

小麦分引组合式双行宽条带导种装置设计与试验

韩建锋^{1,3}, 杜娟慧¹, 顾昕¹, 刘立超^{1,2}, 李兆东^{1,2*}, 刘超⁴

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036; 3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 4. 安徽宏翔农业机械有限公司, 马鞍山 238100)

摘要: 针对稻茬田小麦机械化带状播种时受黏重土壤与秸秆还田耦合作用制约存在导种装置壅堵导致断条的问题, 该研究设计了一种分引组合式双行宽条带导种装置, 导种过程中利用球面弹籽部件对下落种群左右均匀分种、借助坡度斜面对分流种群宽带引种。运用质点运动学理论建立了小麦分种、引种过程的力学模型, 明确了球面弹籽部件直径和斜面坡度对导种均匀性有影响。运用 EDEM 软件对小麦导种装置关键结构参数进行优化设计, 以球面弹籽部件直径和斜面坡度为试验因素, 以各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数为评价指标, 通过单因素和二次正交旋转组合试验获取相关试验数据, 应用 Design-Expert 软件对试验数据进行回归分析, 建立了试验因素与试验指标之间的回归方程。结果表明, 球面弹籽部件直径对各行排量一致性影响显著 ($P < 0.05$), 斜面坡度对行内横向均匀度有极显著影响 ($P < 0.01$), 斜面底板导种装置最优结构参数为球面弹籽部件直径 40 mm、斜面坡度 10°。并与市场上已有的波浪底板、弧面底板、平面底板 3 种型式导种装置进行 3 种播量下的仿真对比试验。仿真试验结果表明, 各播量下的各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数由大到小均为平面底板、弧面底板、波浪底板和斜面底板型导种装置, 在播量 450 kg/hm² 下, 斜面底板型导种装置播种效果最佳, 各行排量一致性变异系数为 2.92%, 行内横向均匀度变异系数为 14.19%。台架与田间对比试验表明, 斜面底板型导种装置的各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数均最小, 此时各行排量一致性变异系数均不大于 4.0%, 行内横向均匀度变异系数均不大于 16%; 田间对比试验中, 在播量 450 kg/hm² 下, 斜面底板型导种装置较其他 3 种导种装置各行排量一致性变异系数最低下降了 2.73 个百分点, 行内横向均匀度变异系数最低下降了 10.61 个百分点。试验结果与仿真结果误差不超过 5%, 表明装置结构参数优化结果可靠, 满足国家播种机质量评价技术规范及大田播种农艺要求。研究结果可为稻茬黏壤土环境下小麦宽条带导种装置优化设计提供参考。

关键词: 农业机械; 试验; 小麦; 导种装置; 宽条带; EDEM

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301035

中图分类号: S223.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0035-12

韩建锋, 杜娟慧, 顾昕, 等. 小麦分引组合式双行宽条带导种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 35-46.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301035 <http://www.tcsae.org>

HAN Jianfeng, DU Juanhui, GU Xin, et al. Design and test of the separate and combined double row wide strip seed guiding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 35-46. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301035 <http://www.tcsae.org>

0 引言

小麦是重要的粮食作物之一, 种植面积占粮食作物种植总面积的 35% 以上^[1]。小麦种植区域分布广泛, 北方以麦玉旱地轮作为主, 南方以稻麦水旱轮作为主。当前小麦播种机械化水平较高, 但在稻茬黏重土壤条件下播种质量仍有待提高^[2]。

小麦播种分为撒播、条播和穴播 3 种方式, 其中条播技术被广泛应用, 而条播又分为窄行条播和宽行条播 2 种^[3]。小麦播种过程主要由排种、输种和导种 3 个串联环节组成, 工作中除受排种装置、输种装置影响外, 导

种装置对播种效果及后续苗情长势有重要影响^[4]。现有稻茬小麦窄行条播主要是通过排种器从种箱里拾取连续种子流, 大都利用双圆盘开沟器与导种管组合将种子流运送至种沟内。上述技术在矮留茬秸秆还田条件下作业效果较佳, 但遇高留茬秸秆还田时受黏壤土与还田秸秆耦合制约易存在导种装置管口壅堵导致漏播断条。余松烈^[5]提出了旱地“增大播幅、籽粒分散”宽幅条播式导种技术并成功进行了小麦高产栽培试验, 在借鉴已有旱地小麦宽幅条播技术基础上, 开展稻茬小麦导种新技术研究显得尤为重要。

小麦宽幅条播的优点主要是合理密植、通风透光、方便管理, 其关键在于提供一种性能优良的导种装置。导种技术是一种将种子流连续导入种床表面的调控手段^[6], 现有导种装置主要有带式导种^[7-9]、管式导种^[10-12]、气送式导种^[13-16]等 3 种形式。带式导种装置一般应用于穴播技术领域, John Deere 公司研制了一种毛刷带式导种装置用于将种子有序运移至种床^[17]; 康建明等^[18]设计了一种隔板带式导种装置, 在输送带上增设隔板和种道

收稿日期: 2023-01-08 修订日期: 2023-04-17

基金项目: 安徽省高校合作协同攻关项目 (GXXT-2020-011); 企业委托项目 (aauhx-20210065)

作者简介: 韩建锋, 博士生, 研究方向为机械化种植关键技术及装备。Email: 2013367312@qq.com

*通信作者: 李兆东, 博士, 副教授, 研究方向为智能化农业装备关键技术及应用。Email: Lizzd@ahau.edu.cn

护板护送种子定位投种；陈学庚等^[19]设计了与气吸式排种器组配且传动与投种机构一体的带式导种装置。管式导种应用较为广泛，对穴播、条播均适应，陈玉龙等^[20]为提高玉米排种合格率，设计了一种固动组合式导种管；张顺等^[21]为解决水稻内充气力式排种器种子成穴性能，通过运动学分析建立了种子理论导送轨迹，并结合离散元法开展了导种管底板倾角与滚筒转速对成穴性能影响；YAZGI^[22]进行了不同结构导种管对播种性能影响研究，结果表明排种速度、导种管形状对播种性能有显著影响；KOCHER 等^[23]开展了导种管不同磨损程度下的播种性能试验，结果得出受磨损的导种管播种性能显著下降。气送导种多应用于条播，TANG 等^[24]为提高玉米播种质量，设计了用于内充式玉米排种器气流辅助种子导送装置，分析了玉米种子在导种管中的运动机理；利用数值模拟分析了导种管不同结构参数组合，分析了种子在气流作用下运移机理；LIU 等^[25]设计一种新型的玉米高速气送导种装置，数值分析了输送装置的结构参数对种子运动的影响，探讨了进气气流速度与播种机运行速度的匹配关系；黄小毛等^[26]设计了一种可折叠式导种装置，应用数值模拟与正交试验相结合的方法开展了输送气流速度、投种管长度、投种管内径对排种性能影响规律研究；雷小龙等^[27]运用 EDEM 软件研究了导种管类型、

导种管直径、落种高度和作业速度 4 因素对种子运动特性和播种性能影响试验。综上所述，研究人员通过理论分析、数值模拟仿真、正交试验设计等方法对不同形式的导种装置进行了卓有成效的研究，提高了不同作物的播种性能，但上述研究主要集中在对不同作物穴播或窄行条播导种技术上，对于宽行条带导种技术方面的研究较少。

本文以宽条带小麦导种装置为研究对象，建立种子导种过程力学模型，应用离散元法对不同结构参数的导种装置宽条带播种过程进行数值模拟，结合单因素和正交试验优化关键结构参数，并进行台架和田间试验验证，旨在提升小麦宽条带播种均匀性，为研制高性能稻茬黏壤土环境下小麦均匀播种装备提供参考。

1 小麦宽条带播种模式和导种装置结构组成与工作原理

1.1 小麦宽条带播种模式

小麦的宽条带播种模式多种多样，常见的播种幅宽为 60~120 mm，幅距为 70~170 mm，为解决小麦播种时前茬稻秸秆量大、土壤黏重板结导种装置缠草、壅泥的问题，提出一种宽条带播种模式，播幅为 80 mm，播距为 100 mm，如图 1 所示。

