

红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验

顿国强^{1,2} 郭娜² 纪欣鑫² 李鑫² 王雷²

(1. 哈尔滨剑桥学院智能农机装备工程实验室, 哈尔滨 150069; 2. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要:为解决传统机械式蔬菜排种器无法实现精量播种及存在伤种的问题,设计了一种红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器。采用排种盘侧面悬置的排种勺完成种子的充种、清种、投种,实现了非接触式作业过程,理论分析了种子进入及脱离种勺的运动过程,并阐明其不伤种的基本原理,确定了排种盘、排种勺以及排种管的基本结构参数,采用 EDEM 离散元仿真软件模拟了不同排种勺结构尺寸下的工作过程,以排种勺型孔直径、深度及放样曲面圆角比为试验因素,以单粒率、多粒率、空粒率为试验指标,采用三因素五水平二次通用旋转组合设计进行仿真试验,确定排种勺最优结构参数为:型孔直径 5 mm,深度 4.3 mm,放样曲面圆角比 0.12,基于此参数进行离散元仿真试验,通过自制排种器试验台进行台架试验以及将排种器安装到播种机上进行田间试验,仿真试验结果为单粒率 93%、多粒率 4%、空粒率 3%,台架试验结果为合格指数平均值 92.2%、重播指数平均值 4.6%、漏播指数平均值 3.2%,相对误差分别为 0.86%、15%、6.67%,田间试验结果为:合格指数 90.5%、重播指数 6.9%、漏播指数 2.6%,证明此排种器精量播种性能良好。同时与毛刷窝眼轮式排种器进行损伤率对比试验,损伤率分别为 0.43%、1.27%,相对误差为 66.14%,表明种子损伤明显降低。

关键词: 红萝卜; 排种器; 侧面悬置排种勺; 离散元仿真; 精量排种

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)05-0077-10

OSID:



Design and Experiment of Side-hung Seed-rowing Spoon Type Precision Seed Metering Device for Radish

DUN Guoqiang^{1,2} GUO Na² JI Xinxin² LI Xin² WANG Lei²

(1. Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Harbin Cambridge University, Harbin 150069, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to solve the traditional mechanical vegetable seeder can not realize the problem of precision sowing and the existence of injured seeds, a radish spoon type precision seed discharger was designed. Seed filling, seed cleaning and seed feeding were accomplished by using a seed scoop suspended from the side of the seed tray, realizing a non-touch operation process. The movement of seeds into and out of the seed scoop was analyzed theoretically, and to clarify the rationale for its non-injurious nature, the basic structural parameters of seed disks, seed scoops and seed tubes were determined, EDEM discrete element simulation software was used to simulate the working process under different structural dimensions of the seed-rowing spoon. The test factors were the diameter and depth of the hole in the seeding spoon and the rounding ratio of the release surface, single grain rate, multiple grain rate and empty grain rate were used as test indicators. Simulation experiments were conducted by using a 3-factor, 5-level secondary general rotary combination design, the optimal structure parameters of the seed discharge spoon for the hole diameter of 5 mm, the depth of 4.3 mm, the release surface fillet ratio of 0.12 were determined. Based on discrete element simulation of this parameter, bench testing was done via a homemade seed dispenser test bed and attachment of seed displacer to planter for field trials. The results of the simulation test were as follows: single grain rate was 93%, multiple grain rate was 4%, empty grain rate was 3%. The results of the bench test were as follows: the mean value of the pass index was 92.2%, the mean value of the reseeding index was 4.6% and the mean value of the leakage index was 3.2%, the relative errors were 0.86%, 15% and 6.67%, respectively. The results of the field trial were as follows: the mean value of the pass index was 90.5%, the mean value of the reseeding index was

收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-09-28

基金项目: 哈尔滨剑桥学院重点科研应用研究项目(JQZKY2022021)

作者简介: 顿国强(1986—),男,副教授,博士,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail: dunguoqiangpatent@163.com

6.9% and the mean value of the leakage index was 2.6%, which demonstrated good performance of precision seeding with this seed dispenser. Comparison test of simultaneous damage rate with brush fossa wheel seed discharger showed that the injury rates were 0.43% and 1.27%, respectively, relative error was 66.14%, indicating a significant reduction in seed damage.

Key words: radish; sowing planter; side-hung seed discharge scoops; discrete element simulation; precision planting

0 引言

红萝卜富含多种维生素,是一种很有营养的蔬菜^[1]。目前,红萝卜的种植主要依靠人工按一定行株距进行点播,这种播种方式耗费大量的人力物力,这种种植模式下的红萝卜还会出现长度、粗细不达标等现象^[2]。为保证种植质量、减少人力成本以及提高种植效率,需要进行机械化精量播种,其中排种器是机械化播种机的核心部件,其排种性能直接影响机械化种植的均匀性,因此,研制一种性能更好的精量排种器对于保证播种质量尤为重要。

气力精密排种器主要依靠气流之间的压力差进行充种,对排种作物种子的外形尺寸没有严格的要求,并且种子不会受到伤害,同时可以适应大型播种机的高速作业,但由于要求气密性好造成其内部结构复杂,成本高,通用性强,长时间使用会发生气管老化,连接部位变得不牢固,发生断裂现象,造成气压下降或不稳,影响排种器的稳定性^[3-4],机械式排种器应用性强,主要依据排种勺对不同尺寸种子进行分类筛选,并通过排种管进行排种^[5]。现有研究成果表明,机械式蔬菜排种器主要从排种性能指标单粒率、多粒率、空粒率以及种子破损率方面进行研究,由于红萝卜种子体积小、极易破碎,现有排种器很难解决精量排种和伤种的问题^[6-8]。综上所述,气吸式排种器在作业过程中不会出现损伤种子的问题,但只适合规模化大田作业。机械类排种器因结构原理固有缺陷,对种子形状适应性较差,对于红萝卜种子实现精量播种较为困难,因此本文研究一种低成本侧面悬置排种勺式排种器,以解决精量播种、避免种子损伤的问题。

1 总体设计与工作原理

1.1 总体设计

勺式红萝卜精量排种器主要由外壳体、排种管、排种盘、内壳体、轴承、限位套、轴承端盖、排种勺等组成,此排种器主要利用悬勺式排种勺依靠重力以及离心力清投种的工作原理,避免了毛刷窝眼轮式排种器排种作业时种子与排种盘、毛刷及壳体发生摩擦造成种子损伤,精量排种器整体三维结构如图1所示。

