

基于 EDEM – RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化

张红梅 张晨明 李志杰 丁力 朱晨辉 张静
(河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002)

摘要: 为降低振动对指夹式排种器排种性能的影响,设计了一种具有辅助夹持结构的玉米指夹式排种器,阐述了指夹式排种器工作原理,并对辅助夹持的指夹和种盘等各关键构件结构进行了优化设计,建立了指夹夹持动力学模型。运用 RecruDyn 软件建立排种器虚拟样机模型,基于玉米籽粒特性在 EDEM 软件中构建玉米籽粒颗粒,通过 EDEM – RecurDyn 耦合仿真模拟了振动条件下排种器充种、携种及排种过程,分析对指夹式排种器排种性能影响的主要因素。最后结合台架试验,选取排种器作业速度、振动幅值和振动频率为试验因素,以排种器合格指数和漏播指数为试验指标进行排种性能试验验证。研究表明,指夹打开 28.65°夹持玉米籽粒时,符合指夹式排种器在振动条件下的运动过程,耦合仿真分析结果与指夹式排种器实际运动过程基本一致,夹持过程中指夹和种盘共同配合下能够有效降低振动对排种器夹持性能的影响,满足设计要求;当作业速度为 3.8 km/h、振动幅值为 5 mm、振动频率为 32.52 Hz 时,排种器合格指数和漏播指数分别为 91.0%、6.68%,排种器台架验证试验得出该参数组合下排种器排种合格指数为和漏播指数分别为 90.0%、7.1%,与理论优化值非常接近,证明辅助夹持结构在排种作业中可以保持较好的稳定性,使得排种器具有良好的排种效果,满足精密播种作业要求,为玉米精密播种装置的改进设计提供参考。

关键词: 玉米指夹式排种器; 振动特性; EDEM; RecurDyn

中图分类号: S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0036-11

Simulation Analysis and Optimization of Vibration Characteristics of Corn Finger Clip Seeding Device Based on EDEM – RecurDyn Coupling

ZHANG Hongmei ZHANG Chenming LI Zhijie DING Li ZHU Chenhui ZHANG Jing
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To reduce the influence of vibration on the performance of the finger clip seed catcher, a corn finger clamp seed feeder with auxiliary clamping structure was designed, and the working principle was described. Besides, the key components of the auxiliary clamp were optimized, and the dynamic model of finger clip seed catcher was established. RecruDyn software was utilized to establish the virtual prototype model of seed discharge device, and corn grain particles were constructed in EDEM software based on the characteristics of corn grains. The process of seed filling, seed carrying and seed discharge in the seed discharge device under vibration conditions was simulated by EDEM – RecurDyn coupling simulation, and the main influencing factors on the performance of finger clip seed dispenser were analyzed. Finally, combined with bench tests, the operation speed, vibration amplitude and vibration frequency of the seed feeder were selected as the test factors, and the qualified index and leakage index served as the test indexes to verify the seed performance. Results showed that the simulation result showed that when the finger clip was opened at 28.65°, the corn grains were gripped, which was consistent with the motion process of the finger clip seed separator under vibration. The results of coupling simulation were basically consistent with the actual motion process of the finger clamp seed feeder. The influence of vibration on the holding performance of the finger clamp can be effectively reduced under the cooperation of the finger

clamp and the seed tray, and the design requirements can be met. When the operating speed was 3.8 km/h, the vibration amplitude was 5 mm, and the vibration frequency was 32.52 Hz, the qualified index and missing sowing index of the seed feeder were 91.0% and 6.68%, respectively. It was combined with further tests that the parameter combination metering qualified index was 90.0% and the missing sowing index was 7.1%, which proved the theory of optimal value was close to the actual tests. It was illustrated that the auxiliary clamping structure can maintain good stability in the planting operation, which made the device have a good seeding effect, and met the requirements of precision seeding operation. It provided a reference for the improved design of new corn precision seeding.

Key words: corn finger clamp seed feeder; vibration characteristic; EDEM; RecurDyn

0 引言

玉米是重要的粮食作物,随着保护性耕作的提出^[1-4],玉米种植面积不断扩大,产量逐年提高,玉米机械化精密播种显得尤为迫切^[5-9]。排种器作为精密播种机的核心部件,其工作性能直接影响播种质量,而田间振动是影响排种器排种特性的重要因素。董帅等^[10]通过构建振动测试系统,在不同工作速度下对免耕播种机的振动性能进行测试,得出最适宜播种速度为 3.6 km/h。陈晨等^[11]运用离散元软件模拟了种群在气吸式排种器排种过程的运动状态,通过仿真实验得出播种作业振幅在 3 mm 对种群的压力值最小。张涛等^[12]对田间作业时免耕播种机排种器振动特性进行了测试与分析,并运用离散元软件模拟了玉米种群的运动规律。刘虎等^[13]运用模态分析与振动测试相结合的方法,研究了气吸式排种器在地表激励下的振动响应,得出排种器在工作过程中不会发生共振现象。黄小珊等^[14]对玉米播种机水平、竖直方向进行了振动测试,得出垂直方向振动对免耕播种机影响较大。当前运用离散元软件可以模拟玉米籽粒模型以及玉米排种器运动过程,但因排种器运动较为复杂,单一的离散元仿真或多体动力学仿真不能较好描述排种过程中籽粒与排种作业部件之间的相互作用关系。随着计算机仿真技术的发展,离散元法(EDEM)与其它有限元法等仿真技术耦合在农业机械结构优化设计领域逐渐得到了应用,以更好地发挥模拟分析复杂动力学问题的优越性。胡建平等^[15]通过 EDEM - RecurDyn 耦合仿真取苗爪插入、夹取、提离过程,分析了取苗爪插入钵体苗深度、开始夹苗深度对取苗时钵体的影响。YAN 等^[16]利用 EDEM 与 MBD 耦合技术,模拟了大豆播种单体的工作过程,分析了大豆籽粒颗粒覆盖后的位置变化。

针对排种器工作过程中易因振动造成漏播现象,本文在前期研究基础上,以玉米排种器为研究对象,结合玉米籽粒物理特性和排种器作业环境特点,提出采用曲面指夹和凸台种盘配合夹持籽粒的结构

方案,保证玉米籽粒在携种过程中不易从指夹中脱落。通过 EDEM 与 MBD 耦合仿真技术,建立指夹式排种器的动力学模型,运用 EDEM - RecurDyn 模拟振动条件下指夹排种器排种性能和籽粒运动轨迹,并结合台架试验,验证结构设计的合理性,分析作业速度、振动频率与振动幅值对排种器排种性能的影响,为玉米精密播种机的设计提供参考。