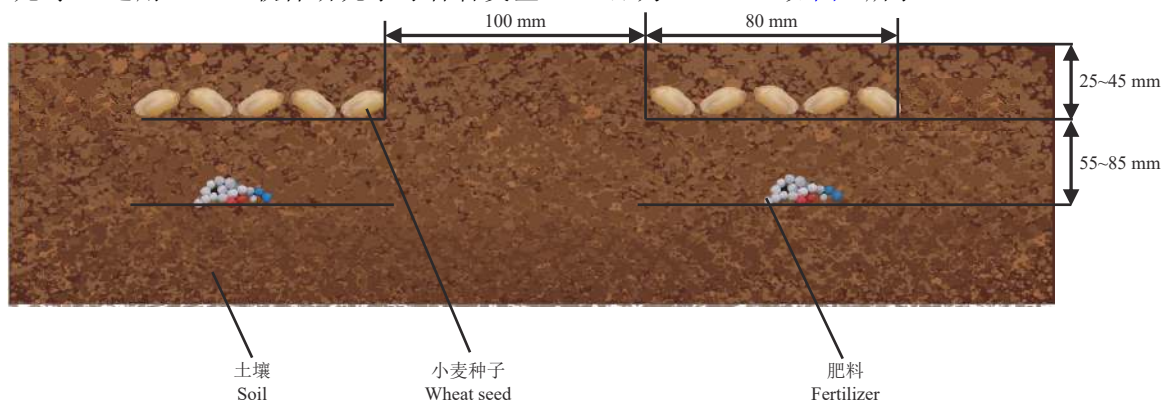


图 1 小麦宽条带播种农艺模式

Fig.1 Agronomic mode of wheat wide-boundary sowing

1.2 导种装置总体结构

导种装置主要结构有 Y 型汇种管、刚性垂直输种管、球面弹籽部件、斜面底板部件和壳体组成，整个导种装置均为铁质材料。Y 型汇种管与分配器支管通过软管连接，设计与分配器支管直径相同为 25 mm；Y 型汇种管与刚性垂直输种管圆滑连接形成三通，设计直径为 35 mm；分引组合式导种装置主要有分种结构和引种结构两大关键部件，为均匀分布刚性垂直输种管中随机区域竖直掉落的小麦种子，因与球面碰撞后可均匀向四周分散，设计球面弹籽部件（球面弹籽部件内嵌于壳体与底板部件相固结，其圆心位于刚性垂直输种管中心位置正下方；为小麦种子在行内横向均匀分布，因斜面具有引流效果，设计斜面底板部件由内向外倾斜。导种装置导种分为分种和引种两个重要过程。球面弹籽部件对从刚性垂直输种管中连续下落的种子流均匀分配成 2 行，利用斜面底板引种部件实现行内宽条带播种。结合宽条带播种农艺要求，针对小田块常应用幅宽 2.3 m 的小麦气送式精量

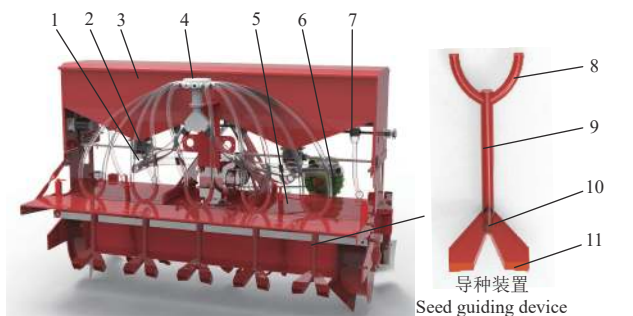
联合播种机，设计播种行数 10 行，主要技术参数如表 1 所示。

表 1 气送式小麦播种机主要参数与性能指标
Table 1 Main parameters and performance indicators of pneumatic wheat seeder

项目 Item	值 Value
整机尺寸 (长×宽×高) Overall dimensions (length×width×height)/(mm×mm×mm)	2 000×2 300×1500
导种装置型式 Seed guiding type	分引组合式
各行排量一致性变异系数 Coefficient of variation of each row seeding quantity consistency/%	≤3.9
行内横向均匀度变异系数 Coefficient of variation of transverse uniformity in row /%	≤45
作业速度 working speed/(km·h ⁻¹)	3~8

1.3 工作原理

气送式小麦播种机工作原理示意图如图 2 所示。



1.文丘里管 2.供种装置 3.种箱 4.分配器 5.旋耕机底盘 6.风机 7.外槽轮 8.Y型汇种管 9.刚性垂直输种管 10.球面弹籽部件 11.斜面底板
1.Venturi tube 2.Seeding device 3.Seed box 4.Distributor 5.Rotary cultivator chassis 6.Fan 7.Outer groove wheels 8.Y-type collect seed pipe 9.Rigid vertical seed transfer pipe 10.Spherical collision seed part 11.Beveled bottom plate

图 2 气送式小麦播种机整机及导种装置结构图

Fig.2 Structure diagram of air-fed wheat seeder and seed guiding device

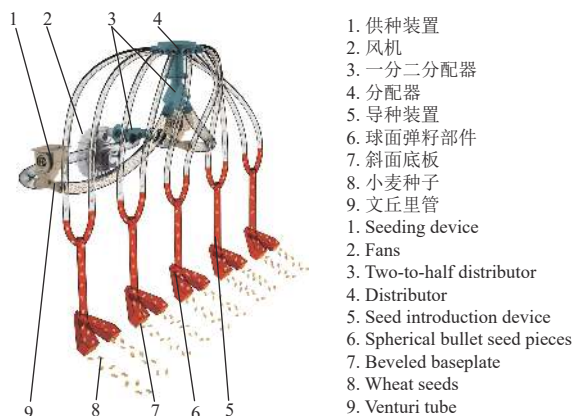
图 3 为播种机的工作原理示意图。根据图 3a，播种机在田间工作时，大量秸秆和土壤被旋耕刀组切碎抛向后方，通过挡泥板平整垄面，少量秸秆和土壤通过挡泥板下方间隙抛盖由导种装置导入播种条带内的种子，同时铧式犁完成开厢沟。



1. 小麦种子 2. 导种装置 3. 挡泥板 4. 土壤秸秆混合物 5. 铧式犁 6. 秸秆
1. Wheat seeds 2. Seed guiding device 3. Fender 4. Mixture of soil and straw 5. Pick-up plow 6. Straw

a. 播种机田间播种示意图

a. Field seeding diagram of seeder



b. 种子运移示意图

b. Schematic diagram of seed transport

图 3 气送式小麦播种机工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of working principle of pneumatic wheat seeder

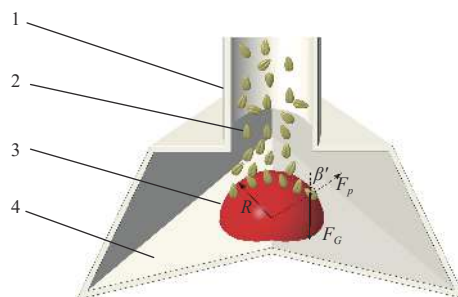
根据图 3b，种箱内的小麦种子在重力作用下充入供种装置，多排错置式倾斜抛物线型孔将种子定量运移至文丘里管，风机产生的高速气流将文丘里管内的种子运移至分配器进行多管路均匀分配，各管路内种子流经柔性输种管输入导种装置，连续运移的种子流在导种装置中经过汇种管汇聚并由刚性垂直输种管输送至球面弹籽部件（分种结构）碰撞后形成 2 行均匀的种子流，并通过斜面底板部件（引种结构）形成宽行内的横向均匀种子流，最终从导种装置导种口导至土壤，完成播种。

1.4 关键部件结构

根据图 1 农艺要求，同时为减少稻麦轮作区前茬稻秸秆量大导种装置缠草、壅泥甚至堵塞而出现断条现象，导种装置设计为一分为二的宽条带型式，主要部件为球面弹籽部件和斜面底板，种子流经导种装置汇聚后由球面弹籽部件均匀分种，最后通过斜面底板进行横向均匀引种并导入种床，提高导种均匀性。根据图 3 气送式小麦播种机工作原理，散粒体种群在自身重力作用下与分种部件顶部接触碰撞后向左右分流，为使下落种群均匀分行，设计分种部件结构形状为球面；分成两行的种子流在合外力作用下沿各行内壁运动至导种口，具有一定坡度的斜面可使种子在行内横向上受到一定分力作用，实现种子流由内向外偏移，故引种部件设计为斜面底板。由此看出，球面弹籽部件和斜面底板部件对下落种群的分种和引种起到至关重要作用。