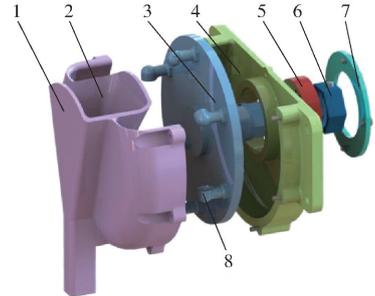


图1 精量排种器整体三维结构图

Fig. 1 Overall three-dimensional structure diagram of precision metering device

1. 外壳体 2. 排种管 3. 排种盘 4. 内壳体 5. 轴承 6. 限位套 7. 轴承端盖 8. 排种勺

1.2 工作原理

排种器工作时,电机驱动排种盘转动带动其上的排种勺进入排种盘与外壳体所形成的种堆内,排种勺在充种区依靠种子自重及种间挤压力完成充种,当排种勺随着排种盘继续旋转出种堆进入清种区时,排种勺内多余的种子依靠种子自身重力重新回落到种堆内,当排种勺旋转至投种区时,种子由于自身重力以及离心力从排种勺中脱落,经过排种管落入种沟土壤中,精量排种器工作原理如图2所示,本排种器在整个充种、清种及投种过程中种子只与排种勺接触,并且排种勺采用半球面及放样曲面的结构形式避免了挤压种子的情况。

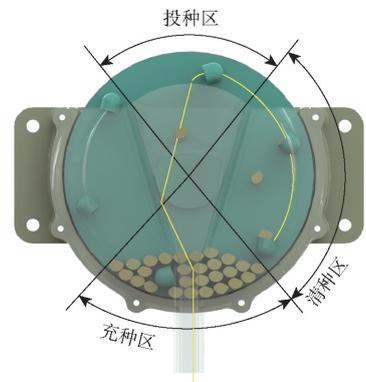


图2 排种器工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of seed metering device

2 关键部件设计

排种器设计主要依据种子物体特征及物理性能,通过对排种器工作原理分析,确定排种勺在整个

充种、清种以及投种运动过程中排种器关键部件,排种器关键部件主要包含排种盘、排种勺以及排种管,通过关键部件结构尺寸最终完成整个排种器结构设计。

2.1 排种盘设计

排种盘尺寸合理性对充种性能有一定影响,当排种盘直径增大时由于曲率变大更加便于充种,但由于所设计的排种器主要应用于大棚作业的手推式播种机上,手推式播种机需降低整体质量并且排种器安装空间有限,导致排种器整体尺寸不宜过大,以致于排种盘直径不宜过大,为满足充种性能需要降低排种盘转速从而增加充种时间,综合考虑,参照《农业机械设计手册》^[9],排种盘直径通常在 80 ~ 260 mm 之间,为满足安装空间的要求,排种盘直径设计为 100 mm。

2.2 排种勺设计

红萝卜播种方式为点播,需满足每穴播 1 粒的农艺要求^[10],每个排种勺最终充种量为 1 粒,参照种子实物三轴尺寸进行排种勺型孔面结构设计,种子实物三轴尺寸测量如图 3 所示,种子形状为三棱形,通过游标卡尺对百粒种子三轴(长、宽及厚)尺寸进行测量,结果如表 1 所示。

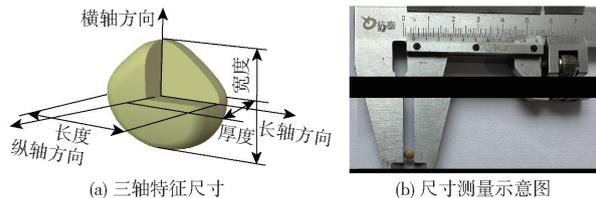


图 3 萝卜种子三轴尺寸测量图

Fig. 3 Three axis size measurement diagrams of radish seeds

表 1 红萝卜种子尺寸

Tab. 1 Carrot seed size measurement result

| 参数 | 最大值/mm | 最小值/mm | 均值/mm | 方差/mm ² |
|----|--------|--------|-------|--------------------|
| 长度 | 4.67 | 3.64 | 4.14 | 0.051 |
| 宽度 | 4.16 | 3.07 | 3.48 | 0.058 |
| 厚度 | 2.86 | 1.57 | 2.43 | 0.045 |

计算得萝卜种子球度 S_p 为 79%,由于种子球度比较高,因此将排种勺型孔面设计为球形面,为有利于排种勺对种子进行充种、清种以及投种,最终将排种勺型孔面设计为半球面及放样式圆弧曲面结构形式,排种勺结构形式如图 4 所示,该结构形式有利于避免挤压卡种现象的发生,最终防止种子损伤,排种勺型孔尺寸主要根据种子物体特征结构尺寸进行确定,当排种勺型孔尺寸过大,则稳定充入排种勺型孔内种子数量增多造成多粒率增加,当排种勺型孔尺寸过小,则稳定充入排种勺内种子数量减小造成空

粒率增加^[11],种子充入到排种勺型孔内有各种各样的姿势,可能沿着长度方向直立进入、沿着厚度方向平躺进入以及沿着长度方向倾斜进入^[12],根据势能最小原理,认为“沿着厚度方向平躺”的状态种子最稳定^[13],为使充种、清种以及投种顺畅,根据滑移理论,在型孔上加工放样曲面圆角,有效减小充种、清种以及投种阻力^[14],放样曲面圆角有助于清种,圆角半径过大,投种区种子还没到投种区在清种区完成了投种,造成空粒率,圆角半径过小,清种区种子将在投种区清种,造成多粒率,故排种勺型孔尺寸需满足

$$\begin{cases} a_{\max} \leq x_1 \leq a_{\text{ave}} + c_{\min} \\ b_{\text{ave}} \leq x_2 \leq 1.5b_{\text{ave}} \\ x_3 = \frac{r}{x_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 a_{\max} ——萝卜种子长度最大值,mm
 a_{ave} ——萝卜种子长度平均值,mm
 c_{\min} ——萝卜种子厚度最小值,mm
 x_1 ——排种勺型孔直径,mm
 x_2 ——排种勺型孔深度,mm
 b_{ave} ——萝卜种子宽度平均值,mm
 x_3 ——排种勺放样曲面圆角比(放样曲面圆角半径与排种勺型孔深度比值),取 0 ~ 0.4
 r ——放样曲面圆角半径,mm

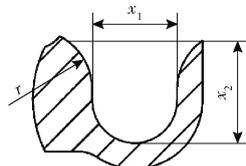


图 4 排种勺型孔结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the hole structure of the seeding spoon

根据式(1)以及游标卡尺测得的百粒种子三轴尺寸,计算得到排种勺型孔尺寸,排种勺型孔直径 x_1 为 4.7 ~ 5.7 mm,排种勺型孔深度 x_2 为 3.5 ~ 5.2 mm,通过 EDEM 仿真软件,以试验指标单粒率最高时的试验因素数据确定排种勺型孔各结构尺寸。