1 排种器结构与工作原理

玉米指夹式排种器主要由指夹、排种盘、弹簧、调控凸轮、种盖、导种前盖、导种带、导种后盖、齿轮、轴、种箱等部件组成,如图 1 所示。当传动链条驱动齿轮转动时,指夹随轴在排种盘上转动,指夹受排种凸轮的推力张开一定角度进入充种区;当运动至排种凸轮凸起部分时推力消失,指夹在弹簧弹力的夹持闭合下带动籽粒一起运动完成携种并逐渐离开取种区;当指夹运动至种盘凹凸面时,多余的籽粒被清除,指夹继续夹持籽粒运动;经过导种口时,指夹在调控凸轮的推力下使玉米籽粒运送至导种带,籽粒随导种带输送至最下端时,在重力作用下经导种管落至土壤中,完成整个排种过程。

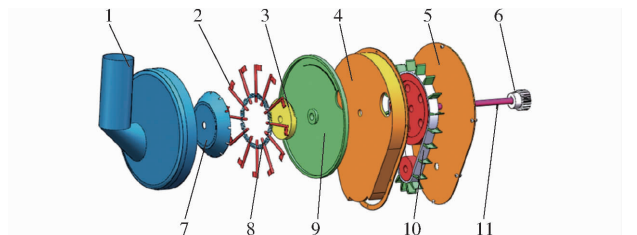


图 1 指夹式排种器结构图

Fig. 1 Structure diagram of finger clip seed dispenser

1. 种箱 2. 指夹 3. 调控凸轮 4. 导种前盖 5. 导种后盖 6. 齿轮 7. 种盖 8. 弹簧 9. 排种盘 10. 导种带 11. 轴

2 排种器关键部件设计

指夹和排种盘是排种器的关键部件之一,其结构尺寸直接影响指夹的夹持性能,从而影响排种器性能。因指夹夹持力易受田间振动条件影响,致使籽粒从指夹中脱落,为保证籽粒能通过指夹夹持稳

定运送至导种带,顺利完成携种过程,本文根据玉米籽粒不同夹持状态,对指夹和排种盘进行结构参数优化。

2.1 指夹设计

如图 2 所示,指夹采用多弧面仿形设计,其结构参数与玉米籽粒尺寸密切相关。指夹弧面过长易导致一次性夹持多粒籽粒,从而导致籽粒经过清种区不易脱落造成籽粒重播;指夹弧面过短易导致籽粒与指夹的接触面积、夹持压力变小,致使指夹在夹持过程中不能有效的夹持籽粒,为保证指夹能平稳夹持平躺、竖直、横卧等姿态的籽粒,并使籽粒能从指夹中顺利脱落,指夹的厚度是稳定夹持玉米籽粒的另一重要因素,厚度过大容易使玉米受力不均,厚度过薄不能起到护种效果。针对籽粒易因振动从指夹中脱落的问题,采用上厚下薄的指夹片结构,使玉米籽粒在较高运动加速度和振动时有一个向上的支撑,从而起到护种的作用。根据玉米籽粒总体尺寸,确定指夹结构参数设计应满足

$$\begin{cases} L < L_2 < L_1 < 2B \\ L_1 = (0.6 \sim 0.7) L_3 \\ S_2 < S_1 < \frac{B}{2} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 B ——玉米籽粒宽度,mm
 L ——玉米籽粒长度,mm
 L_1 ——指夹片长度,mm
 L_2 ——指夹片宽度,mm
 L_3 ——弧面长度,mm
 S_1 ——指夹片下端厚度,mm
 S_2 ——指夹片上端厚度,mm

由此确定指夹片长度 L_1 为 22 mm,指夹片宽度 L_2 为 12 mm,指夹片下端厚度 S_1 为 5 mm,指夹片上端厚度 S_2 为 2 mm。

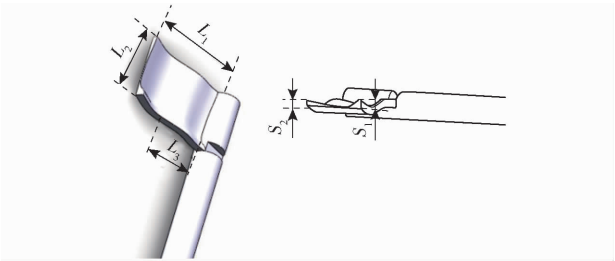


图 2 指夹结构图
Fig. 2 Structure diagram of finger clip

2.2 种盖设计

种盖是指夹的载具,用于固定指夹位置并带动指夹运动。传统指夹安装方式是在种盖上设置两个孔,直接将指夹安装在种盖上,但当外部环境产生振动过大时,指夹在孔内易产生相对位移,经过振动清

种区时会使玉米籽粒受力不均匀,使玉米籽粒从指夹处脱落,落入到排种区等待下一次充种。为保证指夹能有效稳定的夹持携种,本文对种盖结构进行了改进设计,在新的种盖上面开设 24 个凹槽,与 12 个指夹上的两个圆环进行配合,并使用螺丝固定种盖,12 个指夹均匀安装在种盖特定的凹槽内,相邻两指夹之间使用弹簧连接,种盖结构如图 3 所示。当外部振动产生时,由于种盖凹槽对圆环产生支持力大于指夹所受的向心力,指夹只做旋转运动,确保指夹能够稳定夹持籽粒。

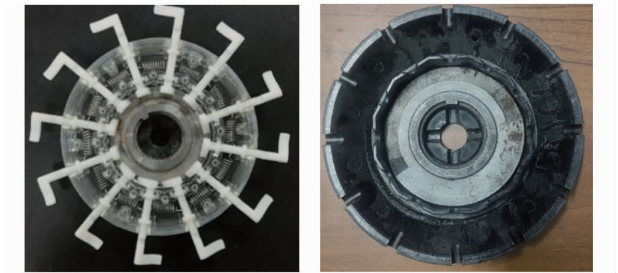


图 3 种盖结构与实物图
Fig. 3 Cover structure and physical diagram

2.3 排种盘设计

排种盘在携种过程中对玉米籽粒提供支持力,其结构直接影响到籽粒的稳定运送。本文在种盘上设有弧形凸台(图 4),使其与指夹的弧形面相配合,共同对玉米籽粒起到护种的作用。根据唐汉^[17]的研究,玉米运送过程中姿态存在差异,在竖直和横卧姿态下,玉米籽粒所受弹簧拉力相对较大,而在平躺姿态下,玉米籽粒与指夹片垂直时,籽粒在进种区达到最大的长度。当进种区凸台与排种盘内壁长度过小时,会使凸台直接与籽粒产生碰撞,导致籽粒直接脱落。因此,弧形凸台的设计应满足

$$\begin{cases} W_1 > L > W_2 > B \\ B > S_1 + H \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 W_1 ——进种区凸台与种盘内壁长度,mm
 W_2 ——出种区凸台与种盘内壁长度,mm
 H ——凸台高度,mm

