

基于 DEM - MBD 耦合的链勺式大蒜精量排种器设计与试验

李 骅^{1,2} 高吉枫^{1,2} 王永健^{1,2} 张 骞^{1,2} 吕大伟^{1,2} 傅杰^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省高等学校智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 针对现有大蒜精量排种装置漏播率高、取种单粒率低等问题,设计了一种链勺式大蒜精量排种器,阐述了排种器结构和工作原理,对其关键部件进行了优化设计,分析了排种器工作过程,确定了影响其作业性能的关键因素,建立了排种器 DEM - MBD 耦合仿真模型并进行了单因素仿真试验,探究了排种器不同工作参数对作业性能的影响,以主动链轮转速、种层高度和充种区排种链条倾角为试验因素,以取种单粒率、漏充率和重充率为试验指标,进行了二次回归正交旋转组合仿真试验,建立了各试验指标与试验因素的回归模型,并确定了排种器最优作业参数。试验结果表明,当主动链轮转速为 23.1 r/min、排种链条倾角为 67.6°、种层高度为 301.5 mm 时,工作性能最佳,此时取种单粒率为 92.5%,漏充率为 2.5%,重充率为 5.0%。为了验证优化后排种器作业性能,进行了台架试验,试验结果与回归模型预测结果基本一致,该研究为链勺式大蒜精量排种器及其关键部件优化设计提供了参考。

关键词: 大蒜; DEM - MBD 耦合; 排种器; 链勺式

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0147-13

OSID:



Design and Test of Chain-spoon Type Precision Seed-metering Device for Garlic Based on DEM - MBD Coupling

LI Hua^{1,2} GAO Jifeng^{1,2} WANG Yongjian^{1,2} ZHANG Qian^{1,2} LÜ Dawei^{1,2} FU Jieyi^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Higher Education Institutions, Nanjing 210031, China)

Abstract: A new type of chain-spoon type garlic precision seed-metering device was designed to solve the problem of the high missing rate of the previous devices. The overall structure and working principle of the seed-metering device were explained and analyzed, the design of its key components was optimized, the working process of the seed-metering device was analyzed, and the key factors affecting its operational performance were identified. A single-factor simulation test based on EDEM-RecurDyn coupled simulation was conducted to investigate the effects of active sprocket rotational speed, seeding chain inclination in the seed-filling zone, and seed layer's height on the seeding performance. Besides, a quadratic regression orthogonal rotational combination simulation test was carried out with the active sprocket rotational speed, seed layer's height, and seeding chain inclination angle as test factors and the single seed picking rate, missing rate, and replay rate as test indicators. A regression model of the evaluation indicators and test factors was established, and the parameters of the test factors were optimized. The test results showed that the best performance was achieved when the active sprocket rotational speed was 23.1 r/min, the seeding chain inclination angle was 67.6°, and the seed layer's height was 301.5 mm. At this time, the rate of single seed-picking was 92.5%, the missing rate was 2.5%, and the replay rate was 5.0%. Bench tests were carried out to verify the seed-metering device's operational performance, and the results generally agreed with those predicted by the regression model. This study provides a reference for the optimized design of chain-spoon type garlic precision seed-metering device and its key components.

Key words: garlic; DEM - MBD coupling; seed-metering device; chain-spoon type

收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 江苏省现代农业装备与技术示范推广项目(NJ2021-12、NJ2022-09)和江苏中晚熟大蒜产业集群子项目

作者简介: 李骅(1972—),男,教授,博士,主要从事精准播种技术与装备研究,E-mail: lihua@njau.edu.cn

0 引言

大蒜是一种重要的农作物,在食品加工、医药工业、化妆品制作等行业被广泛应用^[1-2]。我国是世界上最大的大蒜生产国和出口国,但主产区的大蒜播种方式依然以人工种植为主^[3-4]。根据我国大蒜播种“一穴一粒”农艺要求,精量化大蒜播种技术已成为当前的主要研究方向^[5]。由于大蒜种子尺寸差异大、表面粗糙、变异系数大,在机械化播种过程中普遍存在漏播率高、单粒率低等问题,而排种器作为播种机核心部件,其性能决定着播种质量与效率。目前精量排种器按工作原理可分为气吸式与机械式两种^[6],气吸式排种器结构较为复杂、制作工艺要求较高、工作功率大,且在复杂的田间工作环境下易损坏,稳定性差,整体技术不够成熟,机械式主要包括勺带式、指夹式、链勺式等^[7-9],而链勺式排种器因其结构简单、对种子适应性强、易于实现单粒排种、落种稳定且不伤种等优点已广泛应用于大颗粒种子播种中,如马铃薯、大蒜、甘蔗等^[10-13],但工作过程中受复杂作业环境、作业机具振动的影响,存在单粒率低、漏播率高等问题。

针对链勺式大蒜排种器存在的问题,专家学者进行了深入研究^[14-18]。近年来,离散元法已广泛应用于农业机械领域各个行业,众多专家学者利用离散元软件进行排种器仿真模拟^[19-25],通过研究不同工况下排种性能,获得最优排种器结构参数,而在链勺式排种器实际工作过程中,受链条抖动影响部分种勺内的种子滑出造成种勺缺种,同时也会清除掉部分充种勺内多余的大蒜种,因此在探究排种器工作性能时应对链条实际运动状态进行模拟,仅用离散元法模拟仿真,难以描述真实的排种器工作状态。近年来,随着多体动力学的发展,DEM-MBD耦合数值模拟技术开始应用于农业技术领域^[26-28],解决了诸多模拟仿真中存在的问题。

针对链勺式排种器漏播问题,本文设计一种取种勺结构的链勺式大蒜精量排种器,分析排种器工作过程,确定其主要结构参数,通过单因素仿真试验分析相关参数对排种性能的影响并确定其参数范围,通过正交试验确定排种器的最优结构参数和工作参数,并通过台架试验对试验结果进行验证,以期链勺式大蒜精量排种器的优化设计提供参考。

1 排种器结构与工作原理

链勺式大蒜精量排种器主要由取种勺、排种器

壳体、主动链轮、从动链轮、清种链轮、张紧弹簧、链条、种箱、护种板等组成,其结构如图 1 所示。

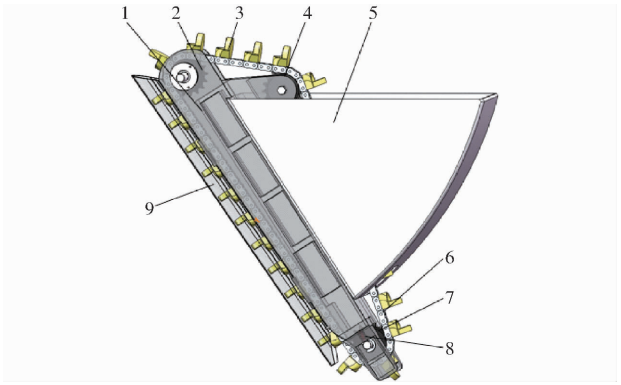


图 1 链勺式大蒜精量排种器结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of chain-spoon type seed-metering device for garlic