2.3 排种勺前倾角

当排种器在工作时,排种盘做匀速圆周运动并带动排种勺通过充种区、清种区最终到达投种区,排种勺在排种盘上安装位置的前倾角为排种勺轴线与排种盘圆心和排种勺球心的连线所夹的角度,该安装位置的前倾角直接影响种子的投种位置以及种子投种到排种管的运动效果,当排种盘带动排种勺逆时针旋转运动到充种区时,种子充种进入到排种勺

内,受力分析如图5所示。

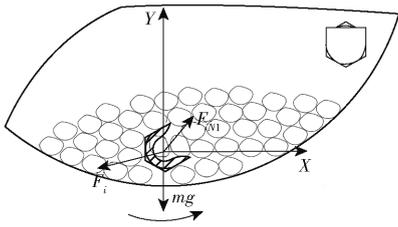


图5 精量排种器充种受力分析图

Fig. 5 Analysis diagram of loading force of precision metering device

对充入到排种勺内的种子进行受力分析,可得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M(F_i) + M(mg) + M(F_{N1}) = m\varepsilon \\ mg + \sum_{i=1}^n F_i + F_{N1} = ma_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 m ——已充种子质量,kg

F_{N1} ——排种勺对种子的支撑力,N

F_i ——种堆内种子对已充种子的挤压力,N

ε ——已充种子运动角加速度,rad/s²

g ——重力加速度,m/s²

M ——排种勺内已充种子所受各力对支撑点的力矩,N·m

a_1 ——已充种子运动加速度,m/s²

通过图5以及公式(2)分析可知,充种区内排种勺在种堆内旋转使种子相对排种勺产生相对运动,此时种子通过自身重力以及种子之间的挤压力进入到排种勺内,同时由于力的作用是相互的,排种勺在转动过程中对种子也产生了挤压力,同时排种勺表面在匀速圆周运动中对种子产生了摩擦力,在挤压力及摩擦力双重作用下种子将沿着排种勺转动的方向整体流动,同时种堆的堆积角向排种勺转动的方向倾斜,增加了充种区的整体高度,种堆堆积角的增加使种子更有利于从种堆内充种进入到排种勺内,充入排种勺内的种子在种堆内其他种子的挤压力以及排种勺对种子的支撑力共同作用下处于平衡状态。

当排种盘带动排种勺运动到投种区时,种子在排种勺型孔内的力学分析如图6所示。

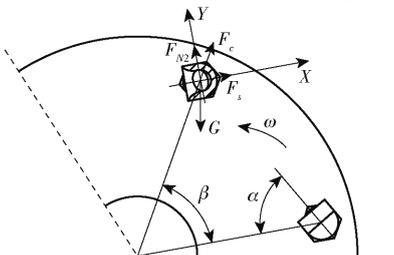


图6 排种勺内种子的受力分析

Fig. 6 Mechanical analysis of seeds in seeding spoon

种子在排种勺型孔内的受力公式为

$$\begin{cases} G\sin(\alpha + \beta) - F_c \cos(\alpha + \beta) - F_s = m_s a_2 \\ F_{N2} = G\cos(\alpha + \beta) + F_c \sin(\alpha + \beta) \\ F_s = \mu F_{N2} \\ F_c = m_s \omega^2 R_s \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \end{cases} \quad (3)$$

式中 G ——种子重力,N

α ——排种勺安装位置前倾角,(°)

β ——排种盘带动排种勺转动角,(°)

F_s ——种子与排种勺型孔之间的滑动摩擦力,N

m_s ——种子质量,g

a_2 ——种子在排种勺型孔内滑动加速度,m/s²

F_{N2} ——排种勺型孔面对种子的支撑力,N

F_c ——种子受排种盘转动产生的离心力,N

μ ——种子与排种勺型孔间摩擦因数,取0.039

ω ——排种勺随排种盘转动角速度,rad/s

R_s ——排种勺内种子中心到排种盘中心的距离,m

n ——排种盘匀速圆周转速,r/min

通过图6以及公式(3)分析可知,投种区内种子从排种勺型孔内滑动的条件应满足 $a_2 \geq 0$,种子在排种勺型孔内滑动加速度 a_2 主要与前倾角 α 、排种勺转动角 β 、排种勺内种子中心到排种盘中心的距离 R_s 、种子与排种勺间摩擦因数 μ 以及排种盘匀速圆周转速 n 有关,由于所设计排种器主要用于大棚作业的手推式播种机上,因此排种盘匀速圆周转速 n 以及排种勺型孔中心对应的半径 R 都较小,因此种子在排种勺内清、投种效果主要由前倾角 α 以及排种勺转动角 β 所决定,当增加排种勺安装位置的前倾角时,排种勺内的种子还没进入投种区种子就在清种区开始滑落,致使清种区域减小,容易造成多粒率增加,当减小排种勺安装位置的前倾角时,排种勺内的种子在进入投种区一段时间种子才开始滑落,致使清种区域增加,容易造成空粒率增加,同时由于充种区挤压力 F_i 与支撑力 F_{N1} 也都与排种勺安装位置的前倾角 α 有关,因此种子在排种勺内最好的充种效果也主要由前倾角 α 所决定,当排种勺安装位置的前倾角过小时,使充种区内的种子进入到排种勺内的难度增加,当排种勺安装位置的前倾角过大时,充种区排种勺内的种子在通过种堆时容易发生脱落,综合考虑,排种勺安装前倾角为 60°,在整个充种、清种以及投种过程中,种子只与排种勺接触,避免了种子多接触部件造成摩擦损伤。

2.4 排种勺数量

排种盘周向安装排种勺的安装数量计算式为

$$Q = \frac{60v_m}{ns} \quad (4)$$

式中 Q ——排种盘周向位置上排种勺数量,个

v_m ——手推式播种机播种前进方向速度,m/s

s ——萝卜播种株距,m

通过公式(4)进行分析,排种勺数量主要和播种机播种前进方向速度 v_m 、排种盘匀速圆周转速 n 以及播种株距 s 有关,选取大棚作业,大棚规格一般为高 2~3 m、长 40~60 m、宽 8~10 m 的钢结构大棚^[15],手推式播种机在大棚内前进时播种作业速度为 0.3~0.7 m/s^[16],萝卜播种株距一般为 15~17 cm^[10],排种盘转速主要采用 GPS 接收器采集手推式播种机的前进速度实时调节排种盘转速,排种盘由于安装空间有限直径不宜过大导致排种盘曲率减小,由于曲率不高排种勺投种转过的角度增大,为防止投种不及时的现象从而导致多粒率增加,排种勺数量不宜过多,综合考虑,当播种机播种前进方向速度为 0.6 m/s、播种株距为 15 cm、排种盘匀速圆周转速为 40 r/min 时,计算可得排种盘侧面悬置周向位置上布置排种勺数量为 6 个,排种器由于此布置方式在投种工作过程中只有排种勺与种子接触,可有效降低种子损伤率。