1.4.1 小麦导种装置分种过程分析

根据播种机的工作原理可知，分引组合式双行宽条带导种装置导种主要分为分种和引种两个过程，为研究导种装置导种效果，确定球面弹籽部件（分种结构）对各行排量的影响和斜面底板部件（引种结构）对行内横向均匀度的影响，对分种结构分种和引种结构引种两个过程进行分析。分种过程中，小麦种子在重力作用下沿刚性垂直输种管垂直下落，并最终与球面弹籽部件碰撞。碰撞时，由于种子速度较快，两者无明显形变且碰撞冲力远大于其他的力，可近似看做完全弹性碰撞，碰撞过程中小麦种子的受力情况（忽略小麦种子形状的影响）如图 4 所示。



1.外壳体 2.小麦种子 3.球面弹籽部件 4.斜面底板

1.Housing 2.Wheat seed 3.Spherical collision seed part 4.Beveled bottom plate
注： R 为球面弹籽部件的半径，mm； F_g 为小麦种子所受重力，N； F_p 为球面弹籽部件对小麦种子的支持力，N； β' 为 F_g 与 F_p 间的夹角， $(^\circ)$ 。

Note: R is the radius of the spherical marbleseed part, mm; F_g is the gravity of wheat seeds, N; F_p is the support force of spherical bouncy seed parts for wheat seeds, N; β' is the angle between F_g and F_p , $(^\circ)$.

图 4 小麦种子与弹籽部件碰撞受力分析图

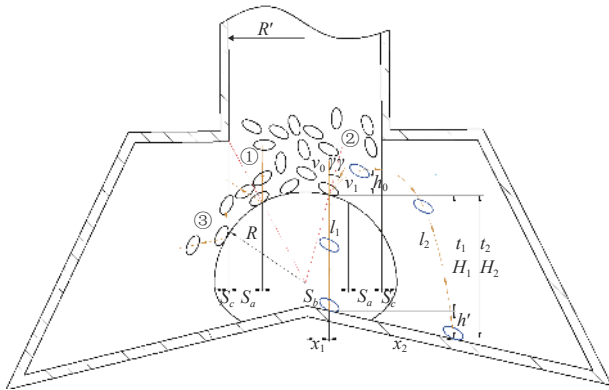
Fig.4 Collision force analysis diagram of wheat seed and elastic seed component

已知球面弹籽部件的半径为 R ，为研究刚性垂直输种管中小麦种子如何均匀分为 2 行宽条带，对空间中小麦种子与球面弹籽部件的碰撞区域进行分析，将分流区域沿垂直方向剖开，如图 5 所示，其中箭头为种子运动方向及轨迹，碰撞区域分为 3 部分：小麦种子与球面弹籽部件能够直接接触的区域，或者说能够发挥分流效果的区域 (S_a 和 S_b)；小麦种子很少与球面弹籽部件接触的区域，或者说无法发挥分流效果的区域 (S_c)。在 S_a 和 S_b 区域，根据种子流相对球面弹籽部件碰撞形成的入射角大小，将小麦种子与球面弹籽部件碰撞的型式分为 3 种：

1) 小麦种子与球面弹籽部件的碰撞点位于 S_a 和 S_b 区域的交界处，连接球面弹籽部件圆心与碰撞点做法线，可知入射角无论多大反射角都会向指向四周，此时，无论小麦种子碰撞前的速度方向如何，碰撞后小麦种子的运动方向最终均朝向两侧。

2) 小麦种子与球面弹籽部件的碰撞点位于 S_b 区域内时，同样连接球面弹籽部件圆心与碰撞点做法线，由于碰撞时入射方向不明确且入射角小，导致反射方向不明确，存在左半球 S_b 区域碰撞点的种子弹向右侧，同理也存在右半球 S_b 区域碰撞点的种子弹向左侧，故 S_b 区域碰撞的小麦种子分流效果影响整体分流效果。

3) 小麦种子与球面弹籽部件的碰撞点位于 S_a 和 S_c 区域时，此时，碰撞后小麦种子的运动轨迹与分流效果同 1)。



注： γ 为种子入射角，rad； γ' 为反射角，rad； v_0 为种子碰撞前速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； v_1 为种子碰撞后速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； h_0 为种子沿 l_2 运动的上升距离，mm； l_1 为无球面弹籽部件时种子运动轨迹； l_2 为有球面弹籽部件时种子运动轨迹； t_1 为种子沿 l_1 运动时间，s； t_2 为种子沿 l_2 运动时间，s； H_1 为 l_1 高度，mm； H_2 为 l_2 高度，mm； h' 为有无球面弹籽部件时种子的落地高度差，mm； x_1 为碰撞点距中心点水平距离，mm； x_2 为碰撞点距落点水平距离，mm； S_a 为种子碰撞区域 1 的球面面积， mm^2 ； S_b 为种子碰撞区域 2 的球面面积， mm^2 ； S_c 为种子碰撞区域 3 的球面面积， mm^2 ； R' 为输种管内部半径，mm。Note: γ is the angle of incidence when the seeds collide, rad; γ' is the reflection angle, rad; v_0 is the velocity of the seeds before collision, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_1 is the velocity of the seeds after collision, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; h_0 is rising distance of seeds moving along l_2 , mm; l_1 is the trajectory of seeds when a spherical bougainvillea seed part is located; l_2 is the seeds movement trajectory when there is a spherical bougainvillea seed part; t_1 is the time required for l_1 trajectory, s; t_2 is the time required for l_2 trajectory, s; H_1 is the height difference of l_1 trajectory, mm; H_2 is the height difference of l_2 trajectory, mm; h' is the difference in seed landing height of the spherical and spherical elastan seed components, mm; x_1 is the horizontal distance of the collision point from the center point, mm; x_2 is the horizontal distance from the collision point to the landing point, mm; S_a is the area of spherical surface of the seed collision area 1, mm^2 ; S_b is the area of spherical surface of the seed collision area 2, mm^2 ; S_c is the area of spherical surface of the seed collision area 3, mm^2 ; R' is the inner radius of rigid vertical seed transfer tube, mm.

图 5 种子与弹籽部件的碰撞运动模型

Fig.5 Collision motion model of seed and collision seed part

根据图 5 小麦种子碰撞后的运动轨迹，离开球面弹籽部件表面时，忽略空气阻力影响，小麦种子仅受到自身重力 F_G 作用，此时小麦种子的运动可近似看作类平抛运动，根据图 5 有如下关系：

$$\begin{cases} v_0 = v_1 \\ v_x = v_0 \cos(\frac{\pi}{2} - 2\gamma) > 0 \\ v_y = v_0 \sin(\frac{\pi}{2} - 2\gamma) > 0 \\ 0 - v_y^2 = -2gh_0 \\ \frac{1}{2}gt_1^2 = h_0 \\ \frac{1}{2}gt_2^2 = h_0 + H_2 \\ t_2 = t_1 + t_2 \\ v_0t_1 + \frac{1}{2}gt_1^2 = H_1 \\ X_1 = x_1 \\ X_2 = x_1 + x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_x 为水平分速度，m/s； v_y 为竖直分速度，m/s； g 为重力加速度， 9.8 m/s^2 ； X_1 为无球面弹籽部件时总水平距离，mm； X_2 为有球面弹籽部件时总水平距离，mm； γ 为种子碰撞时种子的入射角， $\gamma \in (0, \pi/4)$ ，rad； t_1 为沿 l_2 运动上升时间，s； t_2 为平抛时间，s。解得小麦种子降落的时间为

$$t_2 = \frac{v_0 \sin(\frac{\pi}{2} - 2\gamma)}{g} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2gH_2}{v_0^2 \sin^2(\frac{\pi}{2} - 2\gamma)}} \right] \quad (2)$$

小麦种子水平位移为

$$x_2 = \frac{v_0^2 \sin^2(\pi - 4\gamma)}{2g} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2gH_2}{v_0^2 \sin^2(\frac{\pi}{2} - 2\gamma)}} \right] \quad (3)$$

