doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.017

铺料式排种器试验台设计与验证

尚书旗　常学良　张　宁　何晓宁　李墨贤　王东伟
（青岛农业大学机电工程学院，青岛 266109）

摘要：针对试验台检测排种器时未考虑种子触土偏移，导致检测结果理想化的问题，设计了一款铺料式排种器试验台。论证了试验台检测机理与地轮驱动式播种机排种机理之间的差异以及播种机所排种子残余速度的形成机理，推导出播种机残余速度的计算公式，并计算出工作速度为 2.12 km/h 的花生分层施肥旋耕起垄播种机残余速度为 0.25 ~ 0.42 m/s。使用 EDEM 软件进行仿真分析，并记录球型种子与具有各向异性种子（以花生为例）在投种高度 10 ~ 20 cm、残余速度 0 ~ 0.42 m/s 以及 30 种触土方式时的偏移距离与坠入深度，结果表明：种子坠入深度越大，偏移距离越小；残余速度一定、投种高度过低时，种子的坠入深度较小、偏移距离较大；投种高度越大、残余速度越小时，种子坠入深度越大、偏移距离越小；角速度与残余速度的特定组合可以减少种子偏移距离。使用本试验台对旋耕播种机的排种器进行中心组合试验，得到该排种器在工作速度为 2 km/h、投种高度为 15 cm、残余速度为 0.21 m/s 时作业效果最好，作业合格率达到 87%。田间试验结果表明：工作速度为 2.12 km/h、投种高度为 15 cm 时作业效果最好，粒距合格率达到 84%，证明所设计试验台可以准确检测排种器排种合格率并探究其最佳工作参数。

关键词：排种器；试验台；种料分离装置；零速投种；非零速投种；铺料式
中图分类号：S237　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)04-0186-16　　**OSID**：

Design and Verification of Material-laying Seed Meter Test Bench

SHANG Shuqi　CHANG Xueliang　ZHANG Ning　HE Xiaoning　LI Moxian　WANG Dongwei
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: In order to solve the issue of idealized test results caused by not considering seed-to-soil contact displacement during the testing of seed meters, a material-laying seed meter test bench was designed. The differences between the detection mechanism of testing bench and working mechanism of ground wheel-driven planter and formation mechanism of residual speed of seeds discharged by seed meters were demonstrated. The formula for the calculation of residual speed of seed spreader was derived, and the residual speed of peanut stratified fertilizer rotary tilling and ridging seed spreader with operating speed of 2.12 km/h was calculated to be about 0.25 ~ 0.42 m/s. The simulation was carried out by using the EDEM software and the offset distance and falling depth of spherical and non-spherical seeds (taking peanut as example) at 10 ~ 20 cm casting height, 0 ~ 0.42 m/s residual speed, and 30 ways of touching the soil showed that the larger the falling depth of the seeds was, the smaller the offset distance was; the lower the casting height was, the smaller the falling depth of seeds would be, but the offset distance would be larger; the larger the casting height was, the smaller the residual speed, the greater the falling depth and the smaller the offset distance would be; the specific combination of angular velocity and residual speed can reduce the offset distance of the seed. Using this testing bench to carry out the central combination test on the seed meter, it was got that this seed meter had the best operation effect when the working speed was 2 km/h, the seed casting height was 15 cm, and the residual speed was 0.21 m/s, and it reached 87% of the operation qualification rate. The results of field test showed that the best operation effect was achieved when the working speed was 2.12 km/h and the seeding height was

收稿日期：2024 - 03 - 11　修回日期：2024 - 06 - 08
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2300100)和山东省重点研发计划-山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY202104)
作者简介：尚书旗(1958—)，男，教授，博士生导师，主要从事根茎类作物生产机械装备研究，E-mail：sqshang@qau.edu.cn
通信作者：王东伟(1981—)，男，教授，博士生导师，主要从事根茎类作物智能农业装备研究，E-mail：w88030661@163.com

15 cm, and the qualified rate of seed spacing reached 84%, which proved that this testing bench can accurately detect the qualified rate of the seed meters and explore its optimal working parameters.

Key words: seed meter; testing bench; seed and material separation; zero-speed seeding; non-zero-speed seeding; material-laying

0　引言

排种器被广泛用于农作物的播种环节,其排种性能与工作性能直接影响大田作物的播种质量与育种试验效果。因此,排种器在投入使用前需要进行性能检测[1-3],排种器试验台被科研机构普遍用于排种器的研发[4]。

根据检测方式的不同,目前国内用于排种器性能检测的试验台可以分为在输送带上进行检测与在排种器排种口处进行检测两种。两种试验台均为根据排种器所排种子间距与理论间距对比,计算得到排种器的性能参数。然而,在输送带处进行检测的试验台,种子掉落在输送带上即被固定,忽略了土壤的缓冲特性[5-7],即在零速或非零速排种时种子触土后产生偏移距离的现象。在排种器处进行检测的试验台可以准确检测排种器排出种子的间隔距离,但不能探究排种器投种高度、角度等工作参数,且忽略了种子与土壤接触后静止时的间隔距离。因此,上述两种试验台检测的为排种器的排种均匀性,造成排种器检测结果与田间的作业效果偏差较大。

基于以上问题,本文设计一款可以探究种子与物料交互规律的铺料式排种器试验台。通过对试验台的检测机理与播种机的播种机理进行分析与对比,探明种子排出时水平残余速度的形成机理,进一步推导出特定播种机所排种子水平残余速度的求解公式。使用光栅传感器记录排种器排种信息,由 PLC 对排种数据进行记录与计算得到排种器的工作性能参数。使用物料模拟土壤颗粒,探究排种器在不同投种高度、残余速度等工作参数时种子的触料偏移情况,得到能够发挥出排种器最佳工作性能的工作参数。最后通过台架检测与田间试验,验证本试验台对排种器最佳工作参数的测定能力。

1　试验台构成与工作原理

1.1　试验台构成

试验台主要由台架、驱动装置、传动装置、排种器安装架、输送带、控制箱、检测装置及工作台组成,如图 1 所示。台架下方安装有 12 个均匀分布的减震调平垫铁,用于调整试验台的水平面与吸收工作时产生的震动。排种器驱动电机、输送带驱动电机、提供正负两种风压的双段式风机、物料箱和种料分离装置分别通过螺栓螺母连接紧固在台架的特定位置。排种器安装架用于固定待检测排种器,可以相对于台架进行平移来适应不同尺寸的排种器以及调整排种器的工作参数,必要时还可以在排种器安装架上端安装供种装置。用于试验的物料装于物料箱内,堆积在输送带一端的上表面。种料分离装置安装在输送带的另一端,将种子与物料进行分离并回收。输送带为两侧设有裙边的阶梯型表面,由其两端的托辊、两侧的流利条以及台架进行定位、支撑与限位,并由张紧轴承座进行张紧。控制箱外置 HMI 触摸屏、控制按钮及信号指示灯,内部装有控制元件及连接导线,如 PLC、变频器等。检测装置包括扭矩传感器、光栅传感器及气压传感器。扭矩传感器用于检测排种器驱动电机传至排种器转轴的扭矩与转速。光栅传感器安装于排种器落种口下方,用于检测种子的掉落信息。两个气压传感器的检测端分别与双段式风机的进气管和出气管相连,用于检测风机提供的风压。

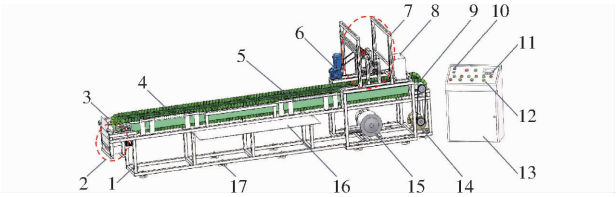


图 1　试验台结构示意图

Fig. 1　Composition of testing bench

1. 台架　2. 种料分离装置　3. 输送带张紧轴承座　4. 裙边　5. 流利条　6. 排种器驱动电机　7. 排种器安装架　8. 物料箱　9. 输送带主动托辊　10. 气压传感器　11. HMI 触摸屏　12. 控制按钮　13. 控制箱　14. 输送带驱动电机　15. 双段式风机　16. 工作台　17. 减震调平垫铁

试验台排种器驱动电机、输送带驱动电机、双段式风机及各自对应变频器工作电压均为 AC 380 V,控制硬件 S7 - 1200PLC 的工作电压为 AC 220 V,HMI 触摸屏、光栅传感器、扭矩传感器、气压传感器及信号灯工作电压均为 DC 24 V。试验台的供电线路、信号传递路线及动力传递路线如图 2 所示。图 2 中红色线条、蓝色线条、黑色实线、黄色虚线分别表示供电路线、信号传输路线、传动路线和检测信号。