2.5 排种管设计

排种管入种口主要由排种勺内种子投种开始到结束运动过程中排种盘转过的角度所决定,由式(3)可知,排种勺内种子在合力的综合作用下从排种勺内滑动到排种管内,种子在排种勺内下滑运动的下滑加速度公式为

$$a_2 = \frac{G\sin(\alpha + \beta) - F_c\cos(\alpha + \beta) - F_s}{m_s} \quad (5)$$

排种勺内种子从排种勺滑动进入排种管入种口到完全脱离排种勺所需要的时间为

$$t = \sqrt{\frac{l}{a_2}} =$$

$$\sqrt{\frac{l}{(g - \mu\omega^2 R)\sin(\alpha + \beta) - (\omega^2 R + \mu g)F_c\cos(\alpha + \beta)}} \quad (6)$$

式中 l ——种子从排种勺内完全脱离运动的距离,m

t ——种子从排种勺内完全脱离运动的时间,s

种子从排种勺内运动完全脱离排种盘转过的角度即排种管入种口角度,入种口角度计算公式为

$$\varphi = \frac{180vt}{\pi R} \quad (7)$$

式中 φ ——排种管入种口圆心角,(°)

v ——种子在排种勺内运动速度,m/s

排种管入种口圆心角 φ 主要与种子运动距离 l 、排种盘角速度 ω 、排种勺安装位置的前倾角 α 、排种盘带动排种勺转动角 β 有关,同时考虑到种子投种过程中的波动性,需将排种管入种口处的圆心角增大 1%,这样避免种子投种过程空粒率的增加,综合以上考虑,排种管入种口圆心角为 78°,排种管入种口处圆心角如图 7 所示。

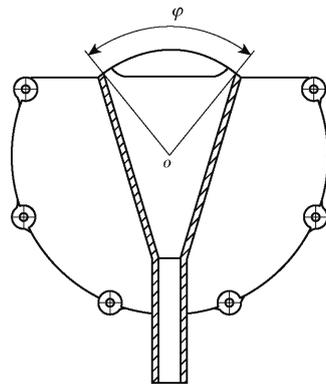


图7 排种管入种口处圆心角示意图

Fig.7 Schematic of center angle at seed inlet of seeding tube

3 EDEM 离散元优化仿真

排种勺型孔参数是保证排种器工作性能的关键因素,排种勺型孔尺寸直接影响单粒率,排种勺型孔尺寸越大多粒率越大,排种勺型孔尺寸越小空粒率越大,为确定排种勺型孔尺寸,应用 EDEM 软件建立仿真模型,主要分析排种勺型孔各参数的变化对单粒率、多粒率、空粒率的影响,最终确定排种勺型孔的结构尺寸。

3.1 排种器性能仿真

3.1.1 仿真参数

由于萝卜种子表面光滑且无黏附力,设置 Hertz-Mindlin 作为种间以及种子与排种器的接触模型^[17],该种间接触模型主要应用静弹性接触模型进行处理,能有效处理种间曲面接触问题^[18-19],并通过种子物料标定对种子-种子、种子-壁面(材料为 PLA 塑料)各物料参数以及相互间接触参数进行设定,如表 2 所示。

3.1.2 种子模型建立

由于萝卜种子的形状为沿着厚度方向的三棱形,可在 EDEM 软件内部由圆球形拼接而生成,通过随机选取百粒种子进行数据测量,对种子数据进行分析计算得到其直径服从正态分布,且半径标准差为 0.07 mm,种子离散化模型如图 8 所示。

3.1.3 排种器仿真模型建立及参数设置

利用 Solidworks 进行排种器等比例建模^[20],为

表2 EDEM 仿真参数

Tab.2 Simulation parameter setting measurement

| 项目 | 参数 | 数值 |
|---------------|--|--------------------|
| 萝卜种子 | 泊松比 | 0.41 |
| | 剪切模量/Pa | 1.29×10^8 |
| | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 120.06 |
| PLA 塑料壁面 | 泊松比 | 0.30 |
| | 剪切模量/Pa | 1.04×10^7 |
| | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 290 |
| 萝卜种子-萝卜种子 | 碰撞恢复系数 | 0.188 |
| | 静摩擦因数 | 0.80 |
| | 滚动摩擦因数 | 0.103 |
| 萝卜种子-PLA 塑料壁面 | 碰撞恢复系数 | 0.29 |
| | 静摩擦因数 | 0.53 |
| | 滚动摩擦因数 | 0.039 |

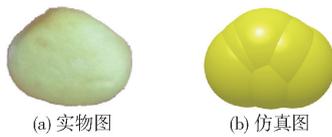


图8 萝卜种子离散元仿真模型

Fig.8 Discrete element simulation model for radish seeds

为了提高 EDEM 仿真速度需对排种器模型进行简化^[21],简化后模型主要由外壳体、排种盘、排种勺、内壳体、虚拟工厂组成,并将模型保存为 igs 格式导入到 EDEM 中,设定排种盘转速为 40 r/min,并且种子群落由虚拟工厂生成,生成仿真种子个数为 300 个,种子生成速度为 1 500 个/s,种子群落下落速度主要由重力加速度提供,设置仿真时间步长比例为 18%,排种器 EDEM 仿真模型如图 9 所示。

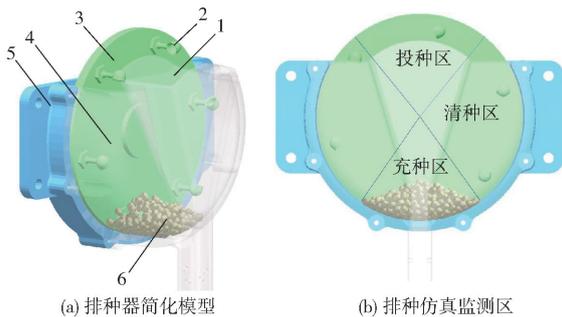


图9 排种器 EDEM 仿真模型

Fig.9 EDEM simulation model of seed metering device

1. 排种管 2. 排种勺 3. 排种盘 4. 外壳体 5. 内壳体 6. 种群

3.1.4 排种器投种过程

为了较好地观察种子仿真运动过程,设置外壳体透明度为 0.2,排种盘以转速 40 r/min 做匀速圆周运动同时带动排种勺运动,从排种勺开始进入种堆充种区截取不同时刻运动状态图,如图 10 所示,当排种勺运动到充种区时,种子依靠自身重力和种间相互挤压力的共同作用,充种进入到排种勺内,当排种盘从充种区转动到清种区,排种勺内多余的种