1. 排种器壳体 2. 主动链轮 3. 取种勺 4. 清种链轮 5. 种箱
6. 排种链条 7. 从动链轮 8. 张紧弹簧 9. 护种板

链勺式大蒜精量排种器工作过程可分为充种区、清种区、携种区、护种区、投种区 5 个阶段,如图 2 所示。作业时,动力通过输出轴输入到主动链轮,带动排种链条运动,位于种箱下部的取种勺依次进入蒜种所构成的充种区域,蒜种在自身重力、种间相互作用力、种勺扰动力的共同作用下充入种勺,完成充种后的种勺穿越种层后继续向上运动,位于种勺外缘处的种子本身处于不稳定状态,受到链条抖动、自身重力的影响回落到种箱,完成一次清种过程;当种勺运动到清种区翻越清种链轮时,外缘侧的种子受重力和离心力的作用在种勺外缘滑落回种箱,取种勺内部的种子在种室保护下继续随种勺运动;当运动至主动链轮时,种子在重力、离心力的作用脱离种勺进入护种区域,被抛落至前一个种勺背部,在护种板隔离下,前后两个种勺间形成一个可移动的独立空间,种子随链条继续运动至投种区域,失去护种板阻隔的种子在出口处受重力作用落入种沟,完成投种过程。

2 关键部件设计

2.1 取种勺设计

2.1.1 蒜种基本参数

由于不同地区的大蒜品种物性参数存在一定差异,选取江苏省邳州地区白蒜种子进行研究,选取 100 粒经过分级处理后形状规则、颗粒饱满的蒜种,用游标卡尺测量蒜种长度 l 、宽度 w 、厚度 h 并计算平均值,蒜种三轴尺寸参数如表 1 所示,测得蒜种平均长度 l_0 为 30.3 mm,平均宽度 w_0 为 18.7 mm,平均厚度 h_0 为 18.4 mm。

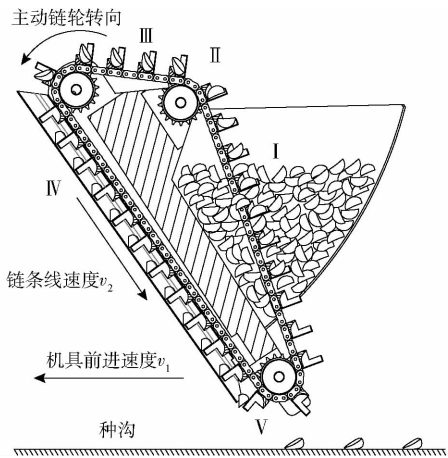


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Seed-metering device working principle diagram

I. 充种区 II. 清种区 III. 携种区 IV. 护种区 V. 投种区

表 1 蒜种尺寸测量结果

Tab. 1 Garlic seed size measurement results

参数	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
最大值	36.5	20.8	21.4
最小值	27.3	12.3	13.4
平均值	30.3	18.7	18.4
变异系数/%	6.2	11.3	10.6

2.1.2 取种勾结构设计

取种勾是大蒜精量排种器核心部件,相比于勺碗式取种结构,L 形结构的种勾在完成充种后,种室内种子更加稳定,不易从种勾内滑出,但容易出现漏充或多粒蒜种充入种勾且不易清种,造成取种单粒率低的问题。本文设计了一种 L 形取种勾,如图 3a 所示,其内部种室由两部分组成,外侧是圆弧形的柱状取种部分,内侧为 1/4 椭球形结构的留种部分,在提高充种性能的同时减少重播,取种勾主要结构参数如图 3b、3c 所示。

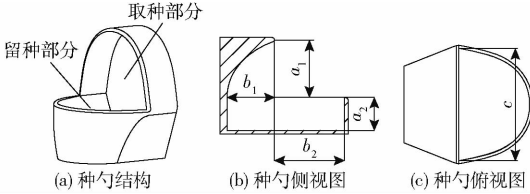


图 3 种勾结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spoon structure

由于大蒜种子形状不规则,蒜种填充姿态对种勾尺寸参数设计至关重要,通过最小势能原理可知蒜种常以侧卧、平躺两种姿态冲入种勾,如图 4a、4b 所示,排种器工作时,种子上半部分进入种勾的留种空间,下部与取种部分的底面接触,此时蒜种在上下两部分型孔的保护下处于稳定状态,种勾内余留的空间不足以容纳第 2 粒蒜种,部分多余的蒜种只能依附在取种勾的外缘上,处于不稳定状态,经过链条

振动和清种区域很容易被清除,种勾经过清种链轮时,外缘上蒜种在离心力的作用下脱离种勾,完成清种。种室内蒜种翻过清种区后,外端倚靠在留种区域的椭球形壁面上,处于稳定状态,如图 4c 所示。

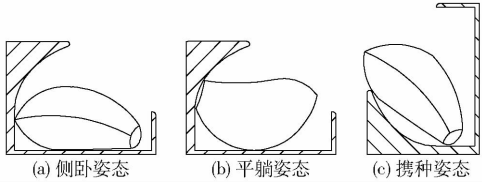


图 4 蒜种填充姿态分析

Fig. 4 Garlic filling posture analysis

为了提高种勾充种性能,降低重充率,在对大蒜种子目标充种和运种姿态分析的基础上,种勾结构参数需满足

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{1}{2}h_{\max} < b_1 < \frac{1}{2}l_0 \\ l_{\min} < b_1 + b_2 \leq l_{\max} \\ \frac{1}{2}w_0 < a_2 < h_{\max} \\ w_{\max} < a_1 + a_2 < 2h_{\min} \\ w_{\max} < c < 2h_{\min} \\ c = 2a_1 \end{array}\right. \quad (1)$$

式中 $h_{\max}$ ——蒜种厚度最大值,mm
 $h_{\min}$ ——蒜种厚度最小值,mm
 $l_{\max}$ ——蒜种长度最大值,mm
 $l_{\min}$ ——蒜种长度最小值,mm
 $w_{\max}$ ——蒜种宽度最大值,mm

为保证种勾内种子稳定性,取种部分型孔高度 a_2 为 9.5 mm,留种部分型孔长度 a_1 越大,种勾充种性能越好,在参数允许范围内 a_1 和取种部分型孔宽度 c 分别取为 13.5、27.0 mm;留种部分型孔深度 b_1 为 10.7 ~ 15.1 mm,为保持种子在种勾内的稳定性且便于清除多余蒜种, b_1 取近似中间值 12.5 mm;取种部分型孔长度 b_2 不易过长,否则容易造成重播,但应足以让多数蒜种完全进入种勾, b_2 取 19.5 mm。