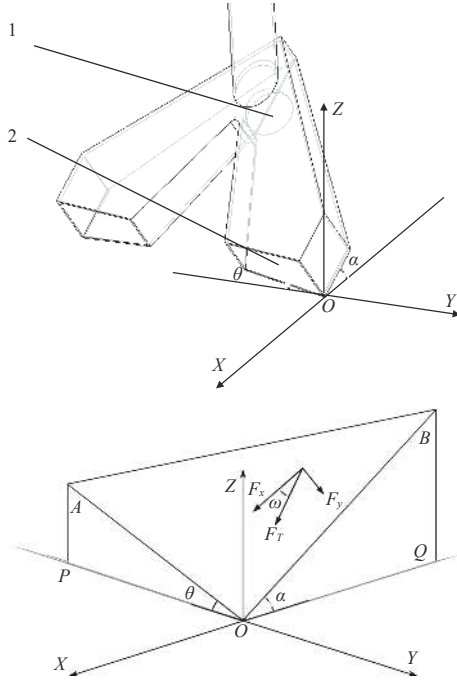
根据式 (1) ~ (3)，当小麦种子速度 v_0 不变时，球面弹籽部件半径 R 影响碰撞后运动轨迹 l_2 、高度 H_2 和运动时间 t_2 ，进而对种子的水平位移造成影响，最终对种子分流效果造成影响。因此球面弹籽部件半径 R 是影响种子均匀分流的重要因素。研究球面弹籽部件旨在探究导种装置各行排量一致性，提高播种均匀性。

1.4.2 斜面底板部件引种过程分析

斜面底板部件是关键引种结构，为保证宽条带播种达到种子行内横向均匀性要求，对导种装置的斜面底板进行分析。斜面底板是一个空间三维斜面，三维斜面相对于水平面的夹角 β 不同，对种子行内横向均匀度的影响不同，故对引种过程进行分析，分析小麦种子在三维斜面上的运动状态，求解三维斜面与水平面的夹角 β ，以及 β 同三维斜面正视图 (YOZ 平面) 与水平面的夹角 θ 、三维斜面右视图 (XOZ 平面) 与水平面的夹角 α 三者之间的关系。为抑制种子在斜面静止，根据前期试验小麦种子的滑动摩擦角为 32° ，为防止种子重力沿斜面的分力小于摩擦力导致种子在三维斜面上滞留、壅堵，本文确定 $\alpha=35^\circ$ 。为使小麦种子在出口处左右两侧均匀分流，需确定 θ 角的大小。

以三维斜面最低点作为原点，建立三维直角坐标系，如图 6 所示，各点坐标为 $O(0, 0, 0)$ 、 $A(0, -1,$

$\tan\theta$)、 $B(-1, 0, \tan\alpha)$ ； AOB 三点构成空间三维斜面，根据空间向量法有：



1. 球面弹籽部件 2. 斜面底板

1. Spherical collision seed part 2. Beveled bottom plate

注： F_T 为种子在斜面所受总力， N ； F_x 为种子在斜面所受总力的 X 轴方向分力， N ； F_y 为种子在斜面所受总力的 Y 轴方向分力， N ； β 为三维斜面与水平面的夹角， $(^\circ)$ ； θ 为三维斜面正视图 (YOZ 平面) 与水平面的夹角， $(^\circ)$ ； α 为三维斜面右视图 (XOZ 平面) 与水平面的夹角， $(^\circ)$ 。

Note: F_T is the total force of the seed on the inclined plane, N ; F_x is the X -axis component of the total force exerted by the seed on the inclined plane, N ; F_y is the Y -axis component of the total force of the seed on the slope, N ; β is the angle between the three-dimensional inclined plane and the horizontal plane, $(^\circ)$; θ is the angle between the three-dimensional oblique front view (YOZ plane) and the horizontal plane, $(^\circ)$; α is the angle between the right view of the three-dimensional inclined plane (XOZ plane) and the horizontal plane, $(^\circ)$.

图 6 斜面底板空间角度关系

Fig.6 Beveled bottom plate slope spatial angle relation

$$\begin{cases} \cos\beta = \frac{\vec{n}_0 \cdot \vec{n}_1}{|\vec{n}_0| |\vec{n}_1|} \\ \vec{n}_0 = (0, 0, 1) \\ \vec{n}_1 = \vec{OA} \times \vec{OB} \\ \vec{OA} = (0, -1, \tan\theta), \vec{OB} = (-1, 0, \tan\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

解得：

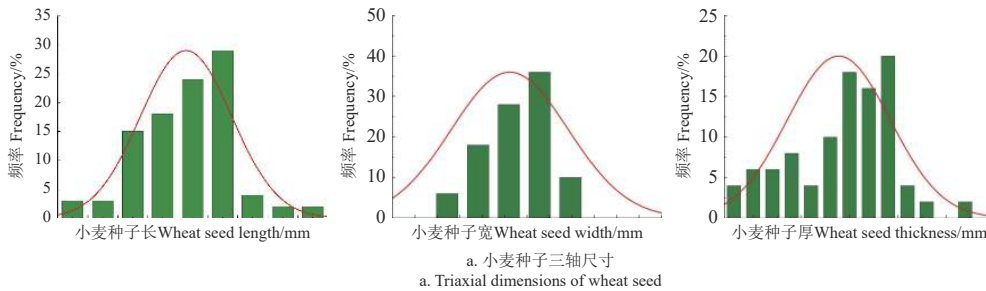


图 7 小麦种子三轴尺寸及仿真模型

Fig.7 Triaxial dimensions and simulation model of wheat seed

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{\tan^2\alpha + \tan^2\theta + 1}} \quad (5)$$

根据图 6 和式 (5) 可知， β 取决于 α 和 θ ， β 越大，三维斜面由内向外的倾斜程度越大，种子的行内横向水平位移就越大，越易于聚集在导种口外侧； β 越小，三维斜面由内向外的倾斜程度越小，种子的行内横向水平位移就越小，越易于聚集在导种口内侧，故 β 是影响种子行内横向均匀性的主要因素。又由于 α 为定值， β 与 θ 正相关，因此 θ 也是影响行内横向均匀性的主要因素。

2 离散元仿真分析

离散元仿真是解决颗粒运动学分析的有效途径，不仅降低试验成本，还可减少试验周期，已被广泛应用于农业工程领域。分引组合式导种装置设计的核心是球面弹籽部件和斜面底板，根据前述分析，球面弹籽部件直径影响分种均匀性，斜面底板坡度影响行内横向播种均匀性。为探究球面弹籽部件直径和斜面底板坡度对导种性能的影响，寻出较优导种性能的结构参数组合，开展离散元仿真试验，对比分析小麦种子经导种装置导种后在种床带上的分布，优化关键结构参数。

2.1 小麦种子离散元颗粒模型

根据前期研究及相关文献^[28-30]，小麦种子颗粒形状不规则，可看作椭球体。本文选取许科 1 号小麦种子为研究对象，利用游标卡尺对随机选取的 100 粒种子进行测定，三轴尺寸如图 7a 所示，求得三轴平均尺寸为长 6.30 mm，宽 3.09 mm，厚 2.75 mm，选取 4 球组合构建小麦种子离散元颗粒模型，如图 7b 所示。

2.2 导种装置离散元仿真模型

利用 Creo 三维绘图软件结合 EDEM 离散元仿真软件建立导种装置离散元仿真模型，种床带纵向对称面与导种装置对称面重合，尺寸为 1 500 mm×600 mm，根据田间播种时落种口距地面 30~50 mm，设计导种装置出种口距种床带表面 40 mm，便于观察种床带上的种子分布情况。如图 8 所示。

本文主要研究小麦籽粒与小麦籽粒间的接触和小麦籽粒与导种装置（主要包括 Y 型汇种管，输种管，球面弹籽部件、斜面底板）接触，以及种子与种床带间的接触，为更好模拟田间环境，设置种床带的接触参数为土壤接触参数^[31-32]，如表 2 所示。