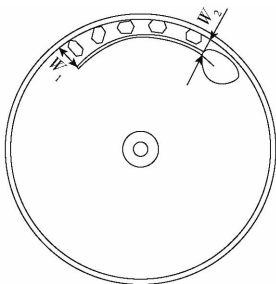


图 4 排种盘结构图
Fig. 4 Structure of seed plate

根据玉米籽粒平均尺寸,确定进种区凸台与种盘内壁长度 W_1 为 15 mm,出种区凸台与种盘内壁长

度 W_2 为 12 mm。因弧形凸台固定在排种盘上,当排种盘运动时不应干涉指夹运动,另指夹直接穿过凸台旋转,带动玉米籽粒送入导种带上,因此指夹凸台不应该大于指夹直径。取指夹直径为 6 mm,以此确定凸台高度 H 为 3 mm。

2.4 指夹夹持力动力学分析

指夹夹持玉米籽粒过程中,籽粒受到指夹的压力、弹簧的拉力、排种盘的支持力和摩擦力等,使指夹能够稳定运送籽粒。为探究稳定夹持运送作业机理,将玉米籽粒、种盘和指夹作为研究对象,对排种过程中玉米籽粒运动至最高点状态进行动力学分析,探究排种器优化设计的合理性。以玉米籽粒为坐标原点,建立空间直角坐标系 $OXYZ$,由图 5 分析可知,玉米主要受到自身重力 G 、振动引起的竖直力 ma 、种盘凸台的支持力 F_{N3} 、指夹的压力 F_{N1} 以及种盘支持力 F_{N2} 综合作用。籽粒因转动受到排种盘的摩擦力 f 分为切向摩擦力 f_1 和法向摩擦力 f_2 。根据空间任意力系的平衡条件可得

$$\sum M = 0 \quad (3)$$

式中 M ——主矩

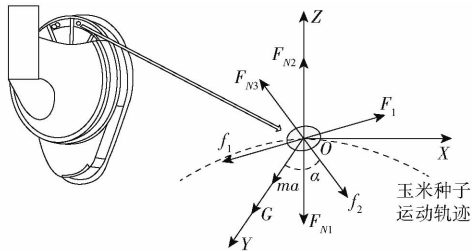


图 5 指夹夹持玉米籽粒受力图

Fig.5 Stress diagram of corn grain held by finger clip

已知各力至原点距离均为 0,因此主矩必为 0,以此列平衡方程

$$\begin{cases} F_{N1} = F_{N2} \\ (G + ma) \sin\alpha + f_1 = F \\ (G + ma) \cos\alpha + f_2 = F_{N3} \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_{N1} ——指夹对籽粒的压力,N
 F_{N2} ——种盘对籽粒的支持力,N
 F_{N3} ——种盘凸台对籽粒的支持力,N
 a ——振动产生的加速度, m/s^2
 F ——籽粒受到指夹的推力,N
 α ——种盘凸台对籽粒的支持力与 Y 轴的夹角, $(^\circ)$

前期田间试验测得振动为正弦运动且频率较大,因此 a 的方向始终与 G 平行,大小满足

$$\begin{cases} a = a_1 \sin\theta \\ G - ma < F_2 < G + ma \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_1 —— a 的峰值, m/s^2

F_2 —— G 与 ma 的合力,N

θ ——加速度变化角, $(^\circ)$

其中,玉米籽粒法向摩擦力和切向离心力可表示为

$$\begin{cases} f_1 = \mu F_{N1} \\ f_2 = mr\omega^2 \end{cases} \quad (6)$$

联合式(4)~(6)可得

$$F_{N3} = (G + ma_1 \sin(\omega t)) \cos\alpha + mr\omega^2 \quad (7)$$

综合分析可知, F_{N3} 大小由 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos\alpha$ 决定,在夹持过程中, α 从大变小再变大,因此凸台支持力随着角度的变化先增大后减小。指夹运动至最上方位置且加速度 a 为最小值时, F_{N3} 最大。因凸台固定在种盘上,可以提供足够大的支持力,满足设计要求。

3 EDEM - RecurDyn 耦合仿真分析

排种器的排种过程涉及到运动学、动力学求解以及排种器和玉米籽粒之间的相互作用求解。指夹式排种器共设有 12 个指夹,且每个指夹的运动都不相同。由于运动的复杂性,单一的仿真软件不能完成求解过程,因此需要利用多体动力学仿真软件 RecurDyn 和离散元仿真软件 EDEM 进行耦合求解分析。

3.1 虚拟样机模型建立与运动分析

3.1.1 模型建立

通过 SolidWorks 软件绘制指夹式排种器各零部件结构并装配,然后另存为 X_t 格式导入 RecurDyn 中,实现指夹式排种器虚拟样机的设定^[18]。综合考虑仿真计算量,本次仿真分析只涉及到指夹式排种器的充种过程和夹种过程,对指夹式排种器导种带、轴、齿轮、护种盖和弹簧等结构进行简化,并增设一个轴套代替旋转轴,从而只起到控制指夹转速的作用,不会添加额外力的作用。导入的指夹排种器虚拟样机模型如图 6 所示。



图 6 指夹式取苗爪虚拟样机模型

Fig.6 Virtual prototype model of fingerclip claw

3.1.2 添加材料属性和约束

将指夹式排种器导入 RecurDyn 后,定义各个零件的属性。指夹定义为铝合金,种箱、轴套、排种盘、导种前后盖设置为钢^[19]。根据 RecurDyn 中运动副分类及指夹式排种器实际运动情况,定义材料属性之后添加各零部件之间的转动副和移动副(表 1)。因每个指夹在排种器排种过程中运动状态均不同,每个指夹的运动都相互独立,为每个指夹的各自运动进行单独定义。

表 1 零件约束
Tab.1 Parts constraints

构件名称	运动副类型	数量
排种盘与大地	移动副	1
种箱与排种盘	固定副	1
导种前盖与排种盘	固定副	1
导种后盖与排种盘	固定副	1
轴套与排种盘	旋转副	1
指夹与轴套	旋转副	12

