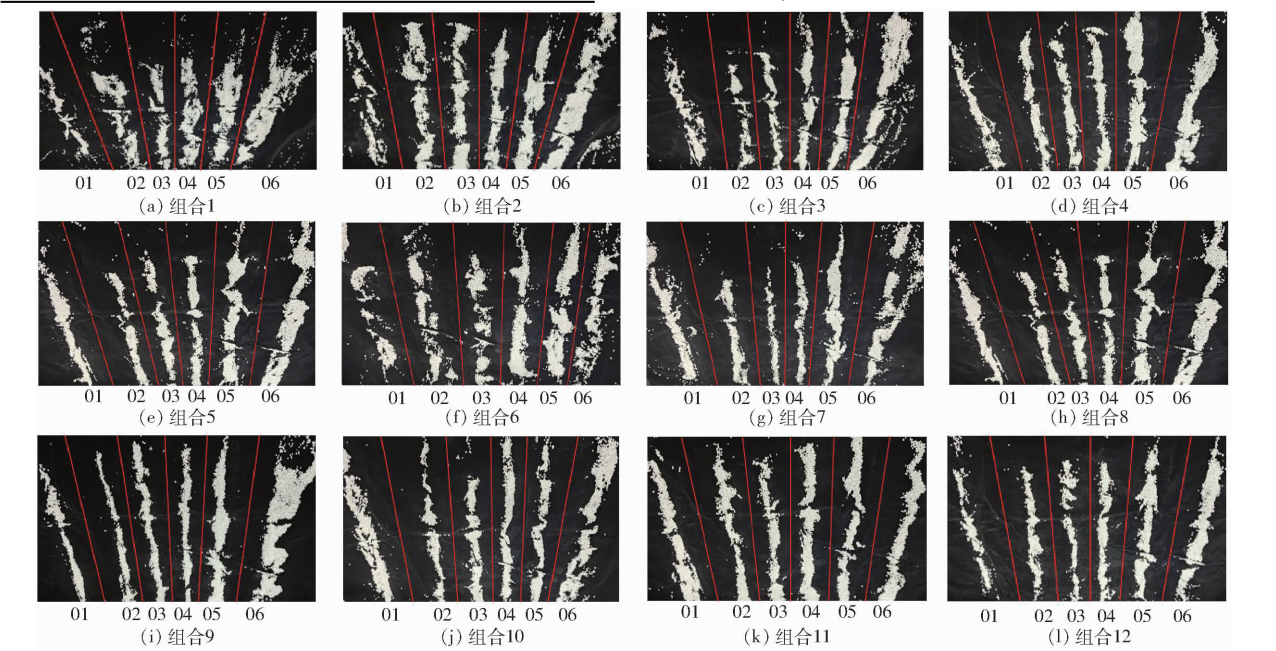


图 17 不同组合下颗粒成条效果

Fig.17 Particle formation in different combinations

表 8 不同组合下复合肥颗粒变量成条测试结果

Tab.8 Results of variable bar formation test of compound fertilizer particles in different combinations												
组合	各行成条宽度/mm						平均成条	各行间距/mm				
	第 1 行	第 2 行	第 3 行	第 4 行	第 5 行	第 6 行	宽度/mm	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
1	90	100	95	97	98	102	97.00	100	90	80	80	84
2	99	97	90	85	92	100	93.83	99	92	92	86	86
3	97	75	72	89	89	105	87.83	101	93	94	92	90
4	95	90	89	88	90	99	91.83	102	94	93	94	98
5	99	90	75	82	92	103	90.17	102	92	88	90	94
6	98	98	98	96	97	99	97.67	100	92	85	84	86
7	97	96	73	82	95	103	91.00	102	92	86	84	98
8	95	88	96	94	97	102	95.33	101	85	86	85	98
9	90	73	95	86	90	105	89.83	100	84	86	84	97
10	102	85	88	95	92	101	93.83	101	88	84	86	96
11	102	95	88	95	95	99	95.67	102	84	82	87	97
12	91	90	85	94	97	105	93.67	102	90	84	88	96

表 9 不同组合下水稻种子颗粒变量成条测试结果

Tab.9 Results of grain variable formation test of rice seeds in different combinations												
组合	各行成条宽度/mm						平均成条	各行间距/mm				
	第 1 行	第 2 行	第 3 行	第 4 行	第 5 行	第 6 行	宽度/mm	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
1	100	91	93	91	98	99	95.33	99	85	82	83	92
2	96	92	87	83	89	105	92.00	97	88	90	84	91
3	92	84	78	83	89	101	87.83	100	90	91	90	93
4	101	89	87	88	91	100	92.67	99	93	90	92	94
5	101	89	81	85	93	101	91.67	101	91	86	91	100
6	101	94	93	90	91	106	95.83	105	91	89	81	98
7	98	94	83	88	91	105	93.17	97	90	88	81	99
8	96	89	91	90	94	99	93.17	101	84	87	88	100
9	95	83	91	88	89	103	91.50	100	83	89	81	99
10	101	84	89	91	95	103	93.83	103	86	86	88	97
11	99	91	94	97	96	101	96.33	99	82	84	87	98
12	96	92	87	91	94	102	93.67	96	89	85	87	97