2.1.3 种勾分布

理想状态下,单粒播种作业时,在相同时间内落入种沟的蒜种数量等于排种器排出的蒜种数量,有

$$\frac{v_1 \Delta t}{l_1} = \frac{v_2 \Delta t}{l_2} \quad (2)$$

式中 l_1 ——理论粒距,mm
 l_2 ——种勾间距,mm
 Δt ——时间,s

根据大蒜播种农艺要求,播种粒距一般在 90 ~ 120 mm 之间,而播种作业时拖拉机前进速度一般不超过 2.5 km/h,在保证播种质量的前提下,排种链

线速度不宜大于 0.50 m/s,由式(2)可知,在极限作业条件下,排种勺最大安装间距为 86 mm,根据《农业机械设计手册》选 08b 型排种链条,其链节距为 12.7 mm,为保持一定的充种性能,种勺应间隔分布在外链板上,安装范围为

$$25.4\text{ mm} < 2zp < 86.0\text{ mm}$$

(3)

式中 z 为整数, p 为链节距,为保证大蒜播种机作业效率,种勺安装间距不宜过大,故 z 取 2,种勺间距为 50.8 mm。

2.2 清种链轮设计

蒜种随种勺翻越清种链轮时受到离心力的作用,若所受离心力过大,蒜种会被甩出种勺,造成漏充,通过对蒜种的临界运动状态进行力学分析,探究蒜种脱离种勺的临界运动条件,蒜种受力如图 5 所示,蒜种受清种链轮离心力 F_c 、种勺支持力 F_N 、蒜种自身重力 G 、种子与种勺底面摩擦力 f 共同作用,为使蒜种在种勺内处于相对稳定状态,蒜种所受各力间应满足

$$\begin{cases} f + G\sin\theta \geq F_c \\ F_N = G\cos\theta \\ f = \mu F_N \\ F_c = m \frac{v^2}{r} \\ G = mg \end{cases}$$

(4)

式中 μ ——蒜种与种勺间静摩擦因数
 r ——回转半径,mm
 θ —— f 与水平线夹角, (°)
 m ——单粒蒜种质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 v ——链条线速度, m/s

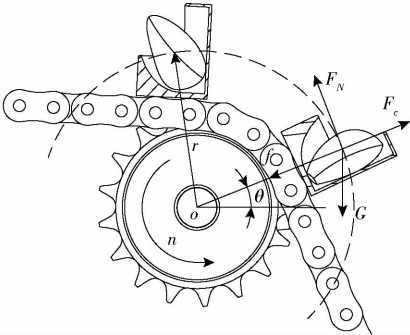


图5 蒜种临界受力分析

Fig.5 Critical force analysis of garlic

整理式(4)得

$$r \geq \frac{v^2}{g(\sin\theta + \mu\cos\theta)}$$

(5)

由 2.1.3 节可知种勺间距 l_2 为 50.8 mm,代入式(2)得排种链条最大线速度 $v_{\max}$ 为 0.35 m/s, g 取 9.8 m/s^2 ,测得蒜种与树脂材料间的摩擦因数 μ 为

0.45,将各参数代入式(5)得回转半径 r 最小值为 33.4 mm,考虑到链条使用寿命及排种器整体尺寸, r 取 55.0 mm,计算得链轮分度圆直径 d 为 69 mm,齿数为 17,在满足设计要求的前提下,主动链轮齿数选择与清种链轮相同。

理论粒距 l_1 取 100 mm,代入式(2)可得

$$n = \frac{25v_1}{3\pi d}$$

(6)

式中 n ——主动链轮转速, r/min

由式(6)可知排种链转速与播种机作业速度理论关系,为后续排种器投种分析和仿真试验参数设定提供了依据。

2.3 充种过程

排种器充种过程是影响排种器播种精度的重要环节,充种性能决定着排种器作业性能,充种过程是由蒜种重力、蒜种与取种勺间的作用力、种间作用力等构成的复杂动力学系统,充种过程中,根据目标蒜种相对位置将充种过程分为“待充种”和“完全充种”两种状态。

(1)取种勺在排种链条带动下进入充种区域,种勺外缘处的目标蒜种主要受取种勺外壁和种群挤压作用,为实现稳定充种,以蒜种质心为原点,建立坐标系,对处于“待充种”状态下的蒜种进行受力分析,如图 6 所示,可得

$$\begin{cases} F_N\cos\theta_1 + f\sin\theta_1 - (G + F_1)\sin\alpha_1 - \cos\alpha_1 = 0 \\ f\cos\theta_1 + (G + F_1)\cos\alpha_1 - F_2\sin\alpha_1 - F_N\sin\theta_1 \geq F_c \\ f = \mu F_N \\ F_2 = KF_1 \\ G = mg \\ K = \tan^2\left(45 - \frac{\theta_1}{2}\right) \end{cases}$$

(7)

式中 F_1 ——蒜种所受种间纵向合压力, N
 F_2 ——蒜种所受种间横向合压力, N
 α_1 ——充种区排种链条倾角的余角, (°)

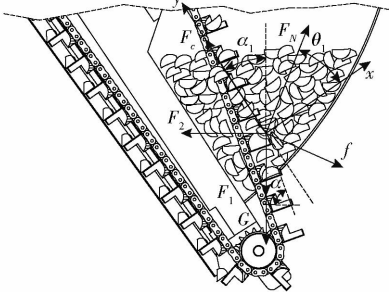


图6 “待充种”状态蒜种力学分析

Fig.6 Mechanical analysis of garlic in “waiting for filling” state

θ_1 —— F_N 与 x 轴夹角, ($^\circ$)

K ——压力系数

整理式(7)并求解得

$$\begin{cases} (1 + \mu)^2 F_N - 2F_c (\sin\theta_1 - \mu\cos\theta_1) F_N + F_c - \\ (G + F_1)^2 - K^2 F_1^2 = 0 \\ \alpha_1 \geq \arcsin \frac{F_N (\cos\theta_1 + \mu\sin\theta_1)}{F_1 K} \end{cases} \quad (8)$$

充种过程中,处于种勺边缘的蒜种在周围种群侧向压力和种勺支持力等多种作用力的共同下,使得蒜种所受合力方向趋向于种勺型孔位置,从而使得位于取种勺勺口外缘处的目标蒜种可以顺利地充入到种勺内,由式(8)可知,影响蒜种填充性能的主要因素有充种倾角 α 、蒜种种群合压力 F_1 等,而种群横向与纵向合压力与种层流动性及其厚度有关,由于蒜种充入种勺过程复杂,为保证可靠充种,后续可通过仿真试验确定其参数。

(2) 为保持种勺内已充蒜种的稳定性,对“完全充种”状态下的蒜种进行力学分析,如图 7 所示,探究各因素与充种性能之间的关系,根据达朗贝尔原理建立平衡方程

$$\begin{cases} F_n \cos\alpha + F_N = G \sin\varphi \\ F_n \cos\alpha + f + G \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \geq F_c \\ F_N = \mu G \\ f = \mu F_n \\ G = mg \\ F_c = \frac{mv_2^2}{r} \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_n ——种群对目标蒜种侧向压力, N