1.2　试验台硬件型号及工作原理

选用西门子 S7 - 1200 1214AC/DC/RLY 款 PLC 作为核心控制元件[8]。如图 3 所示,试验台可以通

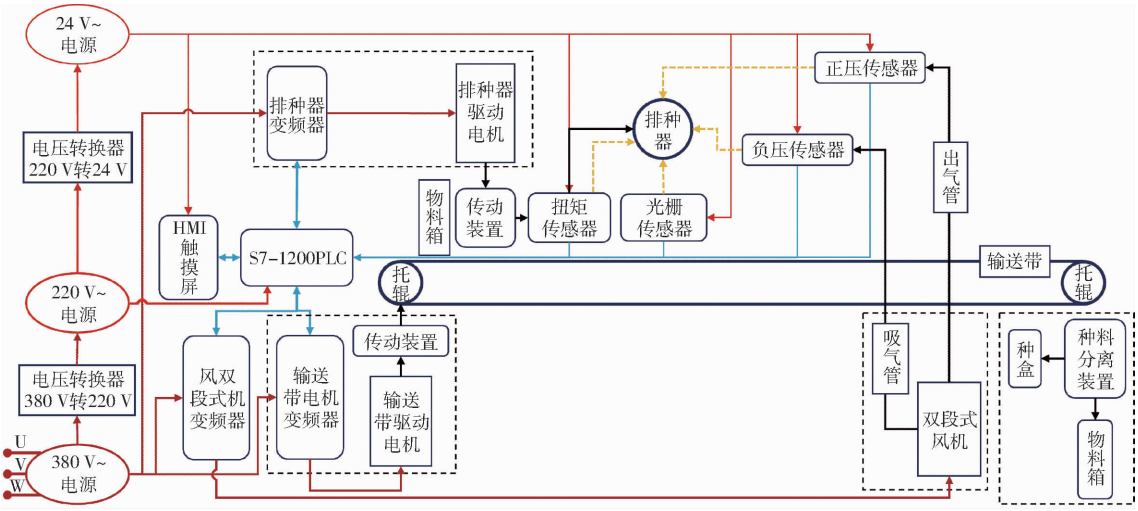


图 2 试验台线路连接方式示意图

Fig. 2 Testing bench line connection method

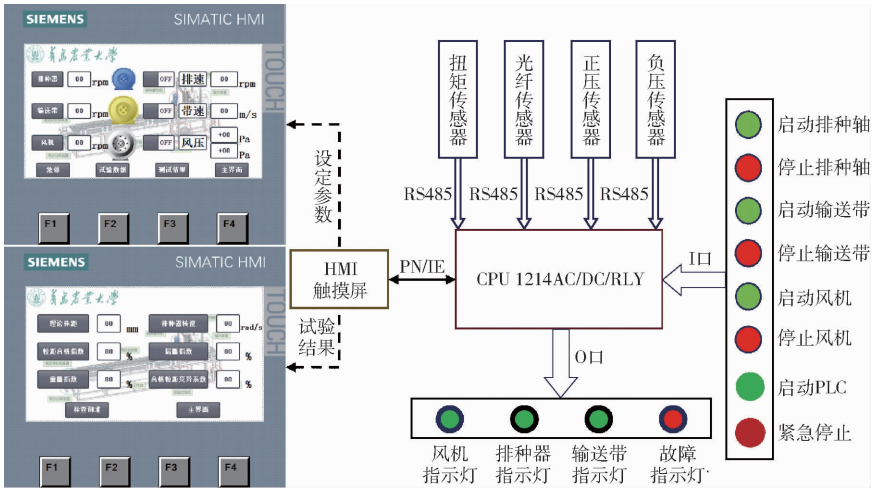


图 3 试验台控制按钮及操作界面

Fig. 3 Control buttons and operation interface of testing bench

过 KTP－400 型 HMI 触摸屏进行控制，也可以通过控制箱外置的按钮进行控制。排种器驱动电机、输送带驱动电机以及双段式风机的变频器均为西门子 V20 变频器，且均通过 RS485 通讯协议与 PLC 进行通讯。试验台工作时，PLC 通过 RS485 通讯模块调节变频器的频率进而分别改变排种器驱动电机、输送带驱动电机及双段式风机的转速。HMI 触摸屏通过网线与 PLC 的 PN/IE 口相连进行通讯。控制按钮与指示灯分别与 PLC 的 I/O 口相连。选用肯森斯 C30－032025D 型光栅传感器记录排种器落种口处种子的掉落信息，该型号光栅传感器为对射式，最小检测距离为 2.5 mm，响应时间小于 3.3 ms。光栅传感器安装于排种器落种口的下方，种子经过光栅时由于遮挡对射光轴而被检测到，检测信号通过 RS485 通讯模块传至 PLC。选用大洋动态扭矩传感器（检测范围 0 ~ 100 N）检测排种器转轴的转速和扭矩。双段式风机的出风口和进风口分别装有 NPN 型 RS485 通讯气压表，分别用于检测输入排种器的正负气压。

本试验台适用于机械式与气力式排种器，如勺轮式排种器、槽轮式排种器、指夹式排种器、气吸式排种器等。试验前需要在 HMI 触摸屏的参数设定界面输入输送带转速、排种器转速、排种器理论株距，并根据需要选择是否启动风机并设置相应的工作参数，参数设定界面如图 3 所示。试验开始后，光栅传感器将种子经过时的信号传输给 PLC，PLC 根据收到的数据信息从 1 开始逐一编号，并记录对应时间 $t_1, t_2, \cdots, t_{i+1}$，第 i 个种子与下一种子被检测到的落种间隔时间为两个种子对应检测时间的差值 $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$。根据输送带前进速度 v，得到相邻种子的检测株距为 $X_i = v\Delta t_i$。根据 JB/T 10293—2013《单粒（精密）播种机技术条件》设定的方法，使用 TIA Portal V16 软件编译被检测排种器的粒距合格指数、重播指数、漏播指数和合格粒距变异系数的计算程序。设定测定 5 组连续数据，每组数据测定 10 个种子之间的粒距，PLC 根据记录的检测数据与输

入的理论株距进行计算，得到排种器在特定排种速度、种箱高度、风压或更换其特定结构等仅与排种器自身结构有关的粒距合格指数、重播指数、漏播指数、合格粒距变异系数等排种器性能参数。HMI 触摸屏显示的试验结果界面如图 3 所示，查看排种器的测试结果。根据所得参数对排种器结构进行必要的优化，具体工作流程如图 4 所示。

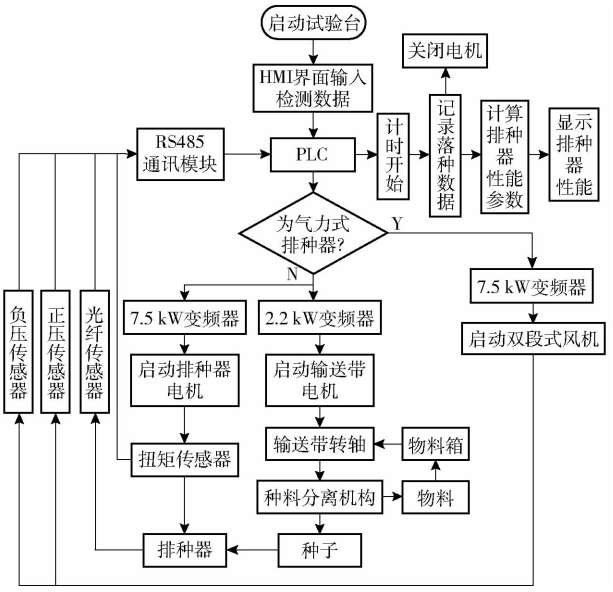


图 4　试验台工作流程图

Fig. 4　Workflow diagram of testing bench

在输送带的物料表面上可以观察并检测到排种器所排种子在特定输送带前进速度（见下文播种机前进速度）、排种器落种高度、排种器落种角度及物料类型等工作条件时的粒距合格率以及种子触及物料后偏移的情况。将输送带上物料表面测量所得种子的粒距合格率与试验台检测所得粒距合格率进行对比，可得到当前排种器的工作参数是否抑制排种器本身的排种性能，进而得到最佳的工作参数。

2　关键部件设计与检测机理分析

2.1　试验台关键部件设计

2.1.1　排种器驱动、固定及检测装置

排种器通过三欧牌 K01－80B 微型三爪自定心卡盘进行轴向定位，可适应转轴直径为 2～37 mm 的排种器。如图 5 所示，通过调整固定架位置改变排种器投种高度，转轴高度调节范围为 260～530 mm。

排种器电机输出扭矩经由链条传至扭矩传感器输入端，并从扭矩传感器输出端由微型三爪卡盘传至排种器的转轴。如需添加配套的供种装置，可将其固定在供种装置固定架上，排种器转轴固定架与供种装置固定架可作相对于台架的水平与竖直方向平移，对待检测装置具有较好的适应性。

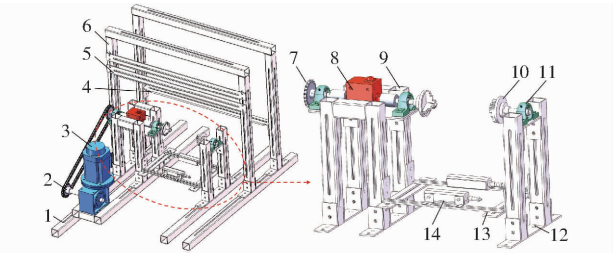


图 5　排种器驱动、固定及检测装置

Fig. 5　Driving, fixing and detecting devices for seed meters

1. 台架　2. 主动齿轮　3. 排种器驱动电机　4. 水平固定杆　5. 竖直固定杆　6. 供种装置固定架　7. 微型三爪卡盘　8. 扭矩传感器　9. 排种器转轴固定架　10. 从动齿轮　11. 三爪卡盘轴承座　12. 固定架连接件　13. 光栅传感器固定架　14. 光栅传感器

2.1.2　物料输送装置

输送带由两端托辊以及台架支撑，主动托辊由输送带驱动电机驱动进而带动输送带转动，调节张紧轴承座可以增大托辊与输送带之间的摩擦力，物料输送装置具体结构如图 6 所示。

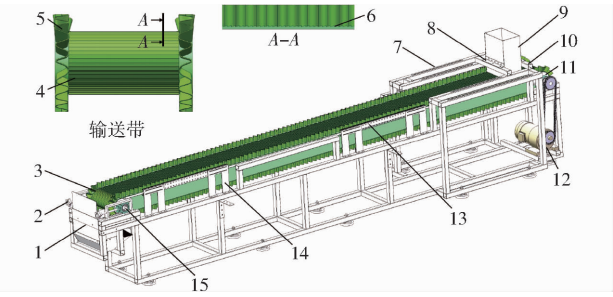


图 6　物料输送装置结构示意图

Fig. 6　Schematic of material spreading device

1. 种料分离装置　2. 输送带张紧轴承座　3. 输送带　4. 输送带表面　5. 裙边　6. 输送带截面　7. 台架　8. 物料箱固定座　9. 物料箱　10. 物料箱支撑架　11. 主动托辊　12. 输送带驱动电机　13. 流利条　14. 流利条支撑座　15. 从动托辊

本试验台采用铺料原理，物料箱置于输送带上方，且由固定座进行上下调节与固定，使物料层厚度在 10～30 cm 之间。为确保输送带铺料均匀、增大输送带对物料的携带能力，将输送带表面设计为阶梯结构。输送带梯形带宽度 32 cm、高度 3 mm，两侧裙边宽度均为 4 cm、高度均为 5 cm，形成物料边界。工作时料箱内物料被梯形截面携带向前，并在试验台尾端与种子一并喂入种料分离装置进行物料分离与回收。

2.1.3　排种器检测速度

排种器驱动电机、输送带驱动电机与双段式风机的工作电压均为 380 V，额定功率分别为 0.75、2.2、7.5 kW，是试验台的主要动力来源。排种器电机与输送带电机分别配备减速比为 7.5、3 的减速箱，转速分别为 1 380、500 r/min。双段式风机可以

提供正负两种风压,最大流量为 320 m^3/h、额定真空为 -44 kPa、额定压力为 57 kPa。控制 3 个电机的变频器可实现试验台对排种器播种转速、前进速度以及工作所需风压的调控。