1.颗粒工厂 2.导种装置 3.种床带
1. Particle factory 2. Seed guiding device 3. Seed bed belt

图 8 导种装置离散元仿真模型

Fig.8 Discrete element simulation model of seed guiding device

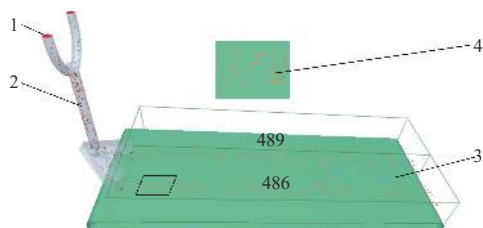
表 2 材料接触模型参数设置

Table 2 Factor level table of seeding performance test

材料	泊松比	剪切模量	密度	碰撞恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
Material	Poisson's ratio	Modulus of shear/Pa	Density/(kg·m ⁻³)	Collision recovery coefficient	Coefficient of static friction	Dynamic friction coefficient
小麦籽粒	0.29	5.08E+8	1 350	0.02	1.25	1.24
Wheat grains	0.29	5.08E+8	1 350	0.02	1.25	1.24
铁 Iron	0.30	7.00E+10	7 800	0.41	0.32	0.18
土壤 Soil	0.50	1.00E+8	1 200	0.02	1.25	1.24

2.3 试验方案

仿真结束后, 进入 EDEM 软件的 Analyst 模块, 对导种装置导出口处的种子进行统计, 每个导种口设置一个网格单元 (1 000 mm×80 mm×50 mm), 计算各行排量一致性变异系数, 如图 9a 所示。对种床带上的种子进行区域划分, 每侧导种口对应的种床带划分为 2×5 的单元网格 (每个单元网格为 200 mm×40 mm×50 mm), 计算种子行内横向均匀度变异系数, 如图 9b 所示。



a. 各行种子排量统计
a. Statistics of seed number in each line



b. 行内横向种子排量统计
b. In-row lateral seed displacement statistics

1.颗粒工厂 2.导种装置 3.种床带 4.小麦种子

注:网格内的数字代表小麦籽粒数

1. Particle factory 2. Seed guiding device 3. Seed bed belt 4. Wheat seed
Note: The numbers of wheat in the grid

图 9 仿真试验排量统计方法

Fig.9 Statistical method of seed number in simulation test

2.4 评价指标与计算方法

各行种子排量一致性变异系数 δ_1 与行内种子横向均匀度变异系数 δ_2 越小, 说明排种均匀性和行内种子分布均匀度越高。

各指标计算式如下:

设计仿真总时间为 10 s, 根据农户提供的不同播种时期播量, 设计颗粒工厂的落种量为 150、300 和 450 kg/hm²。根据 2.3 m 幅宽机型小麦播种行数 (10 行) 设计每个颗粒工厂的种子生成速度为 78、155 和 234 颗/s。由于稻茬田秸秆量大, 土壤板结黏重, 为达到最佳播种效果, 根据农户经验 (常用的拖拉机田间作业速度为 3.6 km/h), 设置种床带相对导种装置的运动速度为 1 m/s。

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_1 &= \frac{s_c}{\bar{x}} \times 100\% \\ s_c &= \sqrt{(\bar{x}_L - \bar{x})^2 + (\bar{x}_R - \bar{x})^2} \\ \bar{x} &= \frac{\bar{x}_L + \bar{x}_R}{2} \\ \bar{x}_L &= \frac{1}{j} \sum_{j=1}^5 x_{Lj} \\ \bar{x}_R &= \frac{1}{j} \sum_{j=1}^5 x_{Rj} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中 \bar{x} 为 2 行 5 次测量的排种量均值; s_c 为 2 行 5 次测量的平均排种量标准差; x_L 为机具前进方向左侧排种量; \bar{x}_L 为左侧排种量平均值; j 为重复次数, $j=5$; x_R 为机具前进方向右侧排种量; \bar{x}_R 为右侧排种量平均值。

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_2 &= \frac{e}{\bar{x}_i} \times 100\% \\ \bar{x}_i &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \\ \bar{x}_j &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \\ e &= \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_i)^2} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中 \bar{x}_i 为行小麦平均籽粒数; x_i 为第 i 行的小麦籽粒数; x_{ij} 为第 i 行第 j 列网格单位的小麦籽粒数; m 为行数, $m=2$; n 为列数, $n=5$; e 为每行内小麦籽粒数的标准差; δ_2 为行内小麦的横向均匀度变异系数, %

3 仿真试验结果分析

3.1 单因素试验

3.1.1 球面弹籽部件直径对评价指标的影响

根据刚性垂直输种管直径为 30 mm, 设置球面弹籽部件直径分别为 0、10、20、30、40、50 和 60 mm

共 7 个梯度进行单因素试验，不同球面弹籽部件直径下的斜面底板坡度倾角均为 10°，材料为铁质。

图 10a 为不同球面弹籽部件直径对各行排量一致性变异系数的影响。从图 10a 可看出，各行排量一致性变异系数随球面弹籽部件直径的增大呈先减小后增大趋势，

当球面弹籽部件直径为 40 mm 时，播量为 150 kg / hm² 的各行排量一致性变异系数 δ_1 最佳，为 0.98%。由图 10b 可知，球面弹籽部件直径对行内横向均匀度变异系数无明显影响，随着球面弹籽部件直径不断增大，行内横向均匀度变异系数基本保持在 8%~12%。

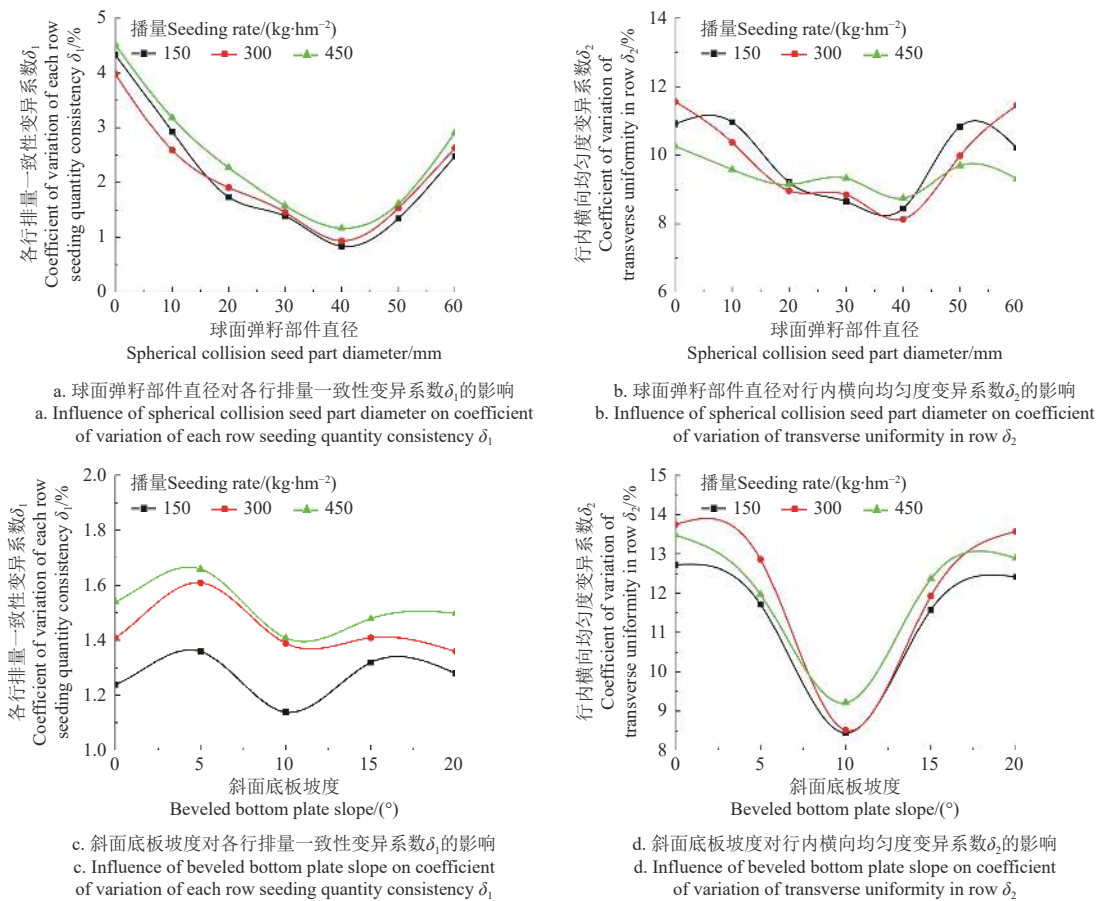


图 10 主要试验因素对评价指标的影响
Fig.10 Effects of main experimental factors on evaluation index