φ ——蒜种自然休止角, ($^\circ$)

整理式(9)得

$$\alpha \geq \arcsin \frac{v_2^2 - gr (\sin\varphi + \mu^2 - \mu)}{gr} \quad (10)$$

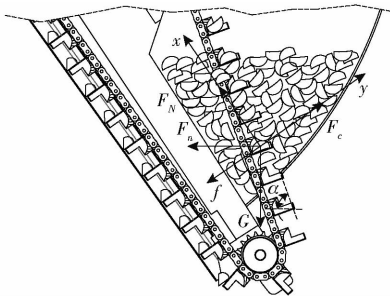


图 7 “完全充种”状态蒜种力学分析

Fig. 7 Mechanical analysis of garlic in “fully filled” state

由图 7 可知,种勺内蒜种在周围种群的作用力以及种勺内壁支持力等多种作用力下趋于稳定状

态,这种状态下可使种勺脱离种群前保证种勺内目标蒜种不会从型孔中滑出,由式(10)可知,充种区排种链条倾角 α 是影响种勺充种稳定性的重要因素,且与回转半径 r 和排种链线速度 v_2 有关,经测得,蒜种自然休止角 φ 为 29.6° ,可知回转半径 r 为 55 mm,排种链线速度 v_2 取决于排种链轮转速 n 。

综合“待充种”和“完全充种”状态下的蒜种力学分析,后续选取充种区排种链条倾角 α 、主动链轮转速 n 、种层高度 H 作为试验因素,进一步探究其对排种器工作性能的影响。

2.4 投种过程

排种器工作过程中,蒜种在护种板保护下被平稳运送至投种点进行反向抛送投种,为提高播种均匀性,对投种点处蒜种临界位置进行速度分析,如图 8 所示,为实现零速投种,此处蒜种速度需满足

$$v_{2x} = v_2 \cos\theta_2 = v_1 \quad (11)$$

式中 v_{2x} ——投种点排种链条水平分速度, m/s

θ_2 ——投种点处 v_2 与水平线夹角, ($^\circ$)

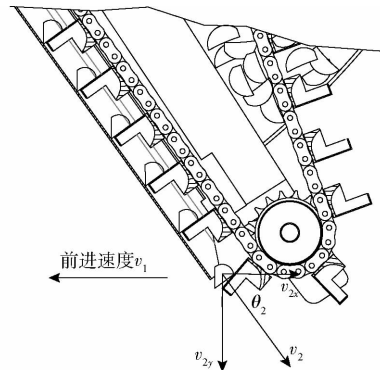


图 8 投种点速度分析

Fig. 8 Velocity analysis of seed-casting point

理论粒距取 100 mm,式(11)与式(2)联立可知等式无解,为减小蒜种在水平方向的分速度,可适当减小投种角度,以增加投种稳定性,考虑到排种器整体尺寸及安装位置,设计排种器投种角为 53.0° 。

3 DEM - MBD 耦合仿真试验

3.1 仿真模型建立

链勺式大蒜排种器实际工作过程中,蒜种处于颗粒力学和多体动力学共同组成的复杂环境之中,排种链条运动并非简单的直线运动,其运动状态对于排种性能有重要的影响,传统的 EDEM 模拟方法难以实现链轮、链条之间的复杂刚体运动,因此需要通过多体动力学软件进行辅助模拟,采用 DEM - MBD 耦合的方式,通过仿真分析探究不同因素对排种器工作性能的影响并确定最优参数。

3.1.1 RecurDyn 仿真模型构建

为不影响仿真结果准确性,减少约束参数和接触参数设置,将仿真模型中链条内链板与套筒、两侧外链板与销轴分别简化为内链节与外链节,此外,去除张紧弹簧,通过 Solidworks 制排种器简化模型,并以 xt 格式导入 RecurDyn 软件,如图 9 所示。根据排种器运动过程,在 RecurDyn 需设置各零部件之间的约束条件及运动条件,以 Ground 为参考系,排种器壳体、种箱添加固定副;主动链轮、清种链轮分别以旋转轴心为参考设置旋转副;内外链节之间设置旋转副;种勺与外链节之间添加固定副;外链节分别与主动链轮、清种链轮、从动链轮之间设置接触副;根据相应主动链轮转速,在主动链轮旋转副上利用 Motion 模块添加运动函数,考虑蒜种生成所需时间,设置主动链轮 0.5 s 后开始匀速转动。

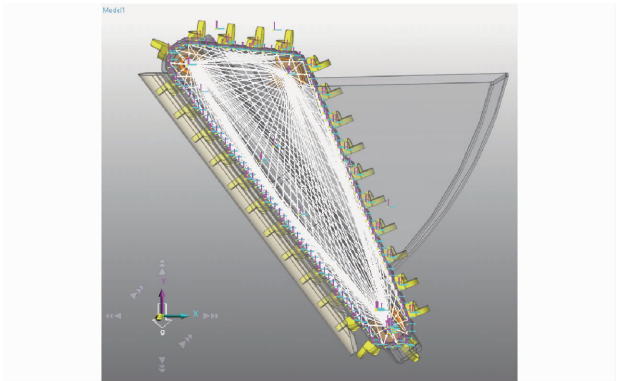


图 9 RecurDyn 仿真模型

Fig. 9 RecurDyn simulation model

为实现排种链条张紧,通过 Cylinder 模块添加 1 根与从动链轮同轴心的圆柱短轴,短轴与排种器壳体存在接触并添加从动链轮绕短轴的旋转副,利用 Axial 模块在短轴轴心位置添加沿滑槽方向的恒定载荷,如图 10 所示,在 parameter 模块设置最大时间步长为 0.01 s,RecurDyn 参数设置完成后,为减少仿真计算量,部分不与种子接触的部件不做输出,通过 Extelnal SPI 模块将仿真模型以 wall 文件形式导出。

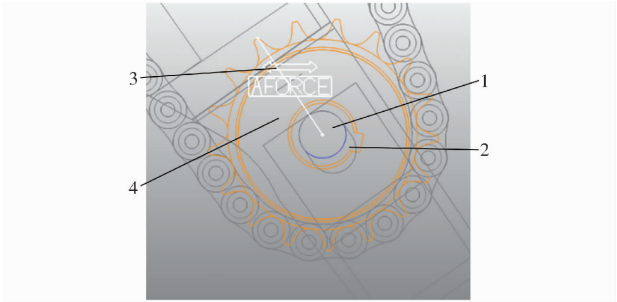


图 10 链条张紧模型

Fig. 10 Chain tensioning model

1. 短轴 2. 滑槽 3. 载荷 4. 从动链轮

3.1.2 EDEM 离散元模型构建

选取邳州地区常见的白蒜种子作为颗粒模型,通过三维激光扫描仪及图像处理软件获得蒜种的三维模型,导入到 EDEM 后,通过颗粒快速填充功能,获得蒜种离散元模型,如图 11 所示,依次为种子实物模型、扫描模型、颗粒填充模型。