和最右侧料管偏角过大,导致整体成条宽度和间距过大。为了更好呈现变量成条效果,可以将试验料管直径减小,料管间距增加,同时保证料管垂直向下,避免料管偏角过大,导致变量成条效果不显著。条带间距与排料管到采集布之间的距离以及排料管的间距有关,具体使用时可进行排料管的间距调整。

4 结论

- (1)进料口喂入角对颗粒进入变量调节机构的状态影响较大,颗粒垂直喂入且向中心汇集的情况下更有利于调节棒进行分流。喂入角为 70°时,变异系数由上网格组(9%)向下网格组(27%)递增,变异系数差值为 18%,颗粒流变化相对较小,颗粒相对均匀,更符合设计需求。
- (2)该条播装置能够实现变量调节,且稳定性好。在一定的复合肥颗粒流量下,不同组合中,各排料管之间的复合肥颗粒流量差异最大的为组合 8(变异系数为 92%),最大差值为 0.214 kg,变量范围最大(6%~41%);各排料管之间的复合肥颗粒

- 流量差异最小的为组合 11(44%),最小差值为 0.100 kg,变量范围最小(11%~27%)。12 个组合的变异系数与变量范围差异显著,变异系数整体为 44%~92%,变量范围整体为 6%~42%,可实现多样化变量调节。
- (3)该条播装置能够实现变量调节,且稳定性好。在一定的水稻种子颗粒流量下,不同组合中,各排料管之间的水稻种子颗粒流量差异最大的为组合 8(90%),最大差值为 0.221 kg,变量范围最大(5%~40%);各排料管之间的水稻种子颗粒流量差异最小的为组合 11(40%),最小差值为 0.102 kg,变量范围最小(11%~27%)。12 个组合的变异系数与变量范围差异显著,变异系数整体为 40%~90%,变量范围整体为 5%~40%,可实现多样化变量调节。
- (4)条播装置动态测试结果表明,所有组合下颗粒成条效果明显,条带波动小,条带宽度和间距稳定,能够满足精细化变量施肥或者播种要求,但具体情况需要根据颗粒特性设置作业参数。

参 考 文 献

[1] CHOUHAN G K, VERMA J P, JAISWAL D K, et al. Phytomicrobiome for promoting sustainable agriculture and food security: opportunities, challenges, and solutions[J]. Microbiological Research, 2021, 248: 126763.

[2] PIAO L, ZHANG S, YAN J, et al. Contribution of fertilizer, density and row spacing practices for maize yield and efficiency enhancement in Northeast China[J]. Plants, 2022, 11(21): 2985.

[3] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7): 97-103.

SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. (in Chinese)

[4] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. Innovation of strip fertilization planting for rice straw crushing with back-throwing and interrow-laying[J]. Plant Methods, 2022, 18(1): 31.

[5] JOVARAUSKAS D, STEPONAVICIUS D, KEMZURAITA A, et al. Comparative analysis of the environmental impact of conventional and precision spring wheat fertilization under various meteorological conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 296: 113150.

[6] SONG C, ZHOU Z, ZANG Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105832.

[7] 任灵杰,田敏,李江全,等. 我国变量施肥技术的研究现状与发展分析[J]. 农机化研究,2023,45(10): 10-15,23.

REN Lingjie, TIAN Min, LI Jiangquan, et al. Research status and development analysis of variable fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 10-15, 23. (in Chinese)

[8] 宋灿灿,周志艳,姜锐,等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 80-88,307.

SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic rice sowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80-88, 307. (in Chinese)

[9] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 玉米变量播种机单体驱动器的设计[J]. 农业工程学报,2019,35(11): 1-9.

DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design of row-unit driver for maize variable rate planter[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 1-9. (in Chinese)

[10] 刘中正,玄冠涛,邵园园,等. 温室自走式施肥播种覆膜一体机的设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(8):113-116,140.

LIU Zhongzheng, XUAN Guantao, SHAO Yuanyuan, et al. Design principle of biaxial cam spiral low-temperature oil pressllation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(8): 113-116, 140. (in Chinese)

[11] 孙晗,郭广川,唐帅,等. 蔬菜育苗播种流水线压穴滚筒装置改进与控制系统设计[J]. 农业工程学报,2021,37(22): 41-48.

SUN Han, GUO Guangchuan, TANG Shuai, et al. Improvement of hole pressing roller device and design of the control system for vegetable seedling's seeding assembly line[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 41-48. (in Chinese)

[12] 黄小毛,徐胡伟,张顺,等. 油菜成条飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(5): 78-87.

HUANG Xiaomao, XU Huwei, ZHANG Shun, et al. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 78-87. (in Chinese)

[13] 何伟灼,刘威,姜锐,等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(18): 51-61.

HE Weizhuo, LIU Wei, JIANG Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(18): 51-61. (in Chinese)

[14] 张顺,王浩宇,苑严伟,等. 腔道式水稻排种器漏播检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4): 51-62.

ZHANG Shun, WANG Haoyu, YUAN Yanwei, et al. Design and performance test of loss sowing detection system for cavity-type rice seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 51-62. (in Chinese)

[15] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(2): 109-114.

LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese)

[16] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14): 32-39.

LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32-39. (in Chinese)

[17] 宋灿灿,周志艳,王国宾,等. 施肥无人机槽轮式排肥器槽轮结构参数优选[J]. 农业工程学报,2021,37(22): 1-10.

SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, WANG Guobin, et al. Optimization of the groove wheel structural parameters of UAV-based fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 1-10. (in Chinese)

[18] 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 of 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)