子主要由于自身重力重新回落到种堆中,最终排种勺到达投种区,排种勺内种子主要通过重力克服离心力以及摩擦力产生的阻力使种子从排种勺内脱落,经过排种管到达种沟土壤里,最终完成了充种、清种、投种的整个过程,为更好地观察目标种子位置变化状态,以位置标定种群颜色,选取目标种子表现形式为 stream,种群颜色表示种子移动位置,目标种子整个仿真运动过程所在位置如图 11 所示。

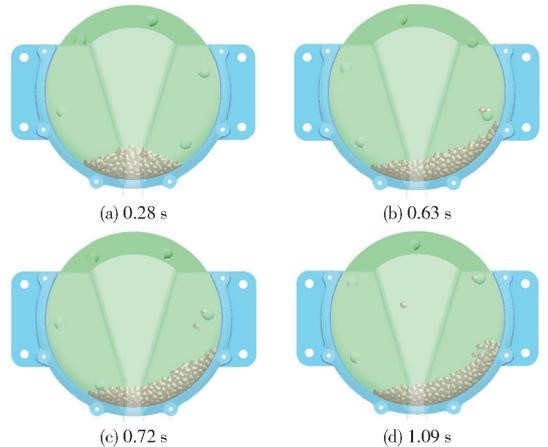


图10 不同时刻目标种子投种运动状态时序图

Fig.10 Time sequence diagrams of target seed seeding motion at different times

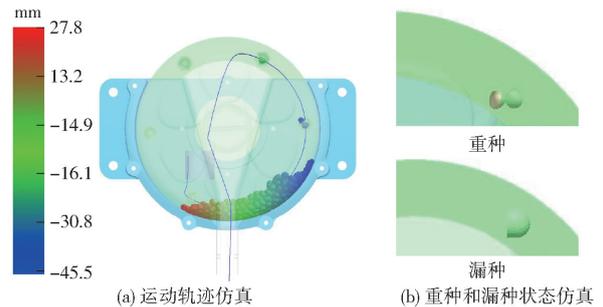


图11 单粒种子投种仿真运动轨迹位置图

Fig.11 Location map of entire simulation motion trajectory for single seed implantation

正常情况是一勺一粒种子,还有重种与漏种情况,重种是当排种勺经过清种区时,多余种子没在清种区内清种而跟随排种勺内种子共同到达排种管上方,此时排种勺内两粒种子共同从排种勺内脱落经过排种管投种到种沟内,造成重播现象,重播现象的出现还可能由于种子服从正态分布,有部分小尺寸种子以倾斜的状态填充到排种勺内有关。漏种是由于种子没到投种区就因为自身重力大于摩擦力以及离心力,在清种区进行投种。

3.2 参数仿真优化

3.2.1 试验因素与试验指标

由于排种勺型孔参数是影响排种勺投种的关键因素,因此选取排种勺型孔直径、型孔深度和放样曲

面圆角比为试验因素,选取单粒率 y_1 、多粒率 y_2 和空粒率 y_3 为试验指标。

3.2.2 试验方法

采用三因素五水平二次回归正交旋转组合设计试验的方法^[22-23],建立试验因素对试验指标影响的回归模型,并对影响试验指标的试验因素进行优化,试验因素编码见表3。

表3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and codes

| 编码 | 因素 | | |
|--------|-----------------|-----------------|------------|
| | 型孔直径 | 型孔深度 | 排种勺放样曲 |
| | x_1/mm | x_2/mm | 面圆角比 x_3 |
| 1.682 | 5.700 | 5.200 | 0.400 |
| 1 | 5.497 | 4.855 | 0.319 |
| 0 | 5.200 | 4.350 | 0.200 |
| -1 | 4.903 | 3.845 | 0.081 |
| -1.682 | 4.700 | 3.500 | 0 |

3.2.3 试验结果与分析

三因素五水平二次通用旋转组合设计试验方案以及 EDEM 仿真结果如表4所示,使用 Design-Expert 10.0.3 软件对试验数据开展回归分析,采用处理试验因素之间相关关系的统计方法,确定了试验指标在各个试验因素影响下的回归方程,模型的回归方程方差分析如表5所示,在回归模型中,单粒率、多粒率、空粒率均为极显著,失拟项检验结果均为不显著,说明回归模型在试验范围拟合程度较好。

表5 回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of regressions equation

| 方差来源 | 单粒率 y_1 | | | | | 多粒率 y_2 | | | | | 空粒率 y_3 | | | | |
|----------|-----------|-----|-------|-------|---------|-----------|-----|--------|------------------------|----------|-----------|-----|-------|-------|----------|
| | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P |
| 模型 | 181.39 | 9 | 20.15 | 13.15 | 0.000 2 | 327.36 | 9 | 36.37 | 9.78 | 0.000 7 | 106.93 | 9 | 11.88 | 9.70 | 0.000 7 |
| x_1 | 40.09 | 1 | 40.09 | 26.15 | 0.000 5 | 217.23 | 1 | 217.23 | 58.41 | <0.000 1 | 70.68 | 1 | 70.68 | 57.69 | <0.000 1 |
| x_2 | 27.95 | 1 | 27.95 | 18.23 | 0.001 6 | 68.75 | 1 | 68.75 | 18.49 | 0.001 6 | 9.03 | 1 | 9.03 | 7.37 | 0.021 8 |
| x_3 | 6.99 | 1 | 6.99 | 4.56 | 0.058 5 | 3.49 | 1 | 3.49 | 0.94 | 0.355 8 | 0.60 | 1 | 0.60 | 0.49 | 0.498 5 |
| x_1x_2 | 2.31 | 1 | 2.31 | 1.51 | 0.247 6 | 0.21 | 1 | 0.21 | 0.057 | 0.816 4 | 3.92 | 1 | 3.92 | 3.20 | 0.103 9 |
| x_1x_3 | 0.91 | 1 | 0.91 | 0.59 | 0.458 6 | 0.36 | 1 | 0.36 | 0.097 | 0.761 7 | 0.13 | 1 | 0.13 | 0.10 | 0.756 0 |
| x_2x_3 | 13.26 | 1 | 13.26 | 8.65 | 0.014 8 | 9.46 | 1 | 9.46 | 2.54 | 0.141 8 | 0.32 | 1 | 0.32 | 0.26 | 0.620 4 |
| x_1^2 | 47.79 | 1 | 47.79 | 31.17 | 0.000 2 | 17.43 | 1 | 17.43 | 4.69 | 0.055 6 | 7.50 | 1 | 7.50 | 6.12 | 0.032 9 |
| x_2^2 | 49.67 | 1 | 49.67 | 32.40 | 0.000 2 | 12.28 | 1 | 12.28 | 3.30 | 0.099 2 | 12.56 | 1 | 12.56 | 10.25 | 0.009 5 |
| x_3^2 | 5.52 | 1 | 5.52 | 3.60 | 0.086 9 | 0.035 | 1 | 0.035 | 9.380×10^{-3} | 0.924 8 | 6.44 | 1 | 6.44 | 5.25 | 0.044 9 |
| 残差 | 15.33 | 10 | 1.53 | | | 37.19 | 10 | 3.72 | | | 12.25 | 10 | 1.23 | | |
| 失拟 | 9.88 | 5 | 1.98 | 1.81 | 0.264 6 | 25.34 | 5 | 5.07 | 2.14 | 0.211 9 | 10.11 | 5 | 2.02 | 4.72 | 0.056 8 |
| 误差 | 5.45 | 5 | 1.09 | | | 11.85 | 5 | 2.37 | | | 2.14 | 5 | 0.43 | | |
| 总和 | 196.72 | 19 | | | | 364.55 | 19 | | | | 119.18 | 19 | | | |