图 11 蒜种模型

Fig. 11 Garlic model

在 EDEM – RecurDyn 耦合接口打开的情况下,将 RecurDyn 中输出的 wall 文件导入至 EDEM 的 Geometry 模块,导入模型如图 12 所示,采用 Hertz – Mindlin 无滑动接触模型作为颗粒间及颗粒与取种装置间的接触模型,排种链条、链轮为 45 号钢材料,种勺、排种器壳体、种箱、护种板为树脂材料,根据选用材料,确定颗粒–颗粒、颗粒–材料的接触参数以及普通树脂、蒜种和 45 号钢等基础参数,相关仿真参数如表 2 所示。考虑计算速度和仿真所需时间,设置 EDEM 时间步长为 1×10^{-5} s,最小网格尺寸设置为最小半径 3 倍,数据保存间隔为 0.01 s。

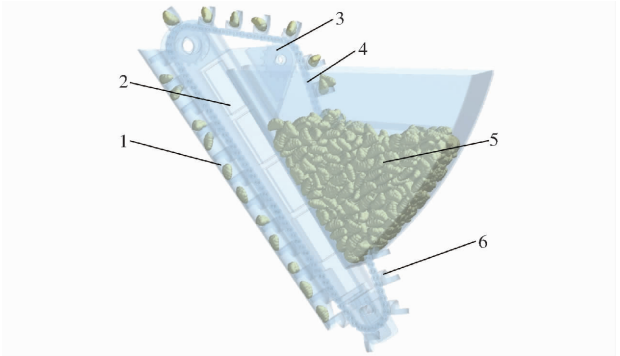


图 12 排种器 EDEM 仿真模型

Fig. 12 EDEM simulation model of seed-metering device

1. 护种板 2. 排种器壳体 3. 清种链轮 4. 排种链条 5. 种箱 6. 种勺

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation parameters

参数	45 号钢	普通树脂	蒜种
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800	1 400	1 030
泊松比	0.25	0.42	0.28
弹性模量/MPa	210 000	2 000	24. 27
静摩擦因数	0.40	0.45	0.43
滑动摩擦因数	0.31	0.22	0.32
碰撞恢复系数	0.32	0.35	0.35

3.2 仿真过程

由于仿真过程可视性,可直接采用观测的方式

统计出每个种勺在投种点投出蒜种数量,进而计算出取种单粒率、重充率和漏充率。仿真过程如图 13 所示,在 2 s 时种勺穿过种箱完成充种,4 s 时种勺内多余的蒜种在翻越清种链轮被清除,8 s 时种勺内蒜种经过主动链轮被抛送至护种区域,12 s 时在护种板保护下,蒜种运动到下方投种点处,在离心力作用下完成投种,仿真过程中种勺在充种区域 3 种充种情况如图 14 所示。

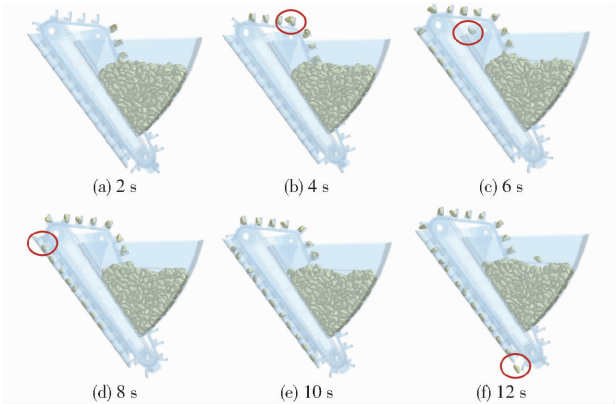


图 13 EDEM-RecurDyn 仿真过程

Fig. 13 EDEM-RecurDyn simulation process

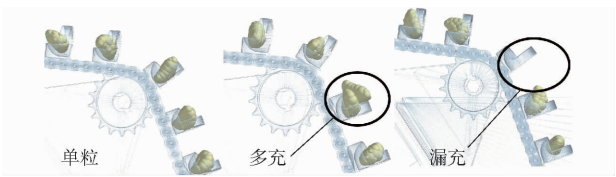


图 14 种勺充种情况

Fig. 14 Spoon filling situation

3.2.1 充种过程

由 2.3 节可知,充种区域蒜种填充性能是影响排种器工作质量的重要因素,“待充种”状态下蒜种进入种勺后,其下方区域会出现瞬时的“空种”现象,良好的充种性能需满足种勺取种后,与下一个种勺之间的空间能够被种箱内的蒜种迅速填充,这要求种勺外部的蒜种群具有良好的流动特性,以保证下一位种勺有足量蒜种充取,故通过 EDEM 后处理功能生成种箱内蒜种速度矢量图,如图 15 所示。由图 15a 可知,取种勺随排种链条进入种箱,在底部区域的种群速度变化并不明显,当取种勺运动至种群中间位置至离开蒜群时,取种勺附近蒜群受到扰动,其速度与其周边蒜种群速度呈一定差异,可保证取到的蒜种受到周边蒜种适当挤压,不易于被压实,便于清种,周边蒜种速度方向整体指向排种链条所处的运动区域,说明种群具有良好的回填性能。由图 15b 可看出,在前一处种勺充种过后,种勺下方并未出现明显“空种区”,而是被周围种群迅速回填,下一处种勺能够及时充种,避免漏充。综上所述,本文所设计的取种结构在提高

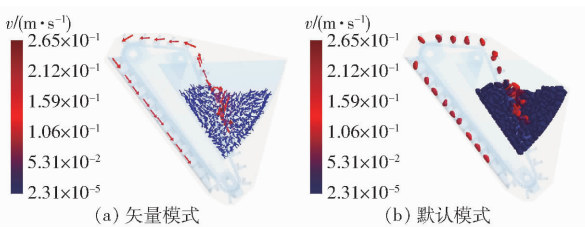


图 15 种箱内蒜种速度矢量图

Fig. 15 Vector drawing of garlic speed in the seed box

蒜种在种勺内稳定性的同时,能够保证充种成功率。

3.2.2 清种过程

取种勺在排种链条带动下自种箱内穿出的过程中,部分多充的蒜种在种箱内种群作用力的影响下被清除,如图 16 所示,种勺携带 1 粒或 2 粒蒜种翻越清种链轮,即由状态 1 变为状态 2 时,蒜种 1 在离心力的作用下由种勺取种部分翻转至留种部分,并在种勺内壁保护下处于稳定状态,蒜种 2 处于种勺外缘处且与种勺侧壁接触较少,始终处于不稳定状态,在自身重力 G 、种勺侧壁支持力 F_N 和由旋转产生的惯性离心力 F_c 的作用下,自种勺边缘处滑落,在与种箱内壁碰撞后落入种群,同时由于蒜种 2 处于极不稳定状态,运动过程中排种链条的振动也会清除部分蒜种。