本次定义 12 个指夹和轴套的驱动,选择 Displacement,指夹使用 Step 函数,在特定时间内控制指夹的开启与关闭。玉米免耕播种机在播种工作时,动力从地轮通过链条和变速器传递给排种器,而仿真软件主要通过角速度控制旋转,为了使仿真与真实工作时相同,通过 $\omega = 2\pi n$ 对工作速度和转速进行转化得到旋转角速度。每个指夹的运动状态都不同,定义 12 个函数。因玉米籽粒从种箱上口落入种箱底部过程中指夹不需要运动,因此轴套的运动 Step 函数和三角函数结合使用,调节三角函数即可改变振动幅度和振动频率。驱动函数表达式为:轴套,STEP(time,0.9,0,1,1.1);排种盘,STEP(time,0.95,0,1,5 * sin(time * PI * 40));指夹 1,STEP(time,1.4,0,1.5, -0.5) + STEP(time,6.1,0,6.2, 0.5);指夹 2,STEP(time,5.6,0,5.7,0.5) + STEP(time,7.1,0,7.2, -0.5);指夹 3,STEP(time,4.7,0,4.8,0.5) + STEP(time,6.6,0,6.7, -0.5);指夹 4,STEP(time,4,0,4.1,0.5) + STEP(time,6.1,0,6.2, -0.5);指夹 5,STEP(time,3.4,0,3.5,0.5) + STEP(time,5.6,0,5.7, -0.5);指夹 6,STEP(time,2.9,0,3,0.5) + STEP(time,5.1,0,5.2, -0.5);指夹 7,STEP(time,2.4,0,2.5,0.5) + STEP(time,4.6,0,5.1, -0.5);指夹 8,STEP(time,1.9,0,2,0.5) + STEP(time,4.1,0,4.6, -0.5);指夹 9,STEP(time,1.4,0,1.5,0.5) + STEP(time,3.6,0,3.7, -0.5);指夹 10,STEP(time,3.1,0,3.2, -0.5) + STEP(time,7.6,0,7.7,0.5);指夹 11,STEP(time,2.6,0,2.7, -0.5) + STEP(time,7.1,0,7.2,0.5);

指夹 12,STEP(time,2.1,0,2.2, -0.5) + STEP(time,6.6,0,6.7,0.5)。

3.1.3 仿真结果分析

根据前述调整的参数后开始进行仿真分析。将上述驱动函数的表达式输入到 RecurDyn 中对应的表达式列表,并运行仿真,测量不同运动表达式下排种器指夹运动位移和角度与时间的关系。找到 Analysis 模块并点击,点击 Dyn/Kin,调整仿真参数。仿真时间(End time)设置为 10 s,步长(step)设置为 1 000^[20]。

仿真分析得到排种器运动位移随时间变化的曲线如图 7 所示。分析可得,0 ~ 1 s 为 EDEM 玉米籽粒生成过程,此时排种盘运动为 0;1 ~ 5 s 之间排种盘的运动位移为 5 mm,振动频率为 20 Hz。

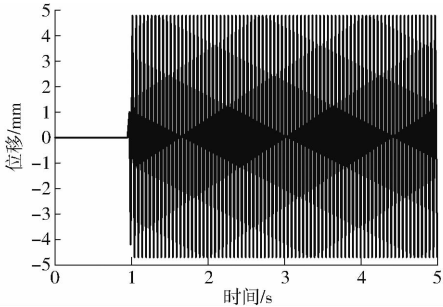


图 7 排种器运动位移随时间变化曲线
Fig.7 Change curve of movement and displacement of seeder with time

排种器指夹运动角度随时间变化的曲线如图 8 所示。0 ~ 1 s 为 EDEM 生成玉米籽粒的时间历程。1 ~ 1.3 s 之间,指夹在轴套的带动下做旋转运动而自身相对轴套不运动;1.3 ~ 1.4 s 之间,指夹闭合角度为 -28.65°,此时指夹完成玉米籽粒夹持;1.4 ~ 3.5 s 之间,指夹夹持玉米籽粒继续运动;3.5 ~ 3.6 s 之间,指夹将玉米籽粒推送到导种带上,随后指夹打开 28.65°;3.6 s 后,指夹处于打开状态,以便下一次夹持籽粒。根据排种器指夹运动位移和角度随时间变化曲线可以看出,排种器完成了籽粒取种—夹持—夹取携种—运输落种的运动过程,运动接近于真实状态。

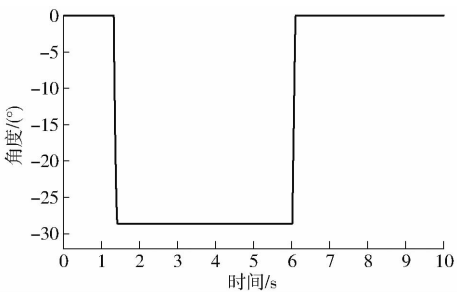


图 8 指夹运动角度随时间变化曲线
Fig.8 Curve of finger clip motion angle with time

3.2 基于 EDEM 玉米籽粒模型建立

3.2.1 仿真模型导入

基于上述 RecurDyn 对整个排种器虚拟样机的运动学仿真分析,利用 EDEM 对玉米籽粒和排种器进行离散元建模,为优化指夹夹持籽粒效果提供基础^[21]。在 RecurDyn 中找到 External SPI 模块,选中 Walls,依次点击排种器各个零部件,使其零件属性生成 Walls,点击完成后在 Database 模块中检查各个零部件生成的 Walls 是否完整。检查之后点击 Export 输出 wall 文件,然后打开 EDEM,选中 Geometries 并右击,点击 Import Geometries ... from RecurDyn,打开 RecurDyn 导出的排种器文件。导入的整个排种器模型如图 9 所示。

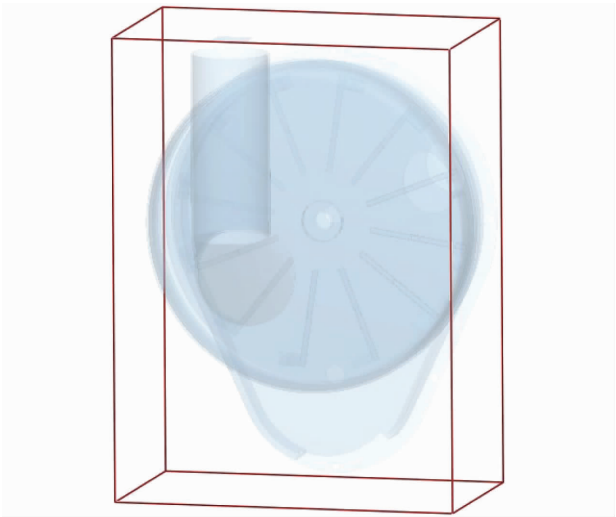


图 9 排种器模型导入图

Fig. 9 Import diagram of seed feeder model

3.2.2 玉米籽粒建模

经测量郑单 958 玉米籽粒的三轴尺寸为长 12 mm,宽 8 mm,厚 4 mm,根据郑单 958 玉米籽粒结构和真实尺寸,利用多球面组合方式^[22]对玉米籽粒进行建模(图 10),本文填充颗粒采用 8 个小球颗粒,填充之后设置籽粒的质量、体积和坐标等参数。