对于空粒率模型, x_1 、 x_2^2 影响为极显著 ($P < 0.01$), x_2 、 x_1^2 、 x_3^2 影响为显著 ($P < 0.05$), 其余项无

表4 试验方案及试验结果
Tab.4 Experimental project and result

| 编号 | 因素 | | | 单粒率 $y_1/\%$ | 多粒率 $y_2/\%$ | 空粒率 $y_3/\%$ |
|----|-----------------|-----------------|-------|--------------|--------------|--------------|
| | x_1/mm | x_2/mm | x_3 | | | |
| 1 | 4.903 | 3.845 | 0.081 | 89.5 | 3.9 | 6.6 |
| 2 | 5.497 | 3.845 | 0.081 | 87.9 | 11.8 | 0.3 |
| 3 | 4.903 | 4.855 | 0.081 | 92.2 | 4.0 | 3.8 |
| 4 | 5.497 | 4.855 | 0.081 | 86.3 | 13.0 | 0.7 |
| 5 | 4.903 | 3.845 | 0.319 | 90.2 | 3.0 | 6.8 |
| 6 | 5.497 | 3.845 | 0.319 | 87.8 | 11.8 | 0.4 |
| 7 | 4.903 | 4.855 | 0.319 | 85.6 | 9.2 | 5.2 |
| 8 | 5.497 | 4.855 | 0.319 | 83.2 | 15.6 | 1.2 |
| 9 | 4.700 | 4.350 | 0.200 | 90.5 | 2.0 | 7.5 |
| 10 | 5.700 | 4.350 | 0.200 | 83.9 | 15.3 | 0.8 |
| 11 | 5.200 | 3.500 | 0.200 | 90.5 | 2.4 | 7.1 |
| 12 | 5.200 | 5.200 | 0.200 | 83.7 | 13.9 | 2.4 |
| 13 | 5.200 | 4.350 | 0 | 90.8 | 5.4 | 3.8 |
| 14 | 5.200 | 4.350 | 0.400 | 90.4 | 5.4 | 4.2 |
| 15 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 93.9 | 4.3 | 1.8 |
| 16 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 90.8 | 8.8 | 0.4 |
| 17 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 92.4 | 5.4 | 2.2 |
| 18 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 92.6 | 6.6 | 0.8 |
| 19 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 92.0 | 6.6 | 1.4 |
| 20 | 5.200 | 4.350 | 0.200 | 91.6 | 7.2 | 1.2 |

对于单粒率, x_1 、 x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 影响为极显著 ($P < 0.01$), x_2x_3 影响为显著 ($P < 0.05$), 其余项无显著影响 ($P > 0.05$)。

对于多粒率, x_1 、 x_2 影响为极显著, 其余项无影响 ($P > 0.05$)。

影响 ($P > 0.05$)。

剔除回归方程中影响不显著因素, 单粒率 y_1 、

多粒率 y_2 、空粒率 y_3 回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = -554.72 + 201.28x_1 + 62.59x_2 + 87.16x_3 - \\ \quad 21.42x_2x_3 - 19.91x_1^2 - 7.03x_2^2 \\ y_2 = -82.14 + 13.42x_1 + 4.44x_2 + 4.25x_3 \\ y_3 = 339.47 - 92.52x_1 - 33.40x_2 - 17.13x_3 + \\ \quad 8.16x_1^2 + 3.65x_2^2 + 47.25x_3^2 \end{cases} \quad (8)$$

3.2.4 试验因素对试验指标的影响

各试验因素对单粒率影响的响应曲面如图 12 所示,通过响应曲面图可以直观观察到,随着排种勺型孔深度的增加,单粒率先增加后降低,原因是排种勺经过充种区进入清种区时稳定在型孔内的能力逐渐增加,导致型孔内的种子更难脱离排种勺型孔,随着排种勺放样曲面圆角比的增加,单粒率先缓慢增加后降低,原因是放样曲面圆角增大,种子相互挤压更容易充种进入型孔内,同时在清种区种子脱离排种勺型孔的概率也增加。

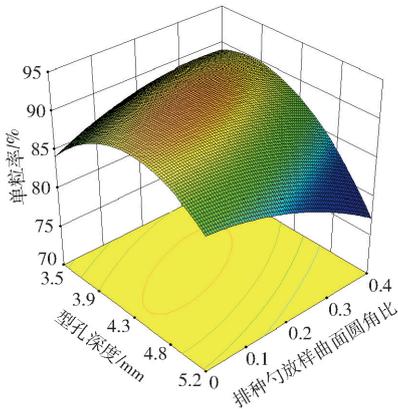


图 12 排种勺型孔深度与放样曲面圆角比对单粒率影响响应曲面

Fig. 12 Response surface of the effect of the interaction between the depth of seeding spoon hole and the release surface rounding ratio on single seed rate

通过方差分析可知,排种勺放样曲面圆角比对试验指标的影响较小,根据农艺要求使单粒率增加,空粒率降低,结合图 12 分析得到种勺放样曲面圆角比为 0.12。

3.2.5 参数优化

参考标准 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》作业性能指标中种子粒距在 10 ~ 20 cm 范围时的标准,由于本文研究的是萝卜精量播种,其参考值要高于机械行业标准,综合考虑,设定单粒率大于 92%,多粒率小于 6%,空粒率小于 4%。在最优种勺放样曲面圆角比为 0.12 时,优化结果为:排种勺型孔直径在 4.88 ~ 5.23 mm 之间,排种勺型孔深度在 3.93 ~ 4.67 之间,优化区间如图 13 所示。