输出齿轮与输送带主动托辊之间的传动比为 1,令输送带表面与转动中心的距离为 S、输送带厚度为 e、主动托辊半径为 r、输送带最大线速度为 v_{max},则输送带驱动电机输出转速 n 应满足

$$n=\frac{v_{max}}{2\pi S}=\frac{v_{max}}{2\pi(e+r)} \tag{1}$$

现已知 $n=500$ r/min,$e=0.005$ m,$r=0.08$ m,求得输送带最高线速度 $v_{max}=266.9$ m/min ≈ 16 km/h。由转速与线速度之间的关系可知,排种器转轴需要达到的转速 n_1 为

$$n_1=\frac{v_{max}}{2\pi R} \tag{2}$$

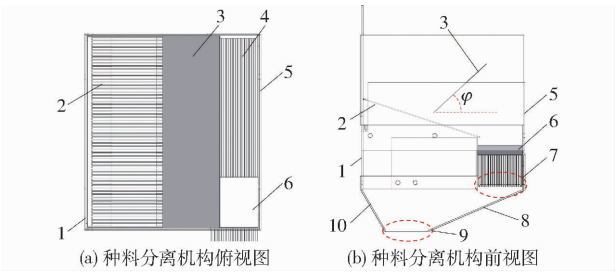
式中 R——待检测排种器种子转动半径,m

通过对现有排种器相关研究的整理与实际测量可知,内充种式、气力式、窝眼轮式等较为常见排种器携种半径范围为 0.1 ~ 0.15 m。取最小半径 $R_{min}=0.1$ m,计算得所需最大转速为 425 r/min。由于本试验台排种器电机选用 0.75 kW 的 RV 立式电机,配备减速比为 7.5 的 NMRV 减速器,排种器电机输出端最大转速为 184 r/min,取传动比为 2∶5的链条进行升速,排种器转轴最高转速为 460 r/min,达到使用要求。根据文献[9 - 10]可知,目前我国播种机高速作业速度范围为 8 ~ 16 km/h,中低速作业速度范围为 3.2 ~ 8.0 km/h。故本试验台可满足对工作速度为 16 km/h 及以下排种器的性能检测。

2.1.4 种料分离装置设计与仿真

据调查可知一般砂料粒径为 0.5 ~ 2.0 mm[11],设计筛网之间的距离均为 5 mm。如图 7 所示,种料分离装置的 3 个挡料板起到对种料进行减速与引导的作用,两个过滤筛用于将物料筛掉留下种子。种料进入分离装置后从一级过滤筛到二级过滤筛经过 3 次减速,实现种料分离,其中二级挡料板可以根据种料流层的方向调整水平角度 φ。

种料离开输送带时具有与输送带相同的水平初速度,并在重力的作用下进入种料分离装置。物料层被输送带送出后首先撞击在挡料板上形成二级流层,二级流层经一级筛网筛除后形成三级流层,三级流层在二级筛网上过滤,二级过滤筛的筛条方向与一级过滤筛的筛条方向垂直以便筛去滑落的物料颗粒,剩余的种子从出种口流出,筛掉的物料被接料板汇集入出料口。物料层速度较大时撞击在一级挡料板上,速度较小时撞击在二级挡料板上,调整二级挡料板的倾斜角度可以控制物料颗粒的流向。



(a) 种料分离机构俯视图 (b) 种料分离机构前视图

图 7 种料分离装置

Fig. 7 Device for separating seeds and materials

1. 一级挡料板 2. 一级过滤筛 3. 二级挡料板 4. 二级过滤筛 5. 侧边挡料板 6. 三级挡料板 7. 出种口 8. 二级接料板 9. 出料口 10. 一级接料板

为避免出现试验过程中种料分离装置堵塞或种料混杂的现象,使用 EDEM 软件对种料分离过程进行仿真,以此检验物料分离装置的作业效果。由于粘性土壤本身的附着力较强[12],种子触土移动阻力较大,砂性土壤的粘结性、粘着性较小,适宜进行种料分离。故本研究主要以砂性土壤为对象,对排种器性能检测与工作参数展开研究。我国种植于砂质土壤的主要农作物有大豆、花生、玉米、油莎豆等。EDEM 中的参数设定参照砂土[13]、大豆[14]、花生[15]、玉米[16-17]、油莎豆[18-19]相关研究的特性参数、接触参数及离散元模型建立方法,各材料特性参数与接触参数如表 1、2 所示。

表 1 种子、砂土及铸铁特性参数

Tab. 1 Characterization parameters of seeds, sandy soils and cast iron

材料	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa
砂土	1 950	0.25	2.73×10^6
铸铁	7 850	0.3	7.92×10^{10}
花生	1 000	0.315	5.72×10^7
大豆	1 257	0.4	7.60×10^8
玉米	1 263	0.4	1.30×10^8
油莎豆	1 186	0.37	7.59×10^7

表 2 种子、砂土及铸铁接触参数

Tab. 2 Contact parameters for seeds, sand and cast iron

项目	静摩擦因数	动摩擦因数	碰撞恢复系数
花生-铸铁	0.1	0.02	0.5
花生-土壤	0.3	0.01	0.25
大豆-铸铁	0.1	0.11	0.486
大豆-土壤	0.254	0.011	0.75
玉米-铸铁	0.44	0.03	0.55
玉米-土壤	0.17	0.05	0.7
油莎豆-铸铁	0.48	0.174	0.42
油莎豆-土壤	0.55	0.15	0.43
土壤-土壤	0.3	0.01	0.25
土壤-铸铁	0.5	0.03	0.3

EDEM 中的接触模型[13]选用 Hertz－Mindlin with JKR，表面能为 0.5 J/m^2。土壤颗粒的粒径范围为 0.5～2.0 mm[11]，3 种土壤颗粒模型球状、杆状、三角状占比为 3∶1∶1[13]，如图 8 所示。花生、大豆、油莎豆、玉米种子模型对应的品种分别为豫花 22、绥农 42、中油莎 1 号、良玉 99，离散元模型如图 9 所示。



图 8　砂土离散元颗粒模型

Fig. 8　Three discrete element particle models for sandy soils

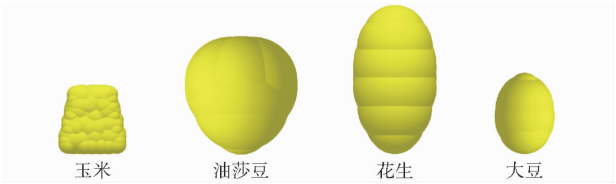


图 9　种子离散元模型

Fig. 9　Discrete element model of seeds

导入种料分离装置模型，并在种料分离装置落料处设定出料层和落种层以及种盒与物料盒。分别设置物料与种子颗粒在输送带移动方向初速度为 16 km/h(≈4.445 m/s)与 3.2 km/h(≈0.889 m/s)。分别对花生、大豆、玉米、油莎豆进行种料分离仿真，以花生为例，种子与物料的分离仿真结果如图 10 所示，调整二级挡板的角度可适应不同喂入速度的种料分离。

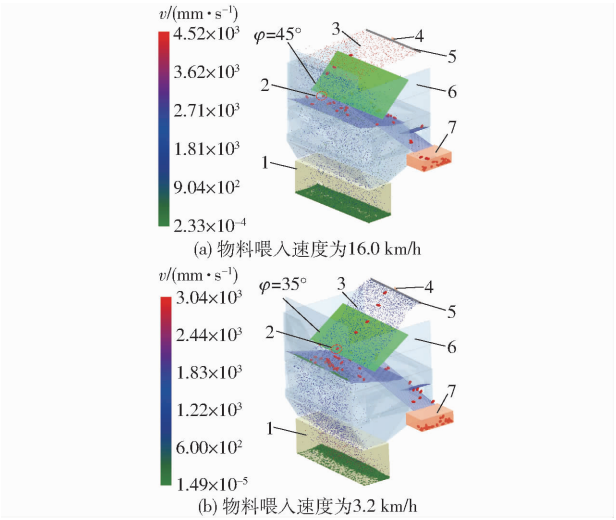


图 10　种子与物料分离仿真结果

Fig. 10　Simulation of seed and material separation process

1. 物料盒　2. 种子　3. 土壤颗粒　4. 种子生成处　5. 物料颗粒生成处　6. 物料分离装置　7. 种盒

由仿真结果可知：物料层速度为 3.2 km/h 时，种盒内物料颗粒数量为 0；物料层速度为 16 km/h 时，仿真检测时间为 3 s，喂入种料分离装置的种料在输送带上的铺放长度约为 15 m，种盒内部物料颗粒数量为 3 个，与生成物料颗粒总数量之比不足 0.01%，对种料分离效果影响可以忽略，本装置对种料分离效果较好。

2.2　试验台检测机理与播种机排种机理分析

2.2.1　试验台检测机理分析

本试验台排种器转轴中心与输送带表面距离 H 可调控范围为 0.26～0.53 m。如图 11 所示，假定种子被排种器携带时转动半径为 R_1（下文称携种半径）、作物理论株距为 L、输送带角速度为 ω、排种器角速度为 ω_1、种子从排种器排出时的水平速度为 v_1、种子从排种器排出后下落高度为 h。

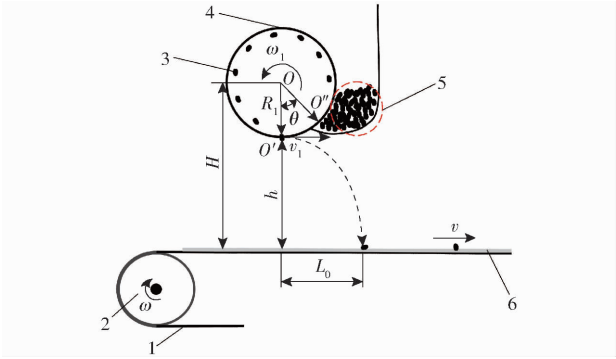


图 11　种子在试验台上的掉落轨迹

Fig. 11　Plot of seed drop trajectory on testing bench

1. 输送带　2. 主动托辊　3. 携种点　4. 排种盘　5. 种腔　6. 物料层

基于零速排种原理，种子在排出时有且仅有与输送带相同的水平速度，并在重力的作用下落在输送带的表面，落种高度决定了种子掉落在输送带上的间隔时间，进而决定了种子在输送带上的间隔距离。

若种盘均匀分布有 N 个携种点，则相邻种位之间的圆心角为 $\theta=2\pi/N$，进一步地种子从排种器排出的间隔时间与掉落在输送带上的间隔时间相同，即

$$\Delta t=\frac{\theta}{\omega_1}=\frac{2\pi}{N\omega_1} \tag{3}$$

基于零速投种原理，排种器角速度与输送带线速度应满足

$$\omega_1=\frac{v}{R_1} \tag{4}$$

联立式(3)、(4)可得输送带上掉落种子的间隔距离 L_0 为

$$L_0=v\Delta t=\frac{2\pi}{N\omega_1}\omega_1 R_1=\frac{2\pi R_1}{N} \tag{5}$$

综上，在试验台上检测时，为避免种子掉落在输

送带上时发生不可预测的弹跳，大多在零速投种原理的条件下进行检测，此时排种器的株距与携种半径成正比，与携种点数量成反比。

2.2.2 播种机排种机理分析

实际田间播种作业中，排种器转轴主要依靠播种机的地轮驱动，如图 12 所示，驱动地轮线速度与播种机前进速度 v_0 近似相等，排种器转轴与地轮之间存在确定的传动比关系。