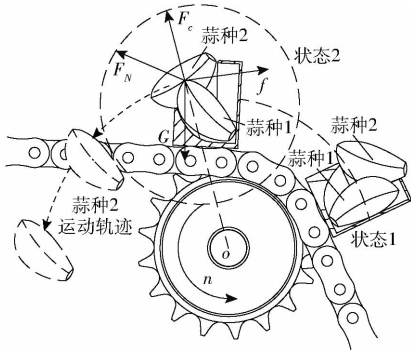


图 16 蒜种清种过程分析

Fig. 16 Analysis of garlic cleaning process

为进一步验证排种器清种性能,探究被清除蒜种运动特性,生成蒜种运动轨迹矢量图,如图 17 所示,并选取 1 粒被清除蒜种输出其速度随时间的变化曲线,如图 18 所示。从图 17、18 可看出,种勺内正常充种的蒜种在翻越清种链轮时,其速度并无明显颜色变化,这说明种勺内的蒜种在其内壁的保护作用下状态稳定,不易从种勺内滑出;放大视图内为多充蒜种的“清种-回落”轨迹,其运动轨迹如图中红线所示,结合蒜种速度变化曲线,由点 1 处开始,种勺内被清除蒜种的速度逐渐增加,其运动轨迹颜色呈明显变化,后随种勺作近似圆周运动,在点 2 处多充的蒜种开始被抛离种勺,被清除的蒜种在清种链轮一侧呈抛物线运动,在与种箱前壁碰撞后落回

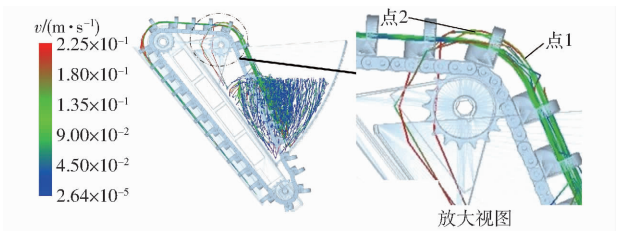


图 17 蒜种清种轨迹

Fig. 17 Garlic clearing track

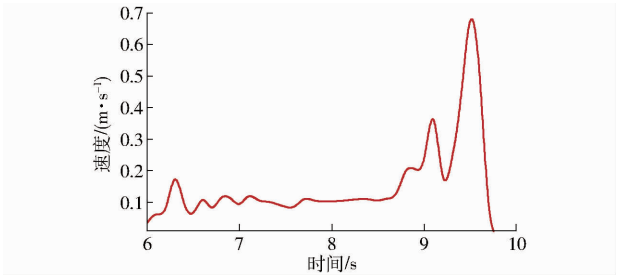


图 18 被清除蒜种速度变化曲线

Fig. 18 Velocity change curve of removed garlic

种群,综上所述该排种器能够及时清种并保证已充蒜种稳定性。

3.3 单因素仿真试验

根据对前文理论分析,以主动链轮转速 n 、充种区排种链条倾角 α 、种层高度 H 为试验因素,以取种单粒率 Y_1 、漏充率 Y_2 、重充率 Y_3 作为试验指标进行单因素仿真试验,每次统计 100 个种勺投种情况,每组试验重复 3 次,以投种口投出 1 粒种子记为单粒,投出 2 粒及以上种子为重充,不投为漏充,统计单粒取种次数 N_1 、漏充次数 N_2 与重充次数 N_3 , N_0 为样本取样数量,计算各试验指标。

充种区内种勺外的种间法向力是影响排种器充种性能的重要因素,因此结合 EDEM 后处理功能,采用充种区种勺外的种间法向力分别衡量不同参数下的蒜种种间相对运动状态。通过 Setup selection 功能下 Grid Bin Group 模块建立种群运动状态监视器,如图 19 所示。

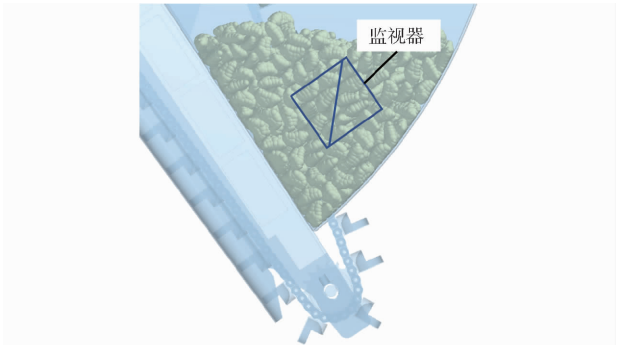


图 19 仿真试验中构建的监视器

Fig. 19 Monitor in the simulation experiment

3.3.1 主动链轮转速

为探究主动链轮转速对排种器工作性能的影响,仿真试验中,设定排种链条倾角为 70° ,种层高度为 290 mm,由上文可知,大蒜播种机作业速度一般不超过 2.5 km/h,由式(6)可知播种机作业速度与链轮转速的对应关系,故选取主动链轮转速 10、20、30、40、50 r/min 共 5 个水平进行单因素仿真试验,设置动态颗粒工厂蒜种生产率分别为 0.02、0.028、0.036、0.044、0.052 kg/s,以维持不同速度取种后种层高度的稳定,试验结果如表 3 所示。

响,仿真试验中,设定排种链条倾角为 70° ,种层高度为 290 mm,由上文可知,大蒜播种机作业速度一般不超过 2.5 km/h,由式(6)可知播种机作业速度与链轮转速的对应关系,故选取主动链轮转速 10、20、30、40、50 r/min 共 5 个水平进行单因素仿真试验,设置动态颗粒工厂蒜种生产率分别为 0.02、0.028、0.036、0.044、0.052 kg/s,以维持不同速度取种后种层高度的稳定,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同转速仿真结果

Tab.3 Simulation results for different speeds %

主动链轮 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	试验 序号	单粒 率	漏充 率	重充 率	平均单 粒率	平均漏 充率	平均重 充率
10	1	87	3	10			
	2	88	2	10	87.0	2.7	10.3
	3	86	3	11			
20	1	90	4	6			
	2	89	3	8	89.7	3.3	7.0
	3	90	3	7			
30	1	93	4	3			
	2	91	5	4	92.0	4.7	3.3
	3	92	5	3			
40	1	88	10	2			
	2	87	10	3	87.0	10.7	2.3
	3	86	12	2			
50	1	83	17	0			
	2	83	16	1	82.3	16.7	1.0
	3	81	17	2			