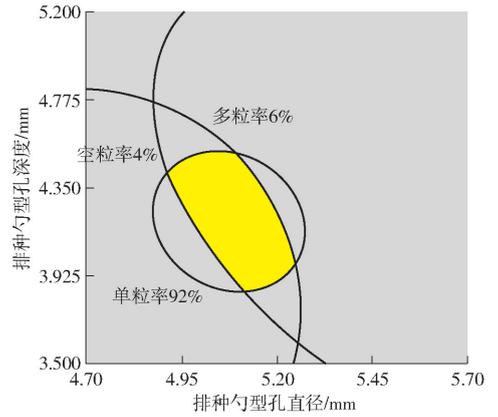


图 13 参数优化结果

Fig. 13 Parameter optimization results

为达到排种器最优排种效果,根据优化区间,最终选取排种勺型孔直径为 5 mm、排种勺型孔深度为 4.3 mm、排种勺放样曲面圆角比为 0.12,根据 EDEM 仿真软件验证最终计算得出优化后单粒率为 93%,多粒率为 4%,空粒率为 3%,满足参数优化范围,同时证明了最终参数优化的准确性。

4 样机验证试验

4.1 台架试验

为了验证 EDEM 仿真软件优化后的实际排种效果,根据最终优化参数设计排种器排种勺型孔尺寸,利用 3D 快速打印技术加工出排种器并将排种器装配到播种机上进行台架验证试验,根据萝卜播种实际农艺要求,萝卜理论播种株距设置为 15 cm,传送带传送速度主要模拟播种机播种前进方向速度,因此设置传送带传送速度为 0.3 ~ 0.7 m/s,对应排种器匀速圆周转速 n 为

$$n = \frac{60v_m}{sQ} \quad (9)$$

因此根据公式(9)计算取整设置播种机驱动电机控制器转速为 20 ~ 47 r/min,控制器主要控制播种机中排种器的转速,由于手推式播种机作业速度会在一定范围变动,为更好地展现排种器作业适应性效果,选取 5 组不同作业速度 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m/s 对应的不同排种盘转速 20、27、33、40、47 r/min,进行台架试验验证,台架试验中铺砂装置铺石英砂功能主要模拟田间真实的土壤,使种子落在石英砂表面不发生弹跳,根据国家标准 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,于东北林业大学智能农机装备工程实验室对该播种机样机进行台架试验,通过三角尺测量台架试验后种间株距,如图 14 所示。

台架试验结束后利用直尺测量石英带上播种后种间的距离,通过测量得到合格、重播和漏播的种

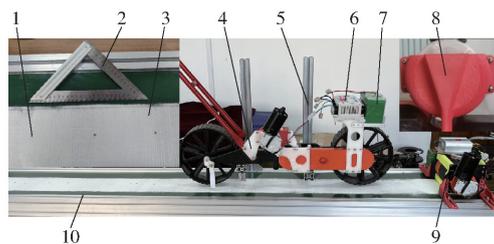


图14 自制萝卜精量排种器试验台架

Fig. 14 Test device for homemade radish precision seeding

1. 种子 2. 三角尺 3. 石英砂 4. 播种机 5. 播种机安装支架
6. 播种机驱动电机控制器 7. 播种机驱动电机 8. 排种器
9. 自制铺砂机 10. 传送带

子, I 为理论种间距离, d 为测量种间距离, 当 $0.5I < d \leq 1.5I$ 时, 排种器播种质量合格, 当 $d \leq 0.5I$ 时, 排种器重播, $d > 1.5I$ 时, 排种器漏播。

排种器排种评价指标主要为排种器合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 、漏播指数 Y_3 。

台架试验重复3次, 通过计算排种器性能指标平均值, 得到排种器台架试验最终播种合格指数、重播指数、漏播指数, 见表6。

表6 台架试验结果
Tab. 6 Bench test results

| 编号 | 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 合格指数/ % | 重播指数/ % | 漏播指数/ % |
|----|--------------------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 20 | 91.5 | 5.6 | 2.9 |
| 2 | 27 | 91.8 | 5.1 | 3.1 |
| 3 | 33 | 92.0 | 4.8 | 3.2 |
| 4 | 40 | 92.2 | 4.6 | 3.2 |
| 5 | 47 | 92.1 | 4.4 | 3.5 |

台架试验结果表明误差均小于3%, 符合正常误差范围^[24], 随着排种盘转速增加, 合格指数先增加后略微减小, 重播指数减小, 漏播指数增加, 原因是转速增加, 离心力增加, 投种初速度增加, 投种距离增加, 同时排种器转速40 r/min时仿真优化结果与台架试验结果相对误差分别为0.86%、15%、6.67%, 造成误差的原因是仿真中种子由球体拼接而成, 与实际有差异, 并且结果都符合JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》作业性能指标的标准, 证明此排种器精量播种性能良好。

同时与传统机械式排种器如毛刷窝眼轮式排种器进行损伤率对比台架试验, 并按照NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》中机械式排种器种子破损率小于等于1.5%的要求, 台架试验结束后收集石英带上播种后种子, 通过观察得到排种器播种过程中部件对种子产生可见的损伤, 种子损伤率 ϕ 计算式为

$$\phi = \frac{e}{E} \times 100\% \quad (10)$$

式中 e ——可见损伤种子数量, 个

E ——收集后种子总数量, 个

台架试验重复3次, 通过式(10)计算得到本文设计排种器与传统排种器种子损伤率平均值为0.43%和1.27%, 都满足农业行业标准, 相对误差为66.14%, 相比而言本文所设计排种器很大程度降低了投种过程中种子损伤。

4.2 田间试验

为进一步验证排种器精量播种的工作性能, 于2023年9月6日在哈尔滨剑桥学院试验田将排种器装配到播种机上进行田间试验, 试验前利用旋耕机进行旋耕整地, 整地后土壤含水率为20.42%, 土壤紧实度为1.23 MPa, 由于含水率不能满足萝卜播种农艺要求, 因此播种后需要对作业面洒水, 设定萝卜播种深度为2~3 cm, 播种株距为15 cm, 由于是手推式播种机进行播种作业, 播种速度一般在0.3~0.7 m/s 范围内变化, 播种6 d后, 选取2行, 利用钢板尺测量幼苗之间的株距, 如图15所示, 排种器播种合格指数为90.5%, 重播指数为6.9%, 漏播指数为2.6%, 且符合JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》作业性能指标的标准, 进一步证明此排种器播种作业性能良好。