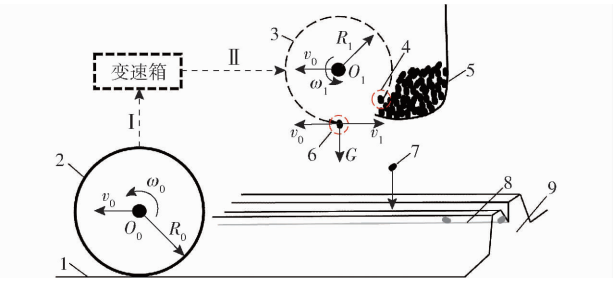


图 12 地轮式播种机等速排种机理示意图

Fig. 12 Zero-speed seed discharge mechanism for planters

1. 地面 2. 播种机驱动地轮 3. 排种器携种轨迹 4. 携种点 5. 种腔 6. 落种点 7. 种子 8. 垄沟 9. 垄截面

根据线速度与角速度的关系，可得驱动地轮与排种器之间传动比 i 的关系式为

$$i=\frac{\omega_0}{\omega_1}=\frac{v_0R_1}{v_1R_0}=i_1i_2i_3<1 \tag{6}$$

式中 i_1——地轮与变速箱之间传动路线Ⅰ传动比

i_2——变速箱传动比

i_3——变速箱到排种器传动路线Ⅱ传动比

由于零速投种时排种器的残余速度为零，即保证 $v_1=v_0$，若播种机为零速投种，种子排出的时间间隔为 Δt_0，则其在地面上种子的株距可以表示为

$$L_1=v_0\Delta t_0=\frac{2\pi}{N\omega_1}\omega_0R_0=i\frac{2\pi R_0}{N}=\frac{2\pi R_1}{N} \tag{7}$$

排种器种子排出时水平残余速度 v'（下文称残余速度）可表示为

$$v'=v_1-v_0=R_1\omega_1-R_0\omega_0=v_0\left(\frac{R_1}{R_0i}-1\right)=0 \tag{8}$$

由式(8)可知，排种器排种产生残余速度的关键在于 $R_1\neq iR_0$。理论上改变传动比的同时反向调整地轮半径 R_0 或同向调整携种半径仍然可以保证零速投种的规则。然而，在实际田间作业时一般不会改变排种器的携种半径或者更换不同半径的地轮，往往仅调节变速器的挡位以此改变播种机的传动比，打破了零速投种的原则，导致种子排出时的水平速度与播种机前进的水平速度不能反向抵消，产生了残余水平速度，种子接触地面前做平抛运动，如图 13 所示，种子触土后将在土壤颗粒的缓冲下逐渐静止。若种子存在较大残余速度，将在触土的瞬间产生翻转力矩，进而发生不可预测的偏移，即种子的触土点不是静止点。

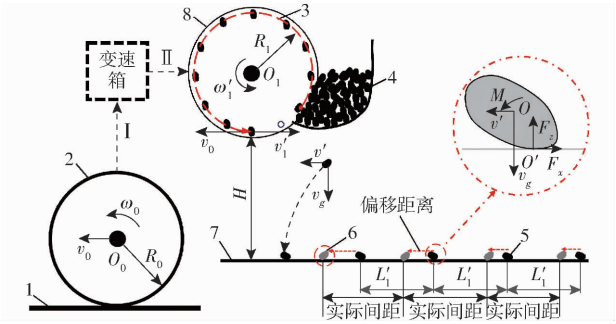


图 13 地轮式播种机有残余速度时排种机理示意图

Fig. 13 Mechanism of non-zero speed seed discharge in planters

1. 地面 2. 播种机驱动地轮 3. 排种器携种轨迹 4. 种子 5. 种子触土点 6. 种子静止点 7. 垄沟 8. 排种盘

当仅变速箱的传动比 i_2 改变时，播种机的传动比为 i'，排种器的转动角速度发生改变，种子排出的间隔时间也随之改变为 $\Delta t_0'$，在相同的工作速度下株距也改变。此时，排种器所排种子在地面上掉落点的距离为

$$L_1'=v_0\Delta t_0'=\frac{2\pi}{N\omega_1'}\omega_0R_0=i'\frac{2\pi R_0}{N} \tag{9}$$

由式(9)可知，当仅改变传动比时可以达到调整株距的目的，但会产生残余速度，种子触及土壤之后会与土壤发生相互作用产生偏移等现象。而当前存在的两类排种器试验台均以种子掉落点为采样点，试验结果趋于理想化，导致排种器的检测性能与实际工作性能之间具有差异性，需要通过田间试验进行多次调试才能得到最佳工作参数。本试验台设计的目的是提供一种可探究排种器实际田间作业工作参数的试验工具。排种器与输送带之间不必遵守零速投种规则，可根据种子在输送带上接触物料之后的偏移情况，确定排种器的最佳工作参数。

2.2.3 播种机残余速度形成机理及案例分析

假设地轮驱动式播种机由最低挡开始共计 j 个挡位，则由式(9)可知，播种机的各挡位与株距之间具有对应关系

$$\begin{cases}L_1=\dfrac{2\pi R_0}{N}i_{11}\\ L_2=\dfrac{2\pi R_0}{N}i_{12}\\ \vdots\\ L_j=\dfrac{2\pi R_0}{N}i_{ij}\end{cases} \tag{10}$$

式中 L_j——播种机对应的 j 挡位株距

i_{ij}——播种机变速器第 j 挡位传动比

则将式(10)代入式(8)，可以得到残余速度取值范围为

$$v_0 \min\left|\frac{2\pi R_1}{NL_j}-1\right| \leqslant v' \leqslant v_0 \max\left|\frac{2\pi R_1}{NL_j}-1\right| \tag{11}$$

为便于下文仿真验证及田间试验，本文以青岛万世丰农业科技有限公司研制的花生分层施肥旋耕起垄播种机[20]为研究对象。该播种机有 6 个挡位，株距范围为 0.1 ~ 0.2 m、工作速度为 2.14 km/h。播种机采用双腔勺轮式花生精密排种器，携种点数量为 14，携种半径为 0.13 m。根据式(11)计算得该播种机所播花生的最大残余速度与最小残余速度分别为：$v'_{\max}\approx 0.42$ m/s，$v'_{\min}\approx 0.25$ m/s。

3　种子触土方式及偏移距离与坠入深度分析

3.1　物料层临界厚度验证

土壤属于颗粒材料，而颗粒材料对冲击物体缓冲时存在一个临界缓冲厚度，若颗粒层的厚度小于临界厚度，冲击物体将击穿颗粒层并与支撑材料碰撞产生二次偏移，当颗粒层的厚度大于临界厚度时，冲击物体在颗粒层的坠入深度基本不变[21]。

输送带的阶梯型表面与平底相比增加了阶梯高度的物料厚度，故而仅需使用平底支撑验证物料铺放的厚度最低为 12 mm 时是否大于种子冲击的临界厚度。使用 EDEM 软件建立土仓，物料参数的设定与上文相同，分别进行花生、大豆、玉米、油莎豆在投种高度为 10、30 cm 时的自由掉落仿真试验，如图 14 所示。

在后处理界面中分别导出 4 类种子与原点处水平面的距离，得到种子静止时重力方向的质心坐标值，土壤表面坐标减去该值后加上在重力方向种子与土壤接触表面底端与质心的距离得到种子的坠入深度。进一步将种子重力方向的坐标替代投种点的位置坐标，得到投种点在种子静止面对应的投影点坐标值，则种子与该点静止距离即为种子的水平偏移距离。种子坠入物料的深度以及种子的掉落点与静止点之间的偏移距离，检测结果如表 3 所示。

由试验结果可知：4 类种子均无法将 12 mm 的物料层击穿，其中油莎豆的坠入深度最高达到 7.32 mm，物料层的厚度大于临界厚度。随着投种高度的增加，种子接触物料时的能量变大、与物料碰撞产生的凹槽变大，坠入物料的深度也变大，导致种子触土后受到凹槽约束颤动减弱、偏移距离变小。

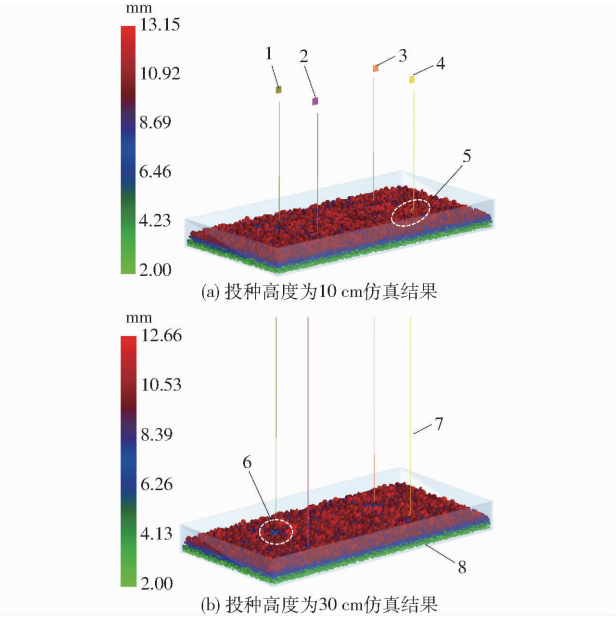


图 14　物料层临界厚度验证仿真

Fig. 14　Material layer critical thickness verification simulation

1. 油莎豆落种点　2. 大豆落种点　3. 花生落种点　4. 玉米落种点　5. 颤动轨迹　6. 物料凹槽　7. 掉落轨迹　8. 土仓

表 3　4 类种子偏移距离及坠入物料深度

Tab. 3　Offset distance and falling depth for four types of seeds　　mm

投种高度/cm	检测参数	花生	大豆	玉米	油莎豆
10	坠入深度	3.66	2.65	1.08	5.74
	偏移距离	1.57	2.01	2.49	1.63
30	坠入深度	4.07	3.87	1.52	7.32
	偏移距离	0.78	1.30	1.87	1.03

3.2　种子触土方式分析及仿真

3.2.1　种子与土壤接触机理分析

种子从排出到静止的过程可以分为悬空阶段和种子与土壤的接触阶段。种子排出时的高度、速度以及角速度的大小与方向因排种器性能的不同而出现差异，且种子在接触土壤之前处于悬空状态，在此过程中可能会受到风力、土壤颗粒的喷溅等环境的影响而导致种子运动轨迹发生改变。种子与土壤接触时也易因土壤颗粒破碎不均匀而导致种子触土后发生反弹，亦或由于种子自身形状及运动状态触土时产生翻转力矩，进而导致翻滚等现象。