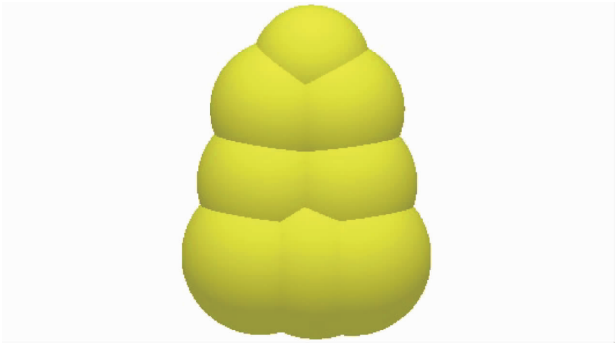


图 10 玉米籽粒模型图

Fig. 10 Corn kernel model

3.2.3 玉米颗粒参数设定

仿真过程中玉米籽粒颗粒与简化指夹式排种器

模型不断发生力的作用,故仿真所选择的物理特性参数对仿真结果有较大的影响。参考相关资料,确定了玉米籽粒和排种器零部件的属性、材料间的接触系数以及玉米籽粒、钢和铝合金材料属性,并设定了玉米籽粒与钢、玉米籽粒和铝合金之间的接触参数^[23]。详细参数设置如表 2 所示。

表 2 各零件材料参数和接触参数设置
Tab. 2 Material parameters and contact parameters of each part

项目	参数	数值
玉米籽粒	泊松比	0.357
	剪切模量/Pa	2.17×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 250
排种盘	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
指夹	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	1.7×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
玉米籽粒与玉米籽粒	碰撞恢复系数	0.182
	静摩擦因数	0.431
	动摩擦因数	0.078 2
玉米籽粒与指夹	碰撞恢复系数	0.62
	静摩擦因数	0.342
	动摩擦因数	0.051 5
玉米籽粒与排种盘	碰撞恢复系数	0.621
	静摩擦因数	0.482
	动摩擦因数	0.093 1

3.2.4 玉米落种过程仿真

为了验证玉米籽粒是否能顺利落入种箱中,利用 EDEM 模拟玉米籽粒的落种过程。在种箱上面设置虚拟面,调整虚拟面的长度和宽度,使虚拟面的大小比种箱口小,避免生成的玉米籽粒跳出种箱口。本次分析选用玉米籽粒 400 颗,Target Number 设置为 500,颗粒工厂能够在 1 s 内生成全部所需玉米籽粒。设置玉米籽粒沿 Y 方向按照 -4 m/s 速度向下掉落,为了准确描述玉米籽粒颗粒之间的接触关系,选择颗粒与颗粒、颗粒与材料之间的碰撞模型为 Hertz - Mindlin(no slip),设置仿真步长为 20%,仿真时长为 5 s。为了能清晰分辨玉米籽粒在排种器的运动状态,调整排种器的透明度。玉米籽粒在排种器中的落种从开始到结束的过程如图 11 所示。在 0.251 s 时可以看出玉米籽粒从颗粒工厂生成并从颗粒工厂落入到种箱内部开始堆积,在 0.5 s 时玉米籽粒已经在种箱内堆积,并且玉米籽粒开始在种箱下口封口,0.75 s 玉米籽粒开始在种箱口慢慢向上堆积,此时不向种箱落入。1.013 s 玉米籽粒完成整个填充过程。

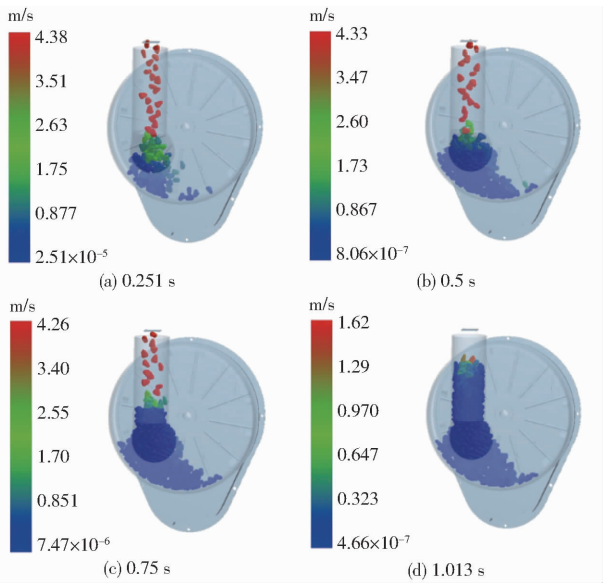


图 11 落种仿真过程

Fig. 11 Seed drop simulation process

3.3 EDEM – RecurDyn 耦合仿真分析结果

EDEM 与 RecurDyn 的两个接口打开后,设置仿真时间为 10 s,step 为 1 000。在 RecurDyn 的仿真页面中选中 Display Animation,可在 RecurDyn 中看到玉米籽粒的整个运动过程,如图 12 所示,当指夹与玉米籽粒颗粒接触时,指夹将力施加于籽粒颗粒,同时籽粒颗粒对指夹施加反作用力,并返回到 RecurDyn 中。1 ~ 1.7 s 时间段为玉米籽粒充种过程和指夹夹取玉米籽粒过程,1.7 ~ 2.8 s 时间内,指夹夹取籽粒进入种盘的凸台区,2.8 ~ 3.8 s 时间内,多弧面指夹和种盘的凸台相互配合,给予玉米籽粒一个压力和支持力,共同带动玉米籽粒前进,有效防止了玉米籽粒从指夹中脱落,提高了指夹式排种器的合格率,3.8 ~ 4.3 s 时间内,指夹带动玉米籽粒从导种口推送至导种带中,完成整个指夹夹持籽粒的过程。