3.1.2 斜面坡度对评价指标的影响

试验固定球面弹籽部件直径为 40 mm，种子经球面弹籽部件碰撞后一分为二呈“八字形”引流，为达到宽幅均匀播种，设定一定的斜面坡度倾角，根据小麦种子的滑动摩擦角为 32°并结合依据理论分析图 6，设定斜面右视图（XOZ 平面）与水平面的夹角 α 为 35°。斜面倾角选取 0°、5°、10°、15°、20°共 5 个梯度进行试验。

不同斜面底板坡度对各行排量一致性变异系数影响曲线如图 10c 所示。根据图 10c 可知，随着斜面底板部件的坡度不断增大，各行排量一致性变异系数始终保持在 1.1%~1.7%，表明斜面底板坡度对各行排量一致性变异系数的影响不大，与理论分析相符。由图 10d 可知，随着斜面底板部件的坡度不断增大，行内横向均匀度变异系数呈先减小后增大的趋势，当斜面底板坡度为 10°时，播量为 150 kg / hm² 行内横向均匀度变异系数最佳为 8.45%。

3.2 正交试验

3.2.1 正交试验设计

为优化导种装置结构参数，根据单因素试验结果选取球面弹籽部件直径 26~54 mm，斜面底板部件的坡度倾角 3°~17°，进行二次正交旋转组合正交试验，正交试验因素与水平如表 3 所示。

表 3 正交试验因素与水平

Table 3 Orthogonal test factors and levels		
水平 Level	斜面底板坡度 Beveled bottom plate slope A/(°)	球面弹籽部件直径 Spherical collision seed part diameter B/mm
+1.414	17	54
+1	15	50
0	10	40
-1	5	30
-1.414	3	26

3.2.2 正交试验结果与分析

利用 Design-Expert 分析软件对试验结果进行回归分析。试验方案与试验结果如表 4 所示。

方差分析如表 5 所示。

表 4 正交试验方案与试验结果
Table 4 Orthogonal test scheme and results

试验号 Test No.	A/(°)	B/mm	$\delta_1/\%$	$\delta_2/\%$
1	5	30	3.87	55.38
2	15	30	4.48	43.19
3	5	50	2.04	47.76
4	15	50	4.26	14.19
5	3	40	4.21	56.54
6	17	40	4.04	34.65
7	10	26	5.57	22.73
8	10	54	4.15	28.28
9	10	40	2.04	19.60
10	10	40	1.89	19.72
11	10	40	2.31	20.61
12	10	40	2.28	18.80
13	10	40	2.35	19.93

表 5 方差分析
Table 5 Analysis of variance

指标 Indicators	方差来源 Source of variance	SS	df	MS	F	P
δ_1	a	0.84	1	0.84	2.16	0.185 0
	b	2.06	1	2.06	5.31	0.044 7*
	ab	0.65	1	0.65	1.67	0.237 2
	a ²	4.10	1	4.10	10.58	0.014 0*
	b ²	8.97	1	8.97	23.12	0.001 9**
	模型	15.23	5	3.05	7.85	0.008 7**
	残差	2.72	7	0.34		
	失拟	2.56	3	0.85	21.39	0.063 0
	误差	0.16	4	0.04		
	总和	17.95	12			
δ_2	a	735.69	1	735.69	7.19	0.008 9**
	b	103.47	1	103.47	12.85	0.220 8
	ab	114.28	1	114.28	1.81	0.200 6
	a ²	1 100.30	1	1 100.30	2.00	0.003 2**
	b ²	44.58	1	44.58	19.21	0.406 9
	模型	2 059.36	5	411.87	0.78	0.011 1*
	残差	400.86	7	57.27		
	失拟	316.53	3	105.51	5.00	0.076 9
	误差	84.34	4	21.08		
	总和	2 460.22	12			

注: SS 表示平方和; df 表示自由度; MS 表示均方和; a、b 分别为 A、B 的水平值; *表示影响显著 (P<0.05); **表示影响极显著 (P<0.01)。
Note: SS represents the sum of squares; df represents degrees of freedom; MS stands for mean square sum; a, b is level value of A, B respectively; * indicates significant impact (P<0.05); ** indicates significant impact (P<0.01).

由表 5 可知, 球面弹籽部件直径对各行排量一致性变异系数影响显著, 斜面坡度对行内横向均匀度变异系数影响显著, 且失拟项均不显著, 回归方程如下:

$$\begin{cases} \delta_1 = 2.17 - 0.51b + 0.77a^2 + 1.14b^2 \\ \delta_2 = 22.73 - 9.59a + 12.58a^2 + 2.53b^2 \end{cases} \quad (8)$$

根据正交试验结果分析可知, 优化后导种装置的关键结构参数球面弹籽部件直径为 40 mm, 斜面底板坡度为 10°; 通过计算可得预期结果各行排量一致性变异系数为 2.17%、行内横向均匀的变异系数为 22.73%。

3.3 不同导种装置结构的导种性能对比

根据市场现有的宽苗带导种装置, 利用三维建模软件建立仿真模型并导入离散元仿真软件进行对比分析。其中分种结构的球面弹籽件直径均设置为 40 mm, 引种结构分别为斜面底板型坡度 10°、波浪底板型放射均布 6 凹槽、弧面底板型半径 500 mm、平面底板型, 如图 11 所示。试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 4 种双行宽条带分引组合式导种装置模型在 3 种不同播量下的各行排量一致性变异系数和行

内横向均匀度变异系数由大到小排列均为平面底板型、弧面底板型、波浪底板型、斜面底板型, 结果显示斜面底板型导种装置结构最优。当播量为 450 kg / hm² 时, 斜面底板型导种装置播种效果最佳, 各行排量一致性变异系数为 2.92%、行内横向均匀度变异系数为 14.19%, 优化后球面弹籽部件直径 40 mm, 斜面坡度 10°的斜面底板型导种装置的排种性能与预期结果基本一致, 满足设计要求。

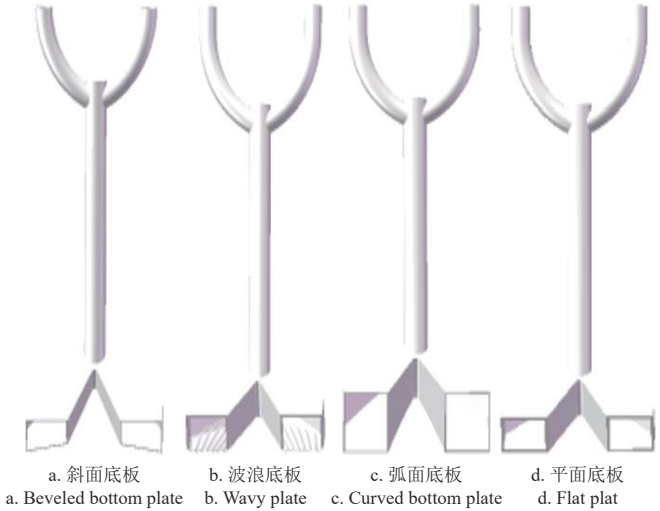


图 11 不同导种装置型式

Fig.11 Different types of seed guides

表 6 不同播量下各导种装置型式导种性能仿真结果

导种装置 Seed guiding device	$\delta_1/\%$			$\delta_2/\%$		
	150 kg·hm ⁻²	300 kg·hm ⁻²	450 kg·hm ⁻²	150 kg·hm ⁻²	300 kg·hm ⁻²	450 kg·hm ⁻²
平面底板 Flat plate	10.24	8.33	7.09	52.74	48.4	44.12
弧面底板 Curved bottom plate	8.80	7.53	4.56	44.38	43.23	38.65
波浪底板 Wavy plate	8.21	7.35	3.94	33.48	26.19	28.75
斜面底板 Beveled bottom plate	6.21	5.60	2.92	30.91	24.20	14.19