从表 3 可看出,随着主动链轮转速的增加,单粒率先升高后减小,漏充率逐渐增加,重充率逐渐减小,主动链轮转速为 30 r/min 时,单粒率最高。试验发现,当主动链轮转速较低时,排种链条线速度较小,种勺穿过充种区域时间较长,相邻两种勺之间的种群能够及时回填,如图 20 所示,单粒蒜种间平均法向力较小,种勺充种性能较好但容易出现多充现象,且由于清种链轮转速较低,种勺外缘侧种子趋于稳定,清种效果不佳,导致重播率较高。当主动链轮转速较高时,种群不能及时回填,且种间法向力较大,种勺充种性能较低,出现明显的漏播现象,综合考虑,确定主动链轮转速为 20 ~ 40 r/min。

3.3.2 排种链条倾角

由排种器充种过程结果可知,排种链条倾角是影响充种性能的重要因素。为探究其对排种器工作性能的影响,确定合理的充种角度范围,在仿真试验中,设定主动链轮转速为 30 r/min,种层高度为 290 mm,选取排种链条倾角为 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° 共 5 个水平进行单因素仿真试验,试验结果如表 4 所示。

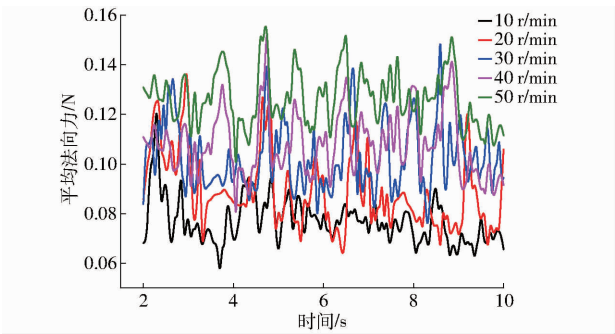


图 20 不同转速对种群影响

Fig. 20 Effect of different rotational speeds on population

表 4 不同排种链条倾角仿真结果

Tab. 4 Simulation results for different seeding chain inclination angle %							
链条倾角/(°)	试验序号	单粒率	漏充率	重充率	平均单粒率	平均漏充率	平均重充率
50	1	80	2	18			
	2	80	2	18	80.3	2.0	17.7
	3	81	2	17			
60	1	87	4	9			
	2	86	6	8	86.3	5.0	8.7
	3	86	5	9			
70	1	93	4	3			
	2	91	6	3	92.0	4.7	3.3
	3	92	4	4			
80	1	91	8	1			
	2	89	9	2	90.3	8.0	1.7
	3	91	7	2			
90	1	80	20	0			
	2	80	19	1	79.3	20.0	0.7
	3	78	21	1			

由表 4 可知,随着链条倾角的增加,单粒率呈现先增加后减小趋势,漏充率不断增加,重充率不断减小,如图 21 所示,随着充种倾角增加,种群平均法向力不断减小,种群稳定性增加,蒜种填充性能较好,当倾角为 50°时,重充率最高,当倾角为 90°,即垂直充种状态时,漏充率最高,这说明较小的倾角有利于充种区域的种群流动,种子回填效果更好,但过小的链条倾角容易产生重充率较高的问题,充种区排种链倾角在 60°~80°之间时单粒率较高,此时重充率和漏充率均处于较低值,因此确定充种区排种链条倾角为 60°~80°。

3.3.3 种层高度

考虑到种箱实际高度为 460 mm,试验中种层高度需稍低于种箱总高度以防止取种过程中种箱上层的种子掉出种箱,同时为保证一定的充种区域,选取种层高度为 150~430 mm。为探究种箱内种层高度对排种器工作性能的影响,设定主动链轮转速为 30 r/min,排种链条倾角为 70°,分析种箱内种层高度

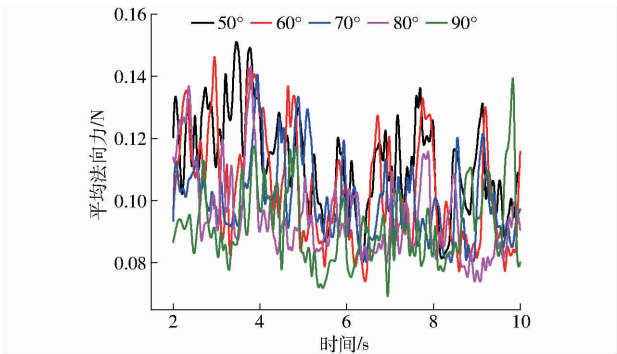


图 21 不同排种链条倾角对种群影响

Fig. 21 Effect of different seeding chain inclination angle on population

为 150、220、290、360、430 mm 时对排种器充种过程中单粒率、漏充率以及重充率的影响,设置动态颗粒工厂以生产率 0.036 kg/s 生成下落蒜种,维持取种时种层厚度稳定,试验结果如表 5 所示。

表 5 不同种层高度仿真结果

Tab. 5 Simulation results for different seed layer heights %							
种层高 度/mm	试验序号	单粒率	漏充率	重充率	平均单粒率	平均漏充率	平均重充率
150	1	86	13	1			
	2	87	12	1	86.0	12.7	1.3
	3	85	13	2			
220	1	90	8	2			
	2	90	8	2	89.7	8.3	2.0
	3	89	9	2			
290	1	92	5	3			
	2	93	4	3	92.3	5.0	2.7
	3	92	6	2			
360	1	93	5	2			
	2	93	3	4	92.7	4.3	3.0
	3	92	5	3			
430	1	88	4	8			
	2	88	3	9	88.0	3.3	8.7
	3	88	3	9			

由表 5 可知,随着种层厚度的增加,单粒率先增大后减小,漏充率逐渐减小,重充率逐渐增加;当种层高度在 150 mm 时,漏充率最大,说明较小的种层高度不利于充种;当种层高度为 430 mm 时,重充率最大,说明较大的种层高度容导致种匀重充,不利于清种。由图 22 可知,种层高度过低时,种间作用力较小,种子过于活跃,不利于种匀的充种,随着种层高层的增加,种间作用力增大有利于充种区种子回填,种群更加稳定,但种层高度过高,容易造成种匀的重充。综合考虑,选择种层高度为 290~430 mm。

3.4 二次正交旋转中心组合试验

3.4.1 试验方案与结果分析

依据单因素仿真试验结果,开展三因素五水平

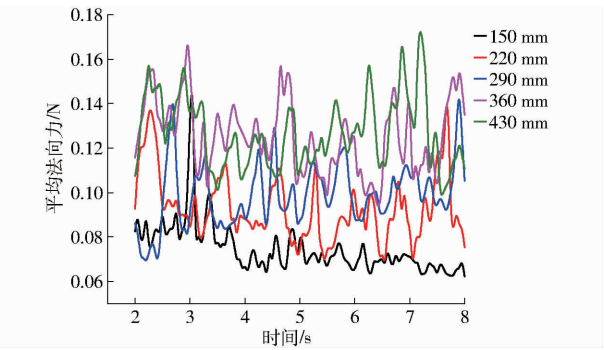


图 22 不同种层高度对种群影响

Fig. 22 Effect of different seed layer heights on population

的二次旋转正交组合多因素优化试验,共计 23 组,试验因素及编码如表 6 所示,试验设计方案与结果如表 7 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。根据表 7 数据,运用数据处理软件 Design-Expert 进行多元回归