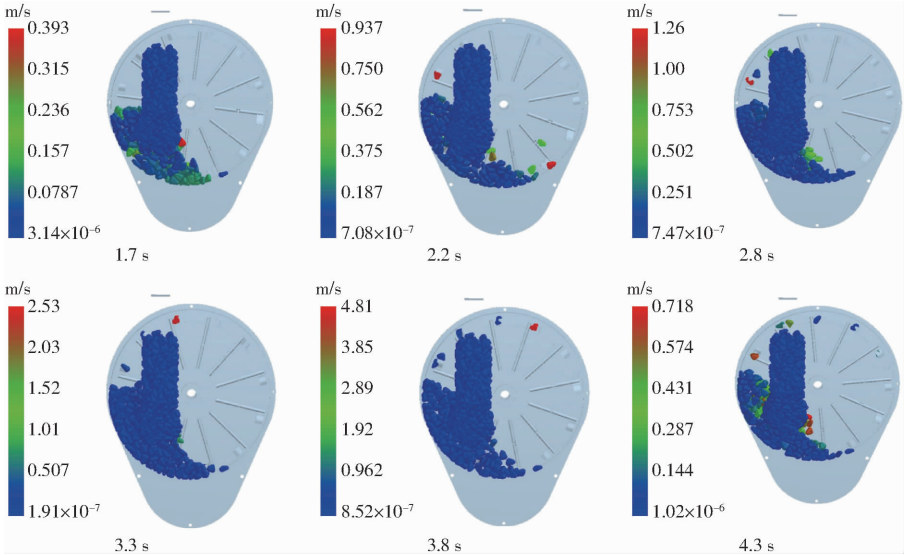


图 12 耦合仿真过程

Fig. 12 Coupled simulation process

程。

玉米籽粒运动轨迹图如图 13 所示。选取其中一个被指夹夹持的玉米籽粒,导出其在排种器排种过程中的速度曲线如图 14 所示。在 0 ~ 0.2 s,玉米籽粒还未生成,此时间玉米籽粒速度为 0,在 0.2 ~ 0.5 s,玉米籽粒从颗粒工厂生成并以 4.3 m/s 速度开始落入种箱中,在 0.5 ~ 0.9 s,玉米籽粒下落入种箱中不再运动,所以玉米籽粒的速度接近于 0。在 1 ~ 2 s,在指夹的旋转运动和振动影响下,玉米籽粒没有被指夹夹持住,在种箱被指夹搅动,在 2 ~ 4 s,玉米籽粒被指夹夹持住并在排种盘上面稳定运移,4 ~ 5 s 为玉米籽粒从导种口排出的速度。因本研究为降低仿真难度,节省仿真时间,简化了排种器的导种带部分,导致玉米籽粒从导种口排出后不会在排种带上面运动,没有了导种带的约束,玉米籽粒从导种口弹出后,在导种前盖和导种后盖之间不停地发生碰撞,另在玉米籽粒重力和排种器振动的多重作用影响下,玉米籽粒一边发生碰撞一边下落,最后会从排种器导种前盖下端排出。5 s 后,玉米籽粒在排种器的落种、充种、携种以及导种过程结束。从图 14 中可以看出,1 ~ 2 s 为玉米籽粒停留在种箱中的速度,2 ~ 3 s 为振动条件和排种器转动共同影响下的速度,3 ~ 4 s 为排种器转动下玉米籽粒的速度。

4 排种器台架试验

4.1 试验材料

研制的玉米精密排种器样机于 2022 年 10 月在河南农业大学智能农业装备实验室开展了台架试验。试验选用的玉米籽粒品种为郑单 958,试验前人工筛选出大小均匀、无损伤、无虫害、有绿色包衣

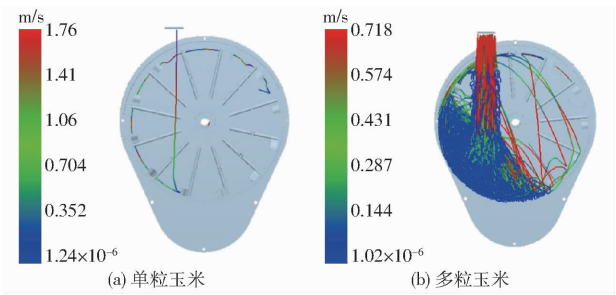


图 13 玉米籽粒运动轨迹

Fig. 13 Motion path of corn grains

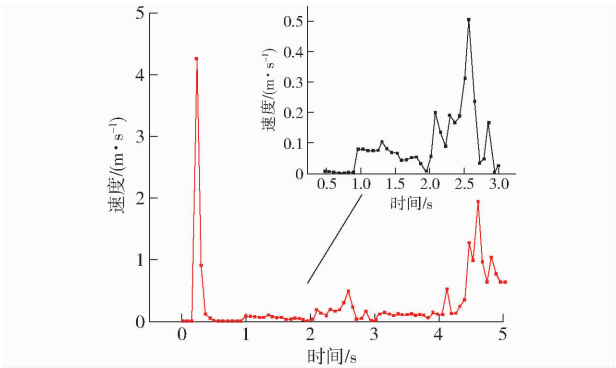


图 14 玉米籽粒运动速度曲线

Fig. 14 Movement velocity curve of corn grains

的玉米籽粒,籽粒千粒质量为 307 g,含水率约为 13.2%。台架试验所采用的设备主要有排种器性能检测仪(PZQCSY-3 型)、振动试验台、排种器等。试验系统如图 15 所示。

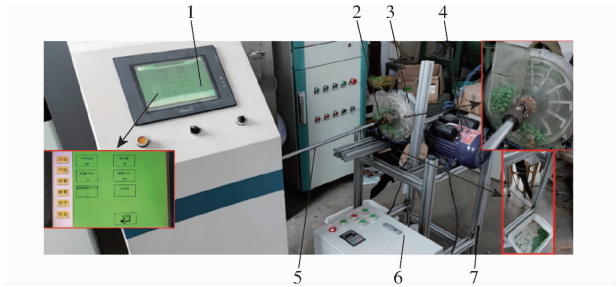


图 15 排种器振动试验台

Fig. 15 Vibration test bench of seed feeder

1. 排种器性能检测仪 2. 万向节 3. 排种器 4. 异步电机
5. 传动轴 6. 变频器 7. 铝型材台架

4.2 试验方法

排种器作业速度、振动频率、振动幅值等对排种器排种性能会产生影响,根据前期单因素试验,选取排种器作业速度、振动频率及振动幅值 3 个影响排种效果的关键因素进行分析研究,采用三因素三水平进行多因素正交试验,综合考虑田间实际作业环境等因素影响,试验因素编码如表 3 所示。参照行业标准 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》规定,以合格指数、漏播指数作为排种器性能评价指标,株距设为 25 mm,每组试验选取 250 粒玉米籽粒,每组重复 3 次,取平均值作为试验结果。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Test factors and codings

编码	因素		
	作业速度 A/(km·h ⁻¹)	振动幅值 B/mm	振动频率 C/Hz
-1	2	5	20
0	4	10	50
1	6	15	80

4.3 试验结果与分析

基于 Box - Behnken 设计 17 组试验,试验设计与结果如表 4 所示。对试验数据进行多元线性回归和二项式拟合,剔除对试验结果影响不显著的因素,建立合格指数、漏播指数与作业速度、振动幅值、振动频率的多元二次回归响应面模型

$$X = 8.75 - 3.9A - 5.84B - 3.16C - 1.48AB + 1.7BC - 3.69B^2 - 5.18C^2$$

(8)

$$Y = 10 + 2.71A + 3.62B + 3.26C + 2.2AB + 1.88AC + 1.44B^2 + 2.81C^2$$

(9)