4 验证试验

4.1 台架试验

台架试验使用 JPS-12 试验台, 搭建气送式小麦播种机工作的核心部件, 如图 12 所示。取球面弹籽部件直径为 40 mm, 斜面坡度为 10°, 对 4 种导种装置模型分别进行不同播量下的台架试验, 小麦品种为许科 1 号。使用风机将种箱的种子经供种装置集中气送至排种分配器并将种子均匀分配至 10 条管路, 其中 2 条管路接入导种装置, 其余管路接入收集袋。为与仿真试验保持一致, 设置 JPS-12 试验台传送带速度为 3.6 km/h, 通过控制排种转速旋钮将排种量设为 3 个档, 分别为 150、300 和 450 kg/hm², 为防止小麦种子在传送带上发生弹跳, 在被测区涂覆 3 mm 厚、300 mm 宽的桐油, 以增大传送带对小麦种子的黏附力, 降低试验误差。制作一个 2×5 (每个单元网格为 200 mm×40 mm×50 mm) 的简易框架, 随机选取纵向 1 m 长的传送带, 均匀分成 5 段,

横向分为 2 行，统计各单元格内的小麦种子数量，计算行内横向均匀度变异系数。测量收集袋内小麦种子质量，计算各行排量一致性变异系数。每项试验时间为 3 min，重复 6 次，结果取平均值。



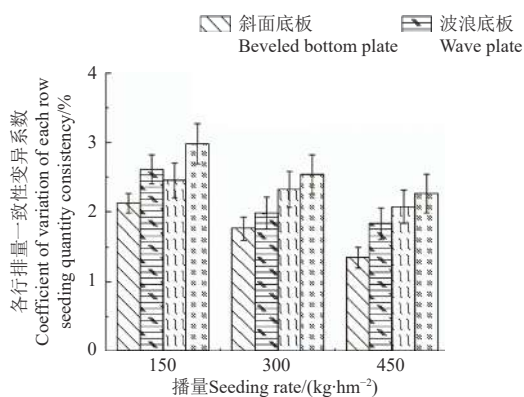
1.斜面底板 2.波浪底板 3.弧面底板 4.平面底板
1.Beveled bottom plate 2. Wavy floor 3.Curved bottom plate 4.Flat plate

图 12 台架试验

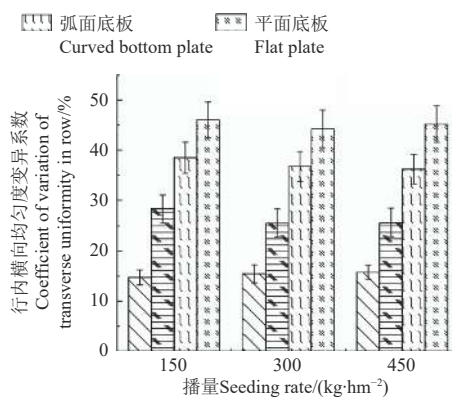
Fig.12 Bench experiment

不同播量下 4 种导种装置各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数如图 13 所示。

当球面弹籽部件直径为 40 mm 时，不同播量下均有斜面底板型坡度 10°导种装置各行排量一致性变异系数



a. 不同播量下不同导种装置结构的各行排量一致性变异系数
a. Coefficient of variation of each row seeding quantity consistency of each row for different seed guiding device structures under different sowing volumes



b. 不同播量下不同导种装置结构的行内横向均匀度变异系数
b. Coefficient of variation of transverse uniformity in row for different seed guiding device structures under different sowing amounts

图 13 导种装置性能对比试验结果

Fig.13 Performance comparison test results of seed guiding device

4.2 田间试验

为进一步验证所设计的小麦导种装置工作性能，于 2022 年 11 月 27 日在安徽省马鞍山市含山县清溪镇马桥行政村开展田间验证试验，试验田土壤类型为黄棕壤，耕层土壤坚实度为 736~815 kPa，稻茬高度为 150~400 mm，稻秸秆覆盖量为 0.74~1.32 kg/m²，土壤干基含水率为 27.56%~35.12%。试验时 2BQMG-10/12 型小麦集排气送式定量播种机由常发农机 CFF1004-H 型轮式拖拉机提供动力，将播种机调整至正常工作状态，控制拖拉机的行走速度为 3.6 km/h，播种量设为 3 档，分别为 150、300 和 450 kg/hm²，拖拉机在田间行进 100 m，将每个导种口用收集袋套住，用电子天平称量排种量，田间试验及出苗效果图 14 所示。播种 65 d 后，将每行小麦随机选取 5 段，每段长度为 1 m，测定区域内的小麦株数，每行内的小麦分成 2 窄行，测定每行内株数，计算行内横向均匀度变异系数。试验结果如表 7 所示。

和行内横向均匀度变异系数最小，当播量为 450 kg/hm² 时，平均各行排量一致性变异系数为 2.31%，平均行内横向均匀度变异系数为 14.21%，与仿真结果基本吻合，验证了仿真试验的可靠性和合理性。

由图 13a 可知，4 种导种装置各行排量一致性变异系数随播量的增大而减小，斜面底板型变异系数最小；从图 13b 看出，4 种导种装置的行内横向均匀度变异系数随播量的增大变化不明显，同一播量下行内横向均匀度变异系数由高到低的顺序为平面底板型、弧面底板型、波浪底板型和斜面底板型，且均不大于 45%，分析其原因在于：台架播种性能试验播量为 150~450 kg/hm²，尽管播量差异较大，但各导种装置的单行播种幅宽较小，单位面积内种子密度相对较大，因此播量变化时，导种装置行内横向均匀度变异系数无明显变化；相同播量条件下，4 种导种装置行内横向均匀度变异系数变化明显，原因是导种装置的引种结构不同，与其他型式导种装置相比，同一播量下，斜面底板型导种装置的各行排量一致性变异系数最低下降了 0.45 个百分点；行内横向均匀度变异系数最低下降了 13 个百分点，具有明显优势。



图 14 田间试验

Fig.14 Field test

表 7 田间试验结果
Table 7 Field test results

导种装置 Seed guiding device	$\delta_1/\%$			$\delta_2/\%$		
	150 kg·hm ⁻²	300 kg·hm ⁻²	450 kg·hm ⁻²	150 kg·hm ⁻²	300 kg·hm ⁻²	450 kg·hm ⁻²
平面底板 Flat plate	11.35	10.32	8.45	44.92	42.18	41.97
弧面底板 Curved bottom plate	9.15	8.87	7.91	38.32	37.64	37.48
波浪底板 Wavy plate	6.24	6.15	5.48	25.41	24.35	23.74
斜面底板 Beveled bottom plate	3.15	2.65	2.75	14.71	12.28	13.13

由表 7 可知, 与其他 3 种宽条带导种装置相比, 所设计的导种装置的各行排量一致性变异系数最低下降了 2.73 个百分点, 行内横向均匀度变异系数最低下降了 10.61 个百分点; 各播量下斜面底板型导种装置各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数均最小, 各行排量一致性变异系数在 2.0%~4.0% 范围内波动, 行内横向均匀度变异系数在 14%~16% 范围内波动, 作业稳定性较高, 与台架试验和仿真结果的误差均不超过 5%, 满足设计要求。

5 结 论

1) 为解决稻茬田小麦机械化带状播种时受黏重土壤与秸秆还田耦合作用制约存在导种装置壅堵导致断条的问题, 设计了一种非触土播种小麦分引组合式双行宽条带导种装置, 阐述了导种装置的工作原理, 构建了小麦在分种和引种过程的力学模型, 理论分析了影响导种均匀性的关键要素。

2) 应用 EDEM 离散元仿真, 通过单因素和正交试验, 建立了球面弹籽部件直径和斜面坡度与分引组合式导种装置各行排量一致性变异系数和行内横向均匀度变异系数的二次回归数学模型, 分析了各因素对各评价指标的影响, 得出较优参数组合为球面弹籽部件直径 40 mm, 斜面坡度 10°, 并在该参数组合下开展 3 种播量仿真试验, 在播量 450 kg/hm² 下, 播种效果最佳, 各行排量一致性变异系数为 2.92%, 行内横向均匀度变异系数为 14.19%, 导种装置可有效实现均匀分种及行内均匀播种。

3) 通过台架试验验证优参数组合下不同播量的播种性能, 试验表明斜面底板型导种装置的平均各行排量一致性变异系数为 2.31%, 平均行内横向均匀度变异系数为 14.21%; 田间试验表明, 不同播量下, 斜面底板型导种装置的各行排量一致性变异系数均在 2.0%~4.0%, 行内横向均匀度变异系数均在 14%~16% 范围内, 与仿真和台架试验结果误差误差不超过 5%, 满足小麦宽条带种植农艺要求。