为有针对性进行探究，本文仅考虑种子投出时与土壤表面的高度、初始速度及角速度的大小与方向，以及种子的姿态，且种子在掉落过程中仅受重力作用、土壤旋耕较为均匀、种沟表面较为平整。在上述条件下，种子投出后的掉落轨迹可以分为 5 种情况，如图 15 所示。图中在一定投种高度下，Ⅰ类与Ⅲ类运动在水平方向有水平分速度，且最终掉落在

地面上的速度大小与方向相等。Ⅱ类运动为种子在重力作用下的平抛运动。Ⅳ类与Ⅴ类运动为种子在重力作用下的加速运动。为简化分析过程,取最基本的两类运动进行分析,即Ⅱ类与Ⅴ类运动,其余运动情况均可在此两类基础上进行推演。

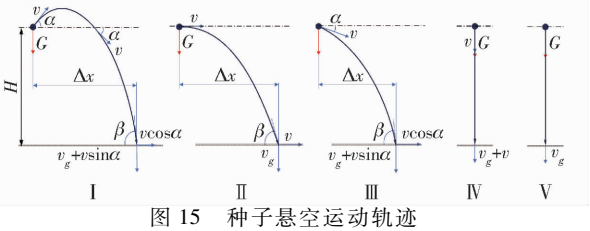


图 15 种子悬空运动轨迹

Fig. 15 Seed suspension trajectory diagram

基于上述两类运动情况,若种子的形状无各向异性(接近球对称),即不考虑种子的形状对与土壤接触时的影响时,仅需考虑种子投出的高度、水平速度及转动角度的影响,此时种子与土壤接触方式有 8 种,如图 16 所示。

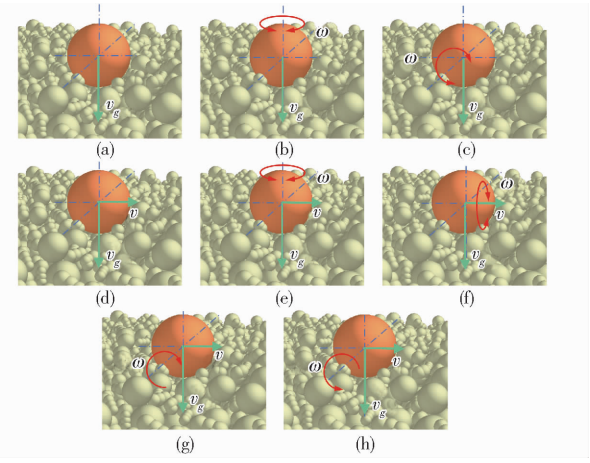


图 16 球型种子与土壤的 8 种接触方式

Fig. 16 Eight types of contact between spherical seeds and soil

对于形状具有明显各向异性的种子,还需要考虑种子接触土壤时的姿态。以花生种子为例,种子若不存在水平方向的残余速度,花生种子与土壤接触方式共有 7 种,如图 17 所示,其中,图 17a、17d 中种子没有角速度。

若种子存在水平方向速度,则种子最终接触土壤表面时的入土位姿及相互作用方式共有 15 种,如图 18 所示。其中,图 18c、18f、18i 的正反两个方向的交互情况不具有对称性,为 6 种接触方式,其余 9 种交互作用情况与角速度转动方向无关。

由上述分析可知,若要探究种子与土壤交互机理,对于形状无各向异性的种子,需要探究 8 种接触方式。各向异性较为显著的种子,如花生,则需要探究与土壤在无水平速度的 7 种接触方式及有水平速度的 15 种接触方式。

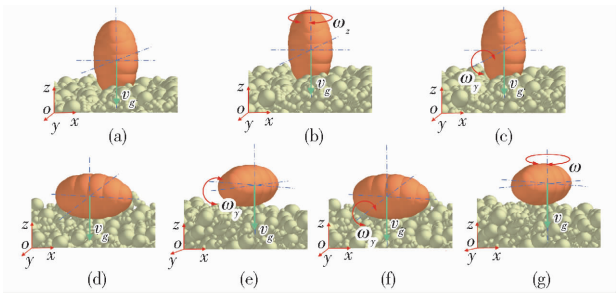


图 17 无残余速度花生种子与土壤的 7 种接触方式

Fig. 17 Seven ways of peanut seed contacted soil without residual velocity

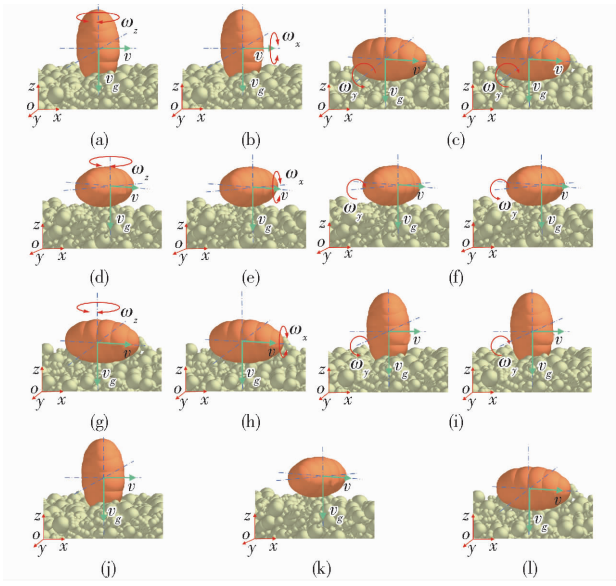


图 18 有残余速度花生种子与土壤的 15 种接触方式

Fig. 18 Fifteen types of contact between peanut seeds and soil with residual velocity

3.2.2 无各向异性种子触土机理分析

为探究种子在特定残余速度下接触物料后的偏移规律,在 EDEM 中分别进行残余速度的掉落仿真。根据前述花生分层施肥旋耕起垄播种机分析,设置残余速度为 0、0.08、0.25、0.42 m/s,及投种高度为 10、15、20 cm 进行对比仿真,球型种子材料与花生一致,半径为 7 mm,如图 19 所示。

使用 EDEM 设置每个种子为监测点,检测与水平面的距离,将该距离减去颗粒的半径得到接触面的最低点坐标,使用土壤层初始最高坐标减去最低点坐标,得到种子的坠入深度。已知 $g=0.981\ \mathrm{m/s^2}$,计算得投种高度分别为 10、15、20 cm 时种子的掉落时间,将种子掉落时间与初速度相乘得到种子与土壤接触点的水平位移 S_1(x 正方向)。令种子投射点坐标为(x,y,z),则种子与土壤接触时重力方向(z 负方向)坐标值为 $a=z-gt^2/2$,可得种子触土点坐标为($x+S_1$,y,a)。导出种子静止时坐标为(x_1,y_1,z_1),根据两点坐标可计算出种子的偏移距离与坠入深度,如表 4 所示。

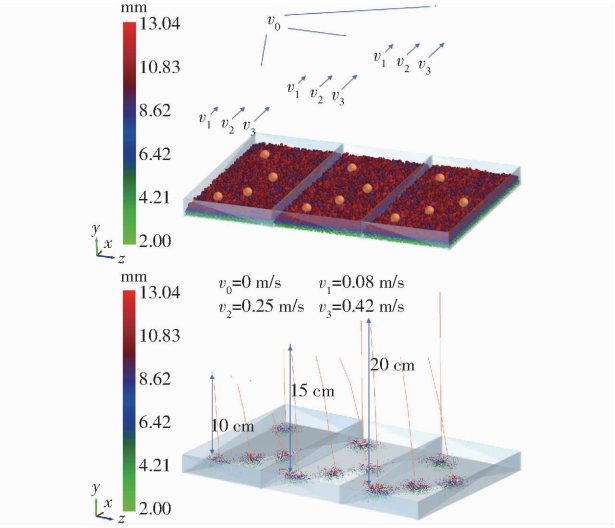


图 19　球型种子不同残余速度与投种高度触土仿真图

Fig. 19　Simulation of soil touching of spherical seeds with different residual velocities and pitching heights

表 4　球型种子偏移距离与坠入深度仿真结果

Tab. 4　Simulation results of offset distance and depth of fall for spherical seeds　　mm

残余速度/(m·s^{-1})	检测参数	投种高度/cm		
		10	15	20
0	坠入深度	4. 33	5. 60	5. 61
	偏移距离	2. 04	1. 87	1. 18
0. 08	坠入深度	3. 89	4. 61	4. 55
	偏移距离	1. 24	-0. 368	1. 20
0. 25	坠入深度	4. 47	4. 29	5. 51
	偏移距离	0. 59	1. 50	0. 14
0. 42	坠入深度	2. 20	1. 91	5. 66
	偏移距离	20. 76	7. 58	-0. 20

由表 4 可知，球型种子坠入越深，对应的偏移距离越小。且投种高度一定时，随残余速度增加偏移距离减少、坠入深度增加，但残余速度增加超出一定值，种子坠入深度骤减、偏移距离突增。而在残余速度一定时，投种高度增加偏移距离减少、坠入深度增加。

试验所选播种机工作速度为 2. 14 km/h（≈0. 6 m/s），排种器为勺轮式。种勺相对于转轴的线速度为 0. 18 ~ 0. 35 m/s。花生种子短轴与长轴均值分别为 10、18 mm。则种子在种勺的推动下可能产生的转动角速度为 20 ~ 70 rad/s，如图 20 所示，

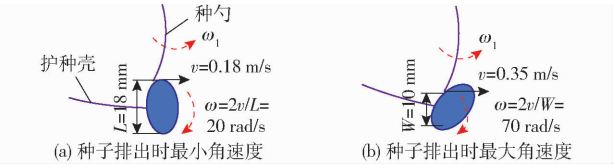


图 20　排种过程示意图

Fig. 20　Schematics of discharged seeds

为便于对照试验，文中种子触土时的角速度均取 20 rad/s。为进一步检测种子触土时的转动方向与残余速度之间的相互关系，再次进行对比仿真试验。

投种高度为 20 cm，残余速度为 0. 42 m/s，仿真结果如图 21 所示，图中 a、b、c、d、e、f、g、h 分别对应图 16 所示相同标号的 8 种接触方式。经测量与计算，各种子偏移距离与坠入深度如表 5 所示。

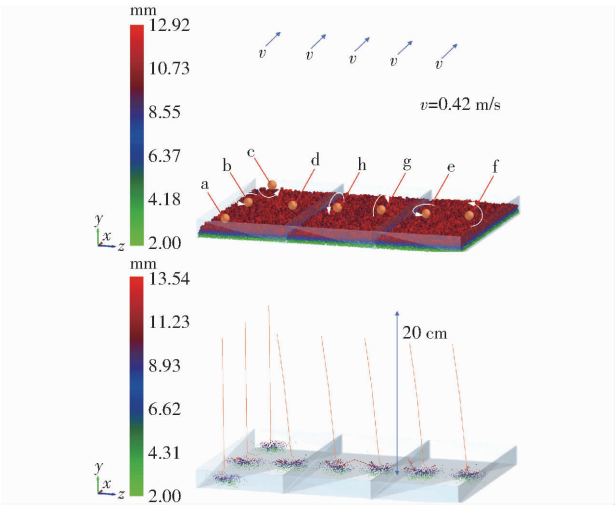


图 21　球型种子不同残余速度与转动方向触土仿真图

Fig. 21　Simulation of soil touching of spherical seeds with different residual velocities and rotation directions