图15 田间试验及出苗效果

Fig. 15 Field test and seedling emergence effect

5 结论

(1) 针对红萝卜种子形状不规则以及表皮容易破损极易造成排种过程中充种困难以及伤种的问题, 设计了红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器。通过理论分析的方法确定了影响排种器排种性能的主要因素为排种勺型孔直径、排种勺型孔深度和排种勺放样曲面圆角比。

(2) 通过 EDEM 仿真软件建立不同结构参数的排种器模型, 以单粒率、多粒率和空粒率为试验指标, 排种勺型孔直径、排种勺型孔深度和排种勺放样曲面圆角比为试验因素进行二次通用旋转组合设计试验, 利用 Design-Expert 10.0.3 软件对试验数据进行回归分析得出试验因素对试验指标影响的变化关

系,当排种勺放样曲面圆角比为0.12时,根据优化区间内最终选取排种勺型孔直径为5 mm,排种勺型孔深度为4.3 mm,可获得单粒率为93%,多粒率为4%,空粒率为3%。

(3)为验证优化分析结果的正确性,通过台架试验以及田间试验以红萝卜种子为试验材料进行验证试验。台架试验结果为:排种器播种合格指数平均值92.2%,重播指数平均值4.6%,漏播指数平均值3.2%,仿真试验与台架试验结果的相对误差分别为0.86%、15%、6.67%,田间试验排种器播种的

合格指数为90.5%,重播指数为6.9%,漏播指数为2.6%,都符合JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》作业性能指标的标准,所以该排种器精量播种性能良好。

(4)为验证排种器工作过程中是否降低了种子损伤程度,该排种器与传统机械式排种器:毛刷窝眼轮式排种器进行损伤率对比试验,台架试验后种子损伤率分别为0.43%、1.27%,相对误差为66.14%,表明该排种器在工作过程中降低了种子损伤程度。

参 考 文 献

- [1] 尚艳芳. 红萝卜生长气象条件分析[J]. 农业与技术, 2019,39(10):147-148.
- [2] 张英,隋香菊. 沙苑红萝卜全人工栽培与简单机械化栽培比较[J]. 现代农业科技, 2021(20):80-81.
- [3] 何瑞银,王建林,徐高明,等. 限制充种姿态-负压式小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):39-49,167.
HE Ruiyin,WANG Jianlin,XU Gaoming, et al. Design and experiment of wheat precise seed metering apparatus with positive and negative pressure with function of limiting seed filling posture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):39-49,167. (in Chinese)
- [4] 李骅,马云龙,於海明,等. 群组吸孔气吸式芹菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):87-95.
LI Hua,MA Yunlong,YU Haiming, et al. Design and experiment of group air-suction type celery seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):87-95. (in Chinese)
- [5] 瞿书涯. 型孔式小区精密播种关键部件设计与试验[D]. 南京:南京农业大学,2016.
QU Shuya. Design and experimental evaluation on a shaped orifice precision plot seeder [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [6] 赵明明,胡军. 油菜排种器的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017,39(8):127-132.
ZHAO Mingming,HU Jun. Design and experimental research on metering device for rape seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(8):127-132. (in Chinese)
- [7] 王宝山,王磊,廖宜涛,等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):64-75,119.
WANG Baoshan,WANG Lei,LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hole-seeding centralized metering device for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):64-75,119. (in Chinese)
- [8] 李纪超. 舀勺式小粒径蔬菜种子精量排种器机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
LI Qichao. Mechanism analysis and experimental study on scoop type precision seed metering device for small size vegetable seeds[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [9] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [10] 崔磊,甘彩霞,严承欢,等. 香楚春红萝卜高产栽培技术[J]. 长江蔬菜,2022(23):15-16.
- [11] 苏微,陈子威,赖庆辉,等. 轮勺式半夏精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):60-71.
SU Wei,CHEN Ziwei,LAI Qinghui, et al. Design and test of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):60-71. (in Chinese)
- [12] 刘龙,孙千涛,钱凯,等. 基于EDEM的种窝可调式内充种花生排种器的设计与试验[J]. 河北农业大学学报,2023,46(2):110-117.
LIU Long,SUN Qiantao,QIAN Kai, et al. Design and experimental analysis of peanut metering device with adjustable inner filling of seed nest based on EDEM[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2023,46(2):110-117. (in Chinese)
- [13] 刁怀龙,张银平,刁培松,等. 基于EDEM的小麦宽苗带深松免耕播种机设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(1):58-62.
DIAO Huailong,ZHANG Yinping,DIAO Peisong, et al. Design and experiment of a no-tillage and wide band wheat planter with subsoilers based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1):58-62. (in Chinese)
- [14] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勺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 wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):75-84. (in Chinese)
- [15] 王崇庚,莫定仪. 萝卜栽培技术[J]. 现代园艺,2022,45(22):28-30.
- [16] ANIL C,HABIB K,SAHIN M. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters—part II: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,145:11-17.

- WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 100-107. (in Chinese)
- [31] 谢方平, 吴正阳, 王修善, 等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 39-47.
- XIE Fangping, WU Zhengyang, WANG Xiushan, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 39(13): 39-47. (in Chinese)
- [32] WANG Y, ZHANG Y, YANG Y, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400-414.
- [33] HU Y, XIANG W, DUAN Y, et al. Calibration of ramie stalk contact parameters based on the discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13(5): 1070.
- [34] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181-187.
- SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181-187. (in Chinese)
- [35] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.
- WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98. (in Chinese)
- [36] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116-123.
- XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116-123. (in Chinese)
- [37] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49-56.
- ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 86 页)

- [17] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌, 等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 23-34.
- DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 23-34. (in Chinese)
- [18] 陈美舟, 刁培松, 张银平, 等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 8-16.
- CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8-16. (in Chinese)
- [19] 顿国强, 于春玲, 杨永振, 等. 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 62-73.
- DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 62-73. (in Chinese)
- [20] 顿国强, 刘文辉, 毛宁, 等. 交替换岗式大豆小区育种排种器优化设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(1): 285-296.
- DUN Guoqiang, LIU Wenhui, MAO Ning, et al. Optimization design and experiment of alternate post changing seed metering device for soybean plot breeding[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 285-296. (in Chinese)
- [21] 丁力, 豆宇飞, 王万章, 等. 组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 100-115.
- DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 100-115. (in Chinese)
- [22] 张学军, 程金鹏, 史增录, 等. 摆动夹取式玉米精量排种器取种性能仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 38-50.
- ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 38-50. (in Chinese)
- [23] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 108-119.
- DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 108-119. (in Chinese)
- [24] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30-38.
- WU Mengchen, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 30-38. (in Chinese)