【参 考 文 献】

- [1] 佟光霁, 周伦政. 双循环背景下我国粮食安全、现状、挑战及保障路径 [J]. 学术交流, 2021 (1): 97-108.
- [2] 李福建, 徐东忆, 吴鹏, 等. 机械耕作和播种方式对稻茬小麦光合作用和产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 41-49.
LI Fujian, XU Dongyi, WU Peng, et al. Effects of mechanical

- tillage and sowing on photosynthetic production and yield of rice stubble and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵淑红, 谭贺文, 王加一, 等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58-67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and test of multi-functional integrated seeding trencher [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘彩玲, 魏丹, 都鑫, 等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 75-84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wheeled wheat precision seeder with wide seedling with hook type socket eye [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)
- [5] 余松烈. 冬小麦精播高产栽培 [J]. 山东农学院学报, 1980(2): 1-13.
- [6] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1-14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82-90.
WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82-90. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
LIU Quanwei. Design and Experiment of Seed Precise Delivery Mechanism for High-speed Planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈晨. 精量播种机带式导种装置结构设计及性能试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
CHEN Chen. Structure Design and pErformance Test Research of the Belt Seed Guide Device of Precision Planter [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘建英, 张鹏举, 刘飞, 等. 离散元模拟导种管高度对排种性能的影响 [J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 12-16.
LIU Jianying, ZHANG Pengju, LIU Fei, et al. The discrete element simulation guide tube height effects on seeding performance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 12-16. (in Chinese with English abstract)
- [11] ENDRERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(2): 177-184.
- [12] 余佳佳, 丁幼春, 廖宜涛, 等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析 [J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 103-108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed

- photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [13] 祁兵, 张东兴, 崔涛, 等. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 8-15.
QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [14] ED precision air seeder[EB/OL]. (2020-08-10). <http://www.amazone.net/1262>.
- [15] RAJENDER S C, RAMESH K S, MAHESH K G, et al. Effects of crop establishment techniques on weeds and rice yield[J]. Crop Protection, 2014, 64(3): 7-12.
- [16] VADERSTAD A B. Zone 3-seed placement[EB/OL]. (2020-08-10). <http://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/tempor-12-18>.
- [17] JI J, SANG Y, HE Z, et al. Designing an intelligent monitoring system for corn seeding by machine vision and Genetic Algorithm-optimized back propagation algorithm under precision positioning[J]. Plos One, 2021, 16(7): 254-544.
- [18] 康建明, 温浩军, 王士国, 等. 带式导种装置对排种均匀性影响的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 42-45.
KANG Jianming, WEN Haojun, WANG Shiguo, et al. Experimental study on impact of belt type conductor delivery on seeding uniformity[J]. Journal of China Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈玉龙, 韩杰, 兰玉彬, 等. 精密排种器组合式导种管设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 14-24.
CHEN Yulong, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Design and experiment of the combined seed guiding tube for precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 14-24. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张顺, 李勇, 王浩宇, 等. 水稻内充气力式精量穴播排种器导种管的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 71-80.
ZHANG Shun, LI Yong, WANG Haoyu, et al. Design and experiment on the seed spout of inside-filling pneumatic type precision hole-seeding meter device for rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(1): 71-80. (in Chinese with English abstract)
- [22] YAZGI A. Effect of seed tubes on corn planter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(26): 73-89.
- [23] KOCHER M F, COLEMAN J M, SMITH J A, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(2): 177-183.
- [24] TANG H, XU F D, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107555.
- [25] LIU R, LIU L J, LI Y J, et al. Numerical simulation of seed-movement characteristics in new maize delivery device[J]. Agriculture, 2022, 12: 1944.
- [26] 黄小毛, 张顺, 朱耀宗, 等. 气送式油菜飞播装置投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 31-41.
HUANG Xiaomao, ZHANG Shun, ZHU Yaozong, et al. Seeding process analysis and test of the air conveying rapeseed aerial seeding device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 31-41. (in Chinese with English abstract)
- [27] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 16-26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(12): 16-26. (in Chinese with English abstract)
- [28] 于佳杨, 卢彩云, 卫如雪, 等. 基于离散元法的小麦精量排种器性能模拟试验[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8): 225-228.
YU Jiayang, LU Caiyun, WEI Ruxue, et al. Simulation test of performance of wheat precision seed-metering device based on discrete element method[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 225-228. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李兆东, 王晴晴, 张亚兰, 等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 116-124.
LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and test of inclined parabolic hole wheel wheat feeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116-124. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 247-253. (in Chinese with English abstract)
- [31] 朱惠斌, 吴宪, 白丽珍, 等. 基于 EDEM-ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10-22.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of biaxial no-till device for rice stubble breaking based on EDEM-ADAMS simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 10-22. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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 and seeding performance test of seeding device for combined air-delivered collector for rapeseed wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 26-34. (in Chinese with English abstract)

Design and test of the separate and combined double row wide strip seed guiding device for wheat

HAN Jianfeng^{1,3}, DU Juanhui¹, GU Xin¹, LIU Lichao^{1,2}, LI Zhaodong^{1,2*}, LIU Chao⁴

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China; 3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Anhui Hongxiang Agricultural Machinery Limited Company, Maanshan 238100, China)

Abstract: Aiming at the problem that mechanized strip sowing of wheat in rice stubble fields can be constrained to the coupling effect of clay-heavy soil and straw return to the field. The seed guide device can be blocked to cause the breakage. In this study, a double-row wide strip seed introduction device was designed to combine with the spherical collision seed part, in order to evenly divide the falling population left and right during introduction. The broadband introduction of the diverted population was also carried out with the help of beveled bottom plate slope. The mechanical model of wheat seeding and introduction was established using particle kinematics. A systematic investigation was implemented to clarify the influencing mechanism of the spherical collision seed part diameter and beveled bottom plate slope on the uniformity of seed introduction. EDEM software was then used to optimize the key structural parameters of the wheat seed introduction device. Among them, the spherical collision seed part diameter and beveled bottom plate slope were taken as the test factors. The evaluation indexes were taken as the coefficient of variation of each row seeding quantity consistency and coefficient of variation of transverse uniformity in row. The test data was obtained to combine the univariate and quadratic orthogonal rotation. Design-Expert software was also selected to perform the regression analysis on experimental data. The regression equation was established between the test factors and indicators. The results show that the spherical collision seed part diameter posed a significant coefficient of variation of each row seeding quantity consistency, whereas, the beveled bottom plate slope was some impact on the coefficient of variation of transverse uniformity in row. The optimal structural parameters were achieved in the seed guiding device spherical collision seed part diameter of 40mm, and the beveled bottom plate slope of 10°. The beveled bottom plate guide device was evaluated under optimal structural parameters. Three types (flat plate, curved bottom plate, wavy plate) of seed guide devices were selected to compare under the three sowing amounts. The simulation results show that the coefficient of variation of each row seeding quantity consistency and coefficient of variation of transverse uniformity in row were ranked in the descending order: flat plate, curved bottom plate, wavy plate, beveled bottom plate. The optimal coefficient of variation of each row seeding quantity consistency was 2.92% of the beveled bottom plate-type seed guiding device. The coefficient of variation of transverse uniformity was 14.19% in the row. The bench and field tests were combined to further verify the smallest coefficient of variation of each row seeding quantity consistency and coefficient of variation of transverse uniformity in row of the beveled bottom plate seed guiding device. Specifically, the mean coefficient of variation of each row seeding quantity consistency was 2.31%, whereas, the mean coefficient of variation of transverse uniformity in row was 14.21%. The field experimental results showed that coefficient of variation of each row seeding quantity consistency decreased by at least 2.73 percentage points, and the coefficient of variation of transverse uniformity in row decreased by at least 10.61 percentage points, compared with the other three types of seed guide devices. The error was not more than 5% between the actual and the simulation. Therefore, it was reliable for the optimized structural parameters of the split-citation combined wide strip guide device using the discrete element method. At the same time, the national technical specifications were fully met for the quality evaluation of seeders and the agronomic requirements for field seeding. The findings can provide a strong reference for the optimal design of wheat wide strip seed introduction device under a rice stubble clay loam environment.

Keywords: agricultural machinery; test; wheat; seed guiding device; wide strips ; EDEM