表 4 试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and results

序号	因素			合格指数 X/%	漏播指数 Y/%
	作业速度 A/ (km·h ⁻¹)	振动幅值 B/mm	振动频率 C/Hz		
1	2	5	50	92.5	7.0
2	6	5	50	85.8	8.3
3	2	15	50	83.1	10.2
4	6	15	50	72.0	20.3
5	2	10	20	89.9	8.0
6	6	10	20	80.3	9.4
7	2	10	80	80.5	12.5
8	2	10	80	75.2	21.4
9	4	5	20	89.3	8.0
10	4	15	20	73.4	15.7
11	4	5	80	80.5	13.6
12	4	15	80	71.4	19.7
13	4	10	50	87.0	9.6
14	4	10	50	86.0	11.0
15	4	10	50	89.0	8.0
16	4	10	50	88.0	12.0
17	4	10	50	87.6	9.4

使用 Design-Expert 12 对合格指数和漏播指数进行方差分析,结果如表 5 所示。综合分析得知,合格指数和漏播指数的回归模型 P 值均小于 0.001,表明指标值与各因素编码值的回归方程关系显著,回归方程有意义。

探究各因素对排种器性能指标的影响规律,响应曲面如图 16 和图 17 所示。由图 16a 可知,作业速度与振动幅值具有交互作用,当振动频率一定时,

表 5 合格指数和漏播指数方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of qualifying index and missing seeding index						
指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
合格指数	模型	686.28	9	76.25	64.11	<0.000 1
	残差	8.33	7	1.19		
	失拟项	3.32	3	1.11	0.883 3	0.521 5
	误差	5.01	4	1.25		
	总和	694.61	16			
漏播指数	模型	327.38	9	36.38	16.05	0.000 7
	残差	15.87	7	2.27		
	失拟项	6.35	3	2.12	0.889 0	0.519 3
	误差	9.52	4	2.38		
	总和	343.25	16			

注： $P \leq 0.01$ 表示影响极显著； $P \leq 0.05$ 表示影响显著； $P > 0.05$ 表示影响不显著。

合格指数随着作业速度的增大呈现先快后慢的降低趋势,随着作业幅值的增大,合格指数呈现先缓慢增大至最高点后迅速减小,降低趋势由缓变快。

由图 16b 可知,振动幅值与振动频率具有交互作用,当作业速度一定时,随着振动幅值的增大,合格指数先缓慢减小再迅速减小,最后减小趋势趋于平缓。随着振动频率的增大,合格指数呈现先缓慢增大至最高点后迅速减少。

由图 16c 可知,作业速度和振动频率没有交互作用,当振动幅值一定时,随作业速度的增大,合格指数先缓慢降低后迅速降低。随振动频率的增加,合格指数呈现波动趋势,即先缓慢增至一定水平后迅速降低。

如图 17a 所示,作业速度与振动幅值具有交互

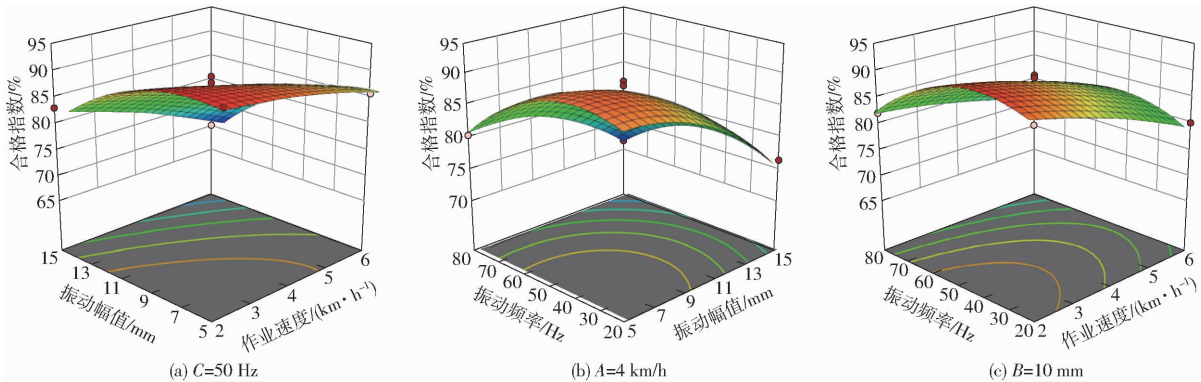


图 16 各因素交互作用对合格指数影响的响应曲面
Fig. 16 Influence of interaction of various factors on qualification index

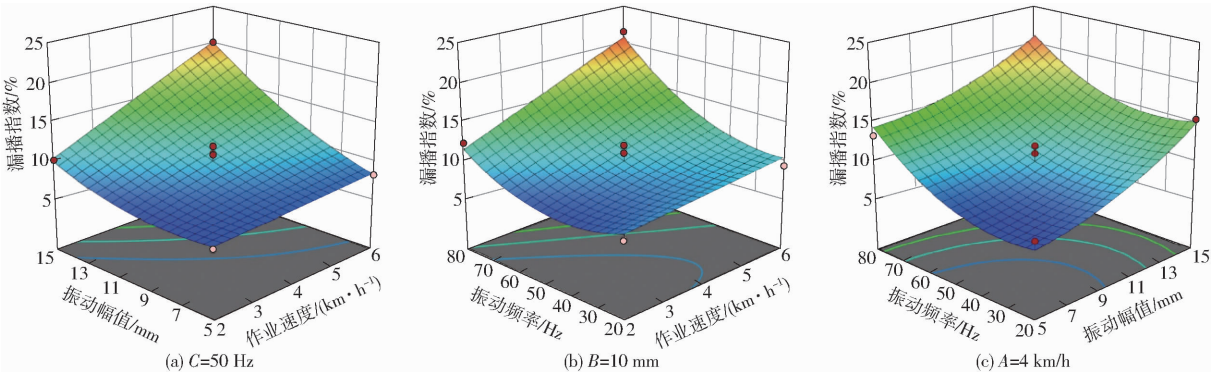


图 17 各因素交互作用对漏播指数影响的响应曲面
Fig. 17 Influence of interaction of various factors on leakage index

作用,当振动频率一定时,随作业速度的增大,合格指数呈现先平稳均匀增大后迅速增大的趋势。随作业幅值的增大,合格指数呈现先缓慢增大后迅速增大的趋势。

如图 17b 所示,作业速度与振动频率具有交互作用,当振动幅值一定时,随作业速度的增大,合格指数呈现先缓慢平稳增大后迅速增大的趋势。随振动频率的增大,合格指数呈现波动趋势,即先缓慢降低至最小值后迅速增大最后增大趋势由缓变快。

如图 17c 所示,振动幅值和振动频率没有交互作用,当作业速度一定时,随振动频率的增大,合格指数呈现先缓慢增大后迅速增大的趋势。随振动幅值的增大,合格指数呈现均匀增大的趋势。