表 5　有残余速度球型种子的偏移距离与坠入深度仿真结果

Tab. 5　Simulation results of offset distance and falling depth for spherical seeds with residual velocity　　mm

初始状态	检测参数	数值	初始状态	检测参数	数值
a	坠入深度	5. 10	e	坠入深度	5. 15
	偏移距离	1. 35		偏移距离	1. 80
b	坠入深度	0. 87	f	坠入深度	5. 61
	偏移距离	14. 03		偏移距离	0. 79
c	坠入深度	5. 49	g	坠入深度	5. 57
	偏移距离	1. 17		偏移距离	3. 01
d	坠入深度	4. 29	h	坠入深度	5. 41
	偏移距离	2. 36		偏移距离	0. 79

由表 5 可知，坠入深度越大，种子偏移距离越小。与无转动的运动形式 a、d 相比 b、g 的偏移距离更大，属于不利接触方式，反之 c、e、f、h 属于有利接触方式。其中，有残余速度时 c 类接触方式与无转动的 a 相比性能改善不大，h 则属于有残余速度的最优接触方式，较于的 d 类接触方式偏移距离有效减少，可见适当的转动有利于缩减种子的触土偏移。

3. 2. 3　无残余速度的各向异性种子触土机理分析

非球对称种子无残余速度时与土壤的接触方式有图 17 所示的 7 种，在 EDEM 中建立图 22 所示 7 种运动状态，a、b、c、d、e、f 分别对应图 17 所示相

同标号的7种接触方式。设定种子高度为20 cm、初速度为0 mm/s、角速度均为20 rad/s,结果如表6所示。

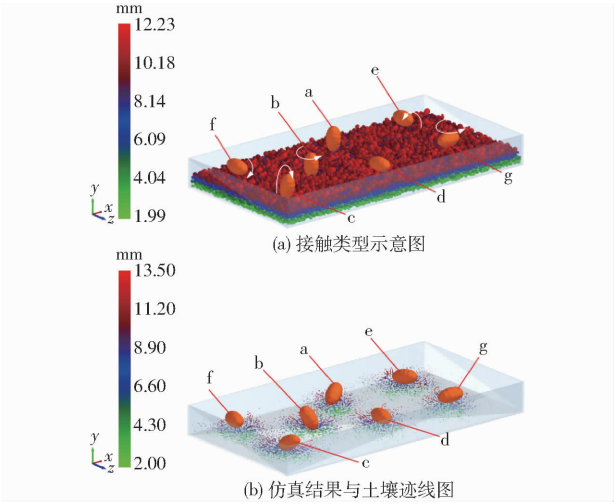


图22 无残余速度花生种子不同位姿与转动方向触土仿真图

Fig. 22 Simulation of soil touching of peanut seeds without residual velocity for different positions and rotation directions

表6 无残余速度花生种子不同位姿与转动方向的触土偏移距离与坠入深度

Tab. 6 Offset distance and depth of fall of peanut seeds without residual velocity after contacted with soil in different positions and directions of rotation mm

初始状态	检测参数	数值	初始状态	检测参数	数值
a	坠入深度	5.51	e	坠入深度	4.50
	偏移距离	1.92		偏移距离	1.02
b	坠入深度	6.78	f	坠入深度	3.49
	偏移距离	2.92		偏移距离	2.04
c	坠入深度	6.36	g	坠入深度	3.96
	偏移距离	1.91		偏移距离	2.41
d	坠入深度	4.66			
	偏移距离	1.61			

与无转速的a、d相比,种子姿态为竖直时大于水平时的坠入深度,其中b坠入深度最大,达到6.78 mm,种子在下落的过程中不断钻入土壤层,但偏移距离却并非最小。种子姿态为水平时e类种子的偏移距离最小,为1.02 mm,其余接触方式的偏移距离均大于无转角时的接触方式,在触土的同时,由于种子两侧搅动土壤,种子的能量快速降低。

3.2.4 有残余速度种子运动姿态对偏移距离的影响

非球对称种子无残余速度时与土壤的接触方式有15种,在EDEM中建立图23~25所示15种运动状态,分别对应图18所示相同标号的触土方式。设定种子高度为20 cm、初速度为0.42 m/s、角速度均为20 rad/s,结果如表7所示。

图23、24为12种有转动的残余速度仿真结果,其中图24为转向具有非对称性的6种接触方式。种子具有残余速度时,水平姿态的花生种子触土后的偏移距离普遍小于竖直姿态的触土方式,但f的逆向转动方式时由于脱离凹槽造成了8.82 mm的偏移距离,接触方式b发生了翻转,跳脱出了与土壤接触后冲击出的凹槽,偏移距离最高为14.74 mm。图25中i(左)的偏移距离最小,为最佳触土姿态。

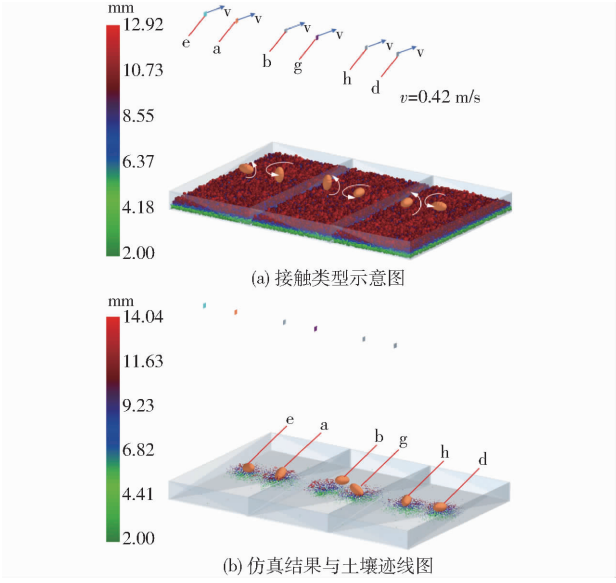


图23 有残余速度花生种子3种位姿与2种转动触土仿真结果

Fig. 23 Simulation of three positions and two directions of rotation of peanut seeds touching soil with residual velocity

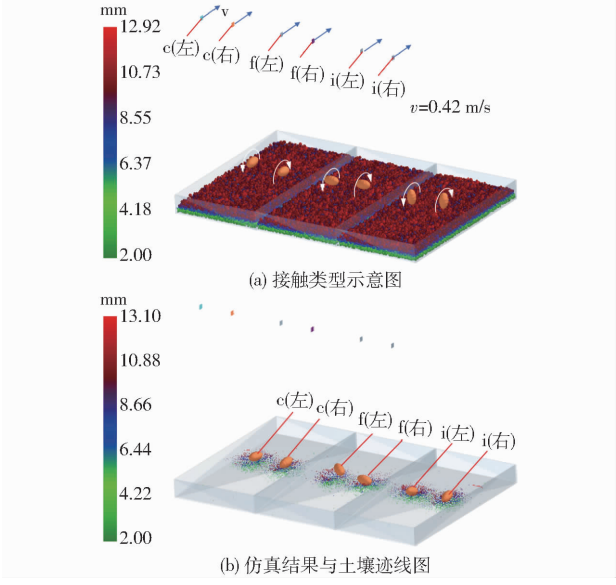
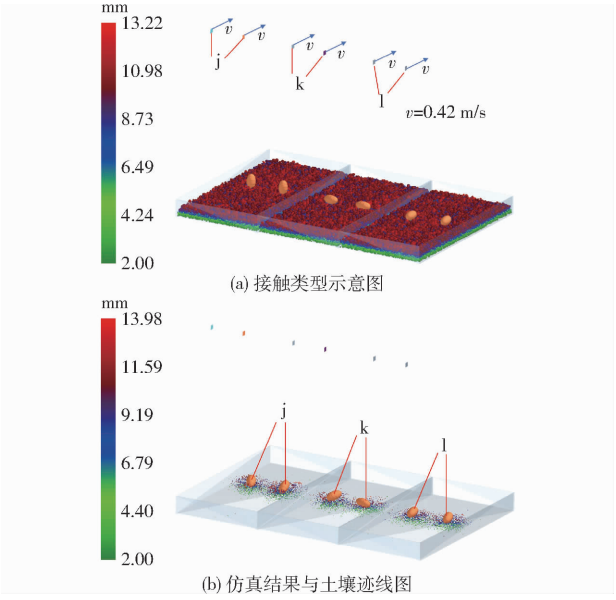


图24 有残余速度花生种子3种位姿与前后转动时触土仿真结果

Fig. 24 Simulation of soil touching with residual velocity peanut seeds in three positions with forward and backward rotation

图25为3种无转动残余速度仿真结果,每种仿

真 2 次取平均值，可见水平姿态的触土方式有利于减少颠覆产生的触土偏移，其中接触方式 k 偏移距离最小，为 2.8 mm。与接触方式 k 相比，具有更小偏移距离的接触方式由大到小依次为 e、h、g、i(左)(0.14 mm)。与无残余速度的花生触土结果相比，有残余速度的花生触土位移普遍更大，也有少数组合偏移距离更小。可见在一定投种高度下，选取合适的角速度与残余速度可以减小种子的触土偏移。



(a) 接触类型示意图

(b) 仿真结果与土壤迹线图

图 25　有残余速度无转动花生种子 3 种位姿触土仿真结果

Fig. 25　Three positional soil touching simulations of peanut seeds with residual velocity and without rotation velocity

表 7　有残余速度花生种子不同位姿与转动方向触土偏移距离与坠入深度

Tab. 7　Offset distance and depth of fall of peanut seeds with residual velocity after contact with soil in different positions and directions of rotation　mm

初始状态	检测参数	数值	初始状态	检测参数	数值
a	坠入深度	7.48	g	坠入深度	6.03
	偏移距离	6.98		偏移距离	0.51
b	坠入深度	1.41	h	坠入深度	4.34
	偏移距离	14.74		偏移距离	1.34
c(左)	坠入深度	5.14	i(左)	坠入深度	8.4
	偏移距离	5.36		偏移距离	−0.14
c(右)	坠入深度	5.25	i(右)	坠入深度	9.42
	偏移距离	5.32		偏移距离	4.61
d	坠入深度	4.61	j	坠入深度	9.37
	偏移距离	3.28		偏移距离	5.06
e	坠入深度	4.64	k	坠入深度	7.79
	偏移距离	1.48		偏移距离	2.80
f(左)	坠入深度	5.92	l	坠入深度	6.54
	偏移距离	8.82		偏移距离	4.04
f(右)	坠入深度	5.40			
	偏移距离	2.82			