4.4 试验参数优化

为研究排种器各参数的最佳运行组合,以合格指数最大、漏播指数最小为目标,使用 Design-Expert 软件对模型进行优化求解^[24]。选取的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max X(A,B,C) \\ \min Y(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 2\text{ km/h} \leq A \leq 6\text{ km/h} \\ 5\text{ mm} \leq B \leq 15\text{ mm} \\ 20\text{ Hz} \leq C \leq 80\text{ Hz} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

优化结果表明,当作业速度为 3.8 km/h、振动幅值为 5 mm、振动频率为 32.52 Hz 时,合格指数为 91.0%,漏播指数为 6.68%。结合优化方案,按照上述参数组合设置试验台架作业条件和参数,测得实际试验条件下合格指数为 90.0%,漏播指数为 7.1%,考虑到搭建的试验台存在一定人为操作误差,实际试验与理论优化求解结果非常相近,验证了试验参数优化的准确性。根据行业标准 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》规定,株距为 25 mm 时合格指数需不小于 80%、漏播指数需不大于 8%,说明该夹持式玉米排种器满足精密播种要求。

5 结论

(1)设计了一种由多弧面指夹和一种凸台排种盘构成的玉米指夹式排种器,通过对指夹夹持籽粒过程的动力学研究分析表明,指夹的下端弧面与凸台能起到护种作用;且凸台对籽粒的支持力随着转动角度先增大后减小,当指夹运动到种盘最高时,加

速度达到峰值,此时凸台支持力最大,能有效减小指夹的跳动。

(2)通过 RecurDyn 对指夹式排种器虚拟样机的运动位移和角度进行了仿真分析,得出指夹打开角度为 28.65°,适用于夹持玉米籽粒,仿真结果符合指夹式排种器实际运动过程。利用 EDEM 仿真模拟整个玉米籽粒下落过程,仿真结果证实玉米籽粒能顺利从在排种器种箱上口掉落入排种器中。通过 EDEM - RecurDyn 的耦合仿真,模拟出玉米籽粒在排种器的排种运动过程,得出玉米籽粒的运动速度、单个玉米籽粒和玉米籽粒群的整个运动轨迹。耦合仿真结果表明多弧面指夹和排种盘的凸台压力和支持力的合力能有效夹持玉米籽粒,防止籽粒掉落,进一步证明了指夹式排种器优化的合理性。

(3)选取作业速度、振动幅值和振动频率为试验因素,以高合格指数和低漏播指数为优化目标进行试验,得出当作业速度为 3.8 km/h、振动幅值为 5 mm、振动频率为 32.52 Hz 时,合格指数为 91.0%,漏播指数为 6.68%,排种器台架验证试验得出该参数组合下合格指数和漏播指数分别为 90.0% 和 7.1%,与理论优化值非常接近,满足精密播种作业要求,证实了指夹式排种器夹持过程协同仿真的准确性。

参 考 文 献

[1] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2021, 52(10): 1 - 15. WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(10): 1 - 15. (in Chinese)

[2] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1 - 20. ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):1 - 20. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1 - 18. YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9): 1 - 18. (in Chinese)

[5] ROLDAN A, SALINAS-GARCIA J R, ALGUACIL M M, et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions[J]. Geoderma, 2005, 129(3): 178 - 185.

[6] MELERO S, LOPEZ-GARRIDO R, MURILLO J M. Conservation tillage: short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 292 - 298.

[7] LPEZ-GARRIDO R, MADEJN E, MORENO F, et al. Conservation tillage influence on carbon dynamics under mediterranean conditions[J]. Pedosphere, 2014, 24(1): 65 - 75.

[8] MABA B, SSK B, AK B, et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015, 16(2): 119 - 129.

[9] HAO Y, XIE Y, WANG C, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China[J]. European Journal of Agronomy, 2016,81: 37 - 45.

[10] 董帅,赵满全,张旭,等. 气吸式免耕播种机排种装置振动测试及分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 181 - 184.

- DONG Shuai, ZHAO Manquan, ZHANG Xu, et al. Air-suction tillage seeder vibration testing and analysis of arable land under corn stock job[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 181–184. (in Chinese)
- [11] 陈晨, 赵满全, 张涛, 等. 基于离散元的排种器振动对大粒径作物种群的影响[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 214–218.
CHEN Chen, ZHAO Manquan, ZHANG Tao, et al. Based on the discrete element method of gas suction seed metering device vibration on the influence of the large size crop species: soybeans[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 214–218. (in Chinese)
- [12] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 27–35.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 27–35. (in Chinese)
- [13] 刘虎, 周纪磊, 方会敏, 等. 基于模态的玉米高速精密排种器振动特性分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 47–51, 56.
LIU Hu, ZHOU Jilei, FANG Huimin, et al. Vibration analysis of high speed corn seeding machine based on modal analysis [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 47–51, 56. (in Chinese)
- [14] 黄小珊, 王增辉, 姜鑫铭, 等. 指夹式排种器振动模拟与试验分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 149–153.
HUANG Xiaoshan, WANG Zenghui, JIANG Xinming, et al. Vibration simulation and experimental analysis of picker finger seedmeter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 149–153. (in Chinese)
- [15] 胡建平, 潘杰, 陈凡, 等. 基于 EDEM-RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 75–85, 301.
HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75–85, 301. (in Chinese)
- [16] YAN Dongxu, XU Tianyue, YU Jianqun, et al. Test and simulation analysis of the working process of soybean seeding monomer[J]. Agriculture, 2022(9): 1464.
- [17] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
TANG Han. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 纪龙龙, 谢焕雄, 杨红光, 等. 基于 EDEM-Recurdyn 耦合的马铃薯干式清土装置仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 109–115.
JI Longlong, XIE Huanxiong, YANG Hongguang, et al. Simulation analysis of potato dry soil cleaning device based on EDEM-Recurdyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 109–115. (in Chinese)
- [19] BIN G. Parameters optimization and energy absorption evaluation of the steel ball friction energy absorber[J]. Shock and Vibration, 2021(4): 1–15.
- [20] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 170–180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 170–180. (in Chinese)
- [21] ZHANG Hongmei, ZHOU Zheng, QU Zhe, et al. Simulation and experiment of sieving process of sieving device for tiger nut harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1680.
- [22] 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 43–50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43–50. (in Chinese)
- [23] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36–42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36–42. (in Chinese)
- [24] 张静, 郑成宇, 刘希光, 等. 夹持式打瓜精量排种器性能试验与参数优化[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 34–40.
ZHAGN Jing, ZHENG Chengyu, LIU Xiguang, et al. Performance test and parameter optimization of clamp-type melon precision metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 34–40. (in Chinese)