上述仿真结果表明种子排出后由于触土姿态、投种高度、角速度以及残余速度的存在会导致种子与土壤的接触点并非静止点。在对排种器进行性能检测时，忽略种子的触土偏移现象，检测的结果应为排种器的排种均匀性。铺料式排种器试验台可以在排种器的设计阶段提供更为真实的环境。

4　试验台性能试验与田间试验

4.1　试验设计

本试验台用于排种器的结构优化、排种性能检测与最佳工作参数确定。可以根据种子与物料的交互情况对排种器的结构进行优化，也可用于排种器排种均匀性的检测以及最佳工作参数的确定。为检验本试验台的可操作性，于 2024 年 4 月 13 日对前文所述花生分层施肥旋耕起垄播种机配备的双腔勺轮式花生精密排种器进行性能检测与最佳工作参数的探究，试验地点温度为 15℃，空气相对湿度为 60%。选取花生品种为豫花 22，试验过程中保证种子与物料充足，试验准备及数据测量如图 26 所示。



图 26　试验准备与数据测量

Fig. 26　Preparation of tests and data measurement

1. 三爪卡盘　2. 光纤传感器　3. 排种器　4. 种料分离机构　5. HMI 控制面板　6. 物料箱　7. 电控箱　8. 偏移距离　9. 株距

4.2　试验方案及试验结果

对花生排种器的播种效果进行测试，并探究花生种子以残余速度投种时工作参数对粒距合格率的影响。取排种器工作速度 x_1、排种器投种高度 x_2、种子投出时残余速度 x_3 为试验因素，以种子掉落在物料上的偏移距离均值 Y_1、试验台根据落种信息检测到的粒距合格率 Y_2(下文称检测合格率)与输送带物料上测量的粒距合格率 Y_3(下文称作业合格率)为响应值。使用 Design-Expert 软件进行 Central Composite 试验设计，设置星型点的最高值与最低值为各试验因素的最高值与最低值，以保证试验因素均在可取范围内，如表 8 所示。设置 Central Composite 试验的重复试验为 3 次，并根据生成的试验方案逐一进行试验。准备好仪器后，启动 PLC 进行检测，标记开始检测后掉落在物料层上的第 1 个种子，10 个种子粒距为一组，测定 5 组连续的数据。Y_1 为在种子掉落在输送带上碰撞产生的凹槽中心与种子中心的距离，使用游标卡尺进行测量，Y_2 在

表 8 试验因素编码

Tab. 8 Test factor and code

编码	因素		
	工作速度 x_1/(km·h^{-1})	投种高度 x_2/cm	残余速度 x_3/(mm·s^{-1})
1.682	4.0	20	420
1	3.6	18	335
0	3.0	15	210
-1	2.4	12	85
-1.682	2.0	10	0

触摸屏界面读取,Y_3 计算式为

$$Y_3 = \frac{N' - 2n_1'}{N''} \times 100\% \tag{12}$$

其中

$$\begin{cases} N' = n_1' + n_2' + n_3' + n_4' + n_5' \\ N'' = n_2' + 2n_3' + 3n_4' + 4n_5' \\ n_1' = \sum n_i \quad (X_i \in [0, 0.5)) \\ n_2' = \sum n_i \quad (X_i \in [0.5, 1.5)) \\ n_3' = \sum n_i \quad (X_i \in [1.5, 2.5)) \\ n_4' = \sum n_i \quad (X_i \in [2.5, 3.5)) \\ n_5' = \sum n_i \quad (X_i \in [3.5, +\infty)) \\ X_i = x_i / x_r \\ \overline{X} = \dfrac{\sum n_i X_i}{n_2'} \quad (X_i \in [0.5, 1.5]) \end{cases}$$

式中 n_i'——每个区段内粒距出现的次数

n_i——粒距出现的次数

X_i——每个区段变量

X_r——区段长度,m

x_i——区段中值,m N''——区间数,个

N'——试验测定的粒距总数,个

4.3 试验结果分析

4.3.1 回归模型建立与检验

试验方案及结果如表 9 所示,其中方案 15、16、17 为重复试验。

使用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析得到 3 个指标的二次回归模型

$$Y_1 = 1.39 + 0.017z_1 - 0.434z_2 + 1.94z_3 - 0.075z_1z_2 - 0.275z_2z_3 + 0.35z_1^2 + 0.385z_2^2 + 1.41z_3^2 \tag{13}$$

$$Y_2 = 79.66 - 5.39z_1 + 0.2768z_1^2 \tag{14}$$

$$Y_3 = 76.45 - 5.05z_1 + 1.1z_2 - 4.97z_3 + 0.125z_1z_2 + 0.125z_1z_3 + 0.625z_2z_3 + 0.0082z_1^2 + 0.185z_2^2 - 2.29z_3^2 \tag{15}$$

式中 z_1——因素 x_1 编码值

z_2——因素 x_2 编码值

z_3——因素 x_3 编码值

表 9 试验方案与结果

Tab. 9 Test program and results

试验序号	x_1/(km·h^{-1})	x_2/cm	x_3/(mm·s^{-1})	Y_1/mm	Y_2/%	Y_3/%
1	2.4	12	85	2.1	84	82
2	3.6	12	85	2.2	75	73
3	2.4	18	85	1.8	86	85
4	3.6	18	85	1.9	76	75
5	2.4	12	335	6.9	86	71
6	3.6	12	335	7.3	76	61
7	2.4	18	335	5.8	85	75
8	3.6	18	335	5.6	74	67
9	2.0	15	210	1.5	90	87
10	4.0	15	210	1.4	70	68
11	3.0	10	210	2.3	82	78
12	3.0	20	210	0.8	79	78
13	3.0	15	0	1.8	81	79
14	3.0	15	420	7.1	78	63
15	3.0	15	210	1.5	80	78
16	3.0	15	210	1.4	78	75
17	3.0	15	210	1.6	78	76

根据检测合格率 Y_2 与作业合格率 Y_3 的 P 值可知两个回归模型为极显著,偏移距离 Y_1 的回归模型为显著。偏移距离 Y_1 回归模型的校正系数 R_{adj}^2 为 0.7359,说明该模型可以解释 73.59% 的相应变化。同理,检测合格率 Y_2 的回归模型可以解释 93.06% 的相应变化。作业合格率 Y_3 的回归模型可以解释 90.99% 的相应变化。3 个指标决定系数 R^2 分别达到 0.8844、0.9393 和 0.9606,说明本次试验过程中误差较小,试验数据有较强的可靠性。

4.3.2 影响因素效应分析

使用 Design-Expert 进行回归方程的响应面分析,可以反映交互作用对结果影响的强弱,如图 27、28 所示。

由图 27a ~27c 可知:3 个因素对偏移距离的影响程度由高到低分别为:残余速度、投种高度、工作速度。残余速度越大偏移距离也越大,但残余速度一定时,随着播种高度的增加,偏移距离先降低后增加。前进速度对偏移距离的影响不大,随着前进速度的增加偏移距离呈现微弱增加的趋势。

由图 27d ~27f 可知:3 个因素对作业合格率的影响程度由高到低分别为:工作速度、残余速度、投种高度。且作业合格率随着工作速度与残余速度的提高而降低,并随着投种高度的增加而增加。该现象表明当种子具有残余速度时,适当调整投种高度可以提高排种器的作业合格率。

由于排种器落种口处检测的粒距合格率与投种高度、残余速度无关,故而选取线性模型。播种机工

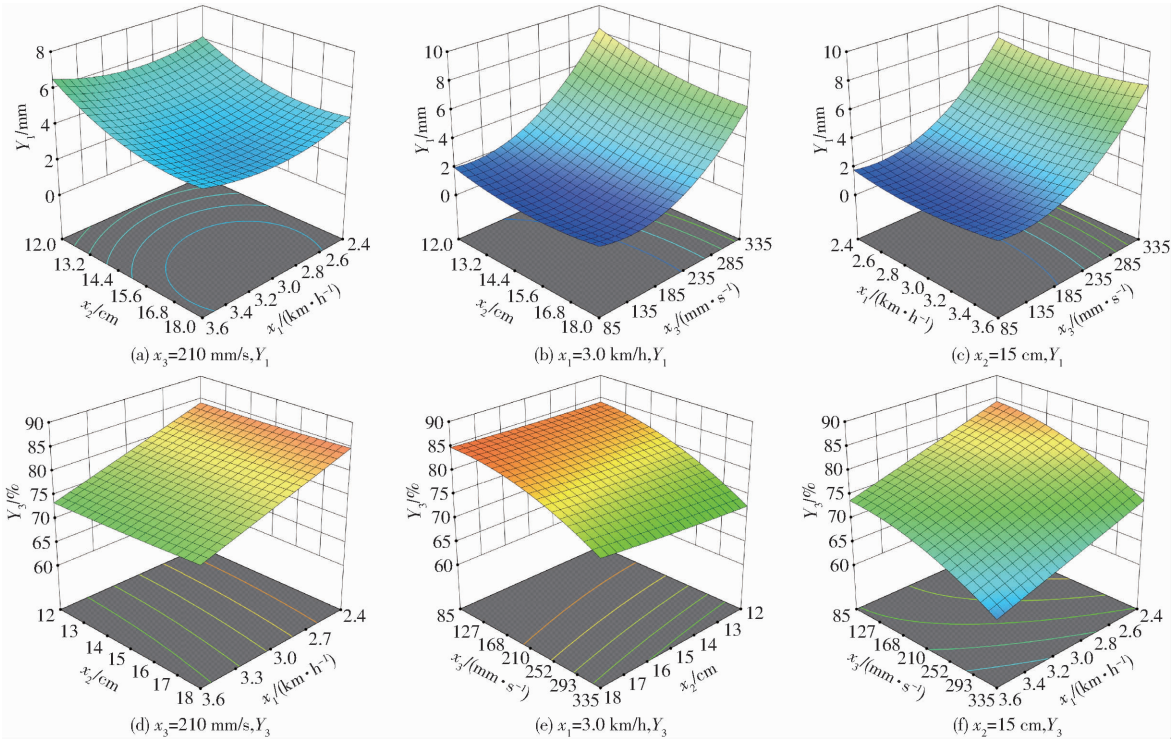


图 27　偏移距离与作业合格率响应曲面

Fig. 27　Response surface of offset distance and operational pass rate

作速度与粒距合格率关系曲线如图 28 所示，随着工作速度的提升排种器落种口处的粒距合格率呈现线性降低的趋势，工作速度越低，粒距合格率越高。且排种器落种口处的粒距合格率普遍高于输送带上检测到的粒距合格率，也说明了在排种口处进行检测的试验台，检测的排种器排种合格率趋于理想化，不包含对残余速度、投种高度等因素的考量，也无法探究排种器的最佳工作参数。

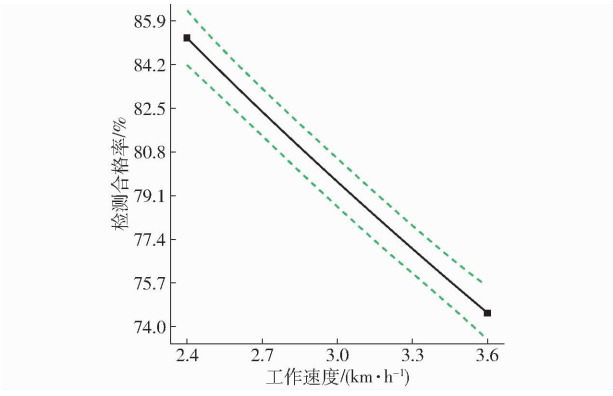


图 28　工作速度与检测合格率关系曲线

Fig. 28　Curve of working speed as a function of inspection pass rate

综上可知：该排种器在工作速度为 2 km/h、投种高度为 15 cm、残余速度为 210 mm/s 时作业效果最好，作业合格率达到 87%。其中，残余速度是影响种子粒距合格率的最主要因素。根据物料所留凹坑形状可知：播种高度越高，种子触土时越易尽可能垂直地冲击地面形成凹陷，进而将种子固定，但投种高度过高，种子与物料表面接触后易发生弹跳，造成作业合格率进一步降低，符合前述仿真试验的规律。适当增大排种器投种高度可以减少残余速度对粒距合格率的负面影响。

4.4　田间试验

4.4.1　试验准备及检测方法

为进一步验证本排种器试验台对排种器最佳工作参数的探究能力，2024 年 4 月 15 日在胶州试验台对排种器工作性能进行田间试验，如图 29 所示。播种机工作时取最优工作参数，启动后当播种机工作速度稳定时标记为测量起始点，截取 3 m 垄长作为测定对象，最低挡位对应的残余速度为 0.250 m/s、株距为 0.1 m。



图 29　田间试验及测量

Fig. 29　Field test and measurements

1. 排种器　2. 种箱　3. 驱动地轮　4. 旋耕筑垄装置　5. 测量株距

4.4.2　试验结果及分析

为检测播种机工作参数合理性，取投种高度为 10、20 cm 作为对照组，播种机工作速度为 2.12、3.22 km/h（实测值），播种完成后轻轻拨开种子表面土壤，测量种子株距，进一步根据式（14）计算株距合格率，结果如表 10 所示。

表 10 田间试验方案与结果

Tab. 10 Experimental programme and results

试验序号	工作速度/(km·h^{-1})	投种高度/cm	株距合格率/%
1	2.12	10	80
2	2.12	15	84
3	2.12	20	82
4	3.22	10	71
5	3.22	15	75
6	3.22	20	78

由表 10 可知:该播种机在工作速度为 2.12 km/h、投种高度为 15 cm 时粒距合格率最高,达到 84%,作为对比的 3.22 km/h 粒距合格率有小幅度降低。播种机作业合格率较上文检测合格率与工作合格率相比较为接近后者,最佳工作参数与试验台检验所得最优值相差不大。

5 结论

(1)设计了一款可探究排种器与物料交互效果的铺料式多功能试验台,可以对水平转轴的气吸式、机械式、气力式等排种器进行性能检测与最佳工作参数探究。设计铺料装置、种料分离装置等关键结构并进行仿真验证。

(2)现有排种器试验台进行检测时,为避免种子掉到输送带上发生不可预测的弹跳,大多在零速投种原理的条件下进行,此时排种器的株距与携种半径成正比、与携种点数成反比。论证了实际田间作业时,零速投种原则会因挡位调节被打破,产生残余水平速度,推导出播种机残余速度求解公式。

(3)论证了种子掉落的 5 种轨迹,并将种子分为球型与具有各向异性两类,对球型种子的 8 种触土方式与以花生为例的具有各向异性种子的 7 种无残余速度的触土方式以及 15 种有残余速度的触土方式进行对比仿真,结果表明:种子坠入深度越大偏移距离越小;存在残余速度时,残余速度过大或投种高度过低种子会产生较大的偏移距离,残余速度越大投种高度也应相应提高;投种高度越大偏移距离越小、坠入深度越大;角速度对偏移距离具有一定的影响,合适的角速度可以减少种子偏移距离。

(4)对排种器进行性能检测与最佳工作参数的探究,取工作速度、投种高度及残余速度为试验因素,取偏移距离、检测合格率及工作合格率为指标,在试验台上进行中心组合试验设计。由试验结果可知:对偏移距离的影响程度由大到小分别为残余速度、投种高度、工作速度,对作业合格率影响程度由大到小分别为工作速度、残余速度、投种高度。随着工作速度的提升排种器落种口处的粒距合格率呈线性降低趋势。最后,经田间试验验证了播种机实际播种合格率更接近试验台工作合格率,而与检测合格率具有一定程度的误差,进一步验证排种器工作参数探究时应考虑种子与土壤之间的接触情况,证明了本试验台具有探究最佳工作参数的能力。

参 考 文 献

[1] 黄玉祥,李鹏,董建鑫,等. 大豆高速播种机侧置导引式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):44 - 53,75.
HUANG Yuxiang, LI Peng, DONG Jianxin, et al. Design and experiment of side-mounted guided high speed precision seed metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):44 - 53,75. (in Chinese)

[2] 齐贝贝. 气力种勺式花生精量排种器的研究[D]. 石河子:石河子大学,2020.
QI Beibei. Research on pneumatic seed scoop type peanut precision seed discharger[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)

[3] 顿国强,毛宁,刘文辉,等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4):70 - 78.
DUN Guoqiang, MAO Ning, LIU Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for soybean plot breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):70 - 78. (in Chinese)

[4] 施龙. 排种性能试验台的设计与试验[D]. 南京:南京农业大学,2015.
SHI Long. The design and test of the seeding performance test rig[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2015. (in Chinese)

[5] 刘芸松,王嗣强,季顺迎. 基于水平集-离散元方法的球谐函数颗粒材料缓冲性能分析[J]. 计算力学学报,2023,40(4):538 - 545.
LIU Yunsong, WANG Siqiang, JI Shunying. Analysis of buffering capacity of spherical harmonic granular materials based on the level set-discrete element method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2023,40(4):538 - 545. (in Chinese)

[6] 穆龙,张晨,张祺,等. 非凸体颗粒材料缓冲性能的离散元模拟[J]. 太原理工大学学报,2019,50(2):226 - 233.
MU Long, ZHANG Chen, ZHANG Qi, et al. Buffering capacity of non-convex granular materials based on discrete element method[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2019,50(2):226 - 233. (in Chinese)

[7] 王嗣强,季顺迎. 基于超二次曲面的颗粒材料缓冲性能离散元分析[J]. 物理学报,2018,67(9):182 - 193.
WANG Siqiang, JI Shunying. Discrete element analysis of buffering capacity of non-spherical granular materials based on super-

quadric method[J]. Acta Phys. Sin.,2018,67(9):182 – 193. (in Chinese)
[8] 曾荣,李东东,祝英豪,等.旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用[J].农业机械学报,2020,51(5):88 – 97.
ZENG Rong, LI Dongdong, ZHU Yinghao, et al. Design and application of performance test bench for rotary tiller components [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):88 – 97. (in Chinese)
[9] 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,2018.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism of high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University,2018. (in Chinese)
[10] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等.玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J].农业机械学报,2023,54(7):156 – 166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):156 – 166. (in Chinese)
[11] 姜雨. 砂土、粘土的力学性质及本构参数统一表征试验研究[D].苏州:苏州科技大学,2022.
JIANG Yu. Study on unified characterization of mechanical properties and constitutive parameters of sand and clay[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2022. (in Chinese)
[12] 陶力铭. 盾构刀盘-土壤界面粘附机理试验研究[D].重庆:西南交通大学,2021.
TAO Liming. Experimental study on the adhesion mechanism of shield cutterhead – soil interface[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University,2021. (in Chinese)
[13] 徐天月.精密播种单体及其关键部件工作过程的试验研究与仿真分析[D].长春:吉林大学,2019.
XU Tianyue. Experimental study and simulation analysis on the working process of the precision seeding unit and its key parts [D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)
[14] 闫东旭.大豆种子颗粒建模及投种、覆土镇压过程的仿真分析与试验研究[D].长春:吉林大学,2022.
YAN Dongxu. Particle modelling of soybean seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-throwing and pressing[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[15] 任兴华.基于离散元的花生播种单体仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
REN Xinghua. Simulation analysis and experimental study of peanut seeding monomer based on discrete element[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2023. (in Chinese)
[16] 周龙.基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[17] 张宁.玉米籽粒收获机鱼鳞筛清选装置工作机理及优化分析[D]. 长春:吉林大学,2022.
ZHANG Ning. Research on working mechanism and optimization analysis of chaffer sieve cleaning device in corn grain harvester[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[18] 郭海钦.油莎豆播种机关键部件设计与试验研究[D].郑州:河南农业大学,2022.
GUO Haiqin. Design and experimental study of key components of *Cyperus esculentus* seeder[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2022. (in Chinese)
[19] 何晓宁,张方焱,尚书旗,等.油莎豆联合收获机合页筛片式升运装置设计与试验[J].农业机械学报,2024, 55(5):148 – 157.
HE Xiaoning, ZHANG Fangyan, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of hinge lifting device of *Cyperus esculentus* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(5):148 – 157. (in Chinese)
[20] 张宁,徐继康,张广军,等.花生分层施肥旋耕起垄播种机:CN202311498265.4[P]. 2024 – 01 – 26.
[21] 季顺迎,樊利芳,梁绍敏.基于离散元方法的颗粒材料缓冲性能及影响因素分析[J].物理学报,2016,65(10):168 – 180.
JI Shunying, FAN Lifang, LIANG Shaomin. Buffer capacity of granular materials and its influencing factors based on discrete element method[J]. Acta Phys. Sin.,2016,65(10):168 – 180. (in Chinese)

(上接第 173 页)

[21] 高建民,刘兴达,齐惠冬,等.斜置潜土逆转旋耕抛土仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 54 – 63.
GAO Jianmin, LIU Xingda, QI Huidong, et al. Simulation and experiment of soil casting during oblique submerged reversely rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 54 – 63. (in Chinese)
[22] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等.免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8):42 – 52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):42 – 52. (in Chinese)
[23] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等.基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53 – 62.
ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, YUAN Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53 – 62. (in Chinese)