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Coded value of test factor

编码	因素		
	主动链轮转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	链条倾角/ ($^{\circ}$)	种层高度/ mm
-1.682	20.0	60.0	290.0
-1	24.1	64.1	318.4
0	30.0	70.0	360.0
1	35.9	75.9	401.6
1.682	40.0	80.0	430.0

表 7 试验方案与结果

Tab. 7 Experimental program and result

试验号	因素			单粒率 $Y_1/\%$	漏充率 $Y_2/\%$	重充率 $Y_3/\%$
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	-1	90.9	2.4	6.7
2	1	-1	-1	89.2	9.1	1.7
3	-1	1	-1	90.1	5.7	4.2
4	1	1	-1	88.5	8.1	3.4
5	-1	-1	1	86.3	3.0	10.7
6	1	-1	1	88.2	5.1	6.7
7	-1	1	1	90.7	6.1	3.2
8	1	1	1	90.8	6.7	2.5
9	-1.682	0	0	91.5	3.1	5.4
10	1.682	0	0	85.1	10.1	4.8
11	0	-1.682	0	86.3	5.0	8.7
12	0	1.682	0	90.2	8.1	1.7
13	0	0	-1.682	92.8	5.4	1.8
14	0	0	1.682	87.5	4.7	7.8
15	0	0	0	92.3	4.0	3.7
16	0	0	0	91.3	4.4	4.3
17	0	0	0	92.5	5.1	2.4
18	0	0	0	92.2	4.1	3.7
19	0	0	0	94.9	3.4	1.7
20	0	0	0	92.1	4.2	3.7
21	0	0	0	92.2	4.7	3.1
22	0	0	0	91.8	3.4	4.8
23	0	0	0	92.3	4.6	3.1

拟合,建立单粒率、漏充率、重充率与试验因素的二次多项式回归模型。

由表 8 可知,单粒率、漏充率、重充率的回归模型拟合度均 $P < 0.01$,模型极显著,各回归模型失拟项均 $P > 0.05$,失拟项不显著,表明回归模型拟合度高。分析各因素对单粒率的影响, x_1 、 x_2 、 x_3 影响显著, x_1^2 、 x_2^2 影响极显著, x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_2x_3 、 x_3^2 影响不显著;分析各因素对漏充率的影响, x_1 、 x_2 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 影响极显著, x_3 影响显著, x_2x_3 、 x_3^2 影响不显著;分析各因素对重充率的影响, x_2 、 x_3 、 x_2x_3 影响极显著, x_1 、 x_1x_2 、 x_2^2 影响显著, x_1x_3 、 x_1^2 、 x_3^2 影响不显著。

剔除不显著的回归项,单粒率、漏充率和重充率的回归方程进行拟合,其回归方程依次为

$$Y_1 = 92.39 - 0.89x_1 + 0.88x_2 - 0.85x_3 - 1.31x_1^2 - 1.33x_2^2 \quad (12)$$

$$Y_2 = 4.22 + 1.73x_1 + 0.89x_2 - 0.40x_3 - 0.73x_1x_2 - 0.80x_1x_3 + 0.76x_1^2 + 0.74x_2^2 \quad (13)$$

$$Y_3 = 3.39 - 0.84x_1 - 1.78x_2 + 1.26x_3 + 0.94x_1x_2 - 1.36x_2x_3 + 0.59x_2^2 \quad (14)$$

通过对回归系数的检验得出影响单粒率和漏充率的主次因素为:主动链轮转速、排种链条倾角、种层高度。影响重充率的主次因素为:排种链条倾角、种层高度、主动链轮转速。

3.4.2 响应面分析

依据各试验指标回归模型得响应面,如图 23 所示。图 23a 为种层高度为 360 mm 时,主动链轮转速和排种链条倾角的交互作用对漏充率的影响。当排种链条倾角一定时,漏充率随着主动链轮转速的增加而增大,当主动链轮转速一定时,漏充率随着链条倾角的增加而上升。

图 23b 为排种链倾角为 70° 时,种层高度和主动链轮转速的交互作用对漏充率的影响。当种层高度一定时,漏充率则随着主动链轮转速的增加而增大,当主动链轮转速较低时,种层的高度对漏充率影响不大,当链轮转速较高时,漏充率会随着种层高度的增加而减小。

图 23c 为种层高度为 360 mm 时,主动链轮转速和排种链条倾角的交互作用对重充率的影响。当排种链条倾角一定时,重充率随着主动链轮转速的增加而逐渐减小,当主动链轮转速较高时,重充率随着排种链条倾角的增加变化较小,当主动链轮转速较低时,重充率随着排种链条倾角的增加而减小。

图 23d 为主动链轮转速为 30 r/min 时,种层高度和排种链条倾角对重充率的影响。当种层高度一

表 8 方差分析结果
Tab.8 ANOVA table

方差来源	单粒率				漏充率				重充率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	105.94	9	5.96	0.002 1 **	82.43	9	20.88	<0.000 1 **	109.92	9	10.43	0.000 1 **
x_1	10.66	1	5.40	0.037 1 *	40.69	1	92.75	<0.000 1 **	9.70	1	8.29	0.012 9 *
x_2	10.65	1	5.39	0.037 1 *	10.92	1	24.90	0.000 2 **	43.14	1	36.85	<0.000 1 **
x_3	9.88	1	5.00	0.043 5 *	2.28	1	5.19	0.040 2 *	21.64	1	18.48	0.000 9 **
$x_1 x_2$	0.36	1	0.18	0.675 9	4.20	1	9.59	0.008 5 **	7.03	1	6.01	0.029 2 *
$x_1 x_3$	3.51	1	1.78	0.205 3	5.12	1	11.67	0.004 6 **	0.15	1	0.13	0.725 0
$x_2 x_3$	9.03	1	4.57	0.052 0	0.72	1	1.64	0.222 5	14.85	1	12.69	0.003 5 **
x_1^2	27.47	1	13.91	0.002 5 **	9.20	1	20.96	0.000 5 **	4.88	1	4.17	0.062 1
x_2^2	28.21	1	14.29	0.002 3 **	8.77	1	20.00	0.000 6 **	5.52	1	4.72	0.049 0 *
x_3^2	6.94	1	3.51	0.083 6	0.72	1	1.64	0.222 7	3.19	1	2.72	0.122 8
残差	25.67	13			5.70	13			15.22	13		
失拟	17.65	5	3.52	0.055 9	3.11	5	1.92	0.195 7	8.11	5	1.83	0.214 1
误差	8.02	8			2.59	8			7.11	8		
总和	131.62	22			88.13	22			125.13	22		

注：* 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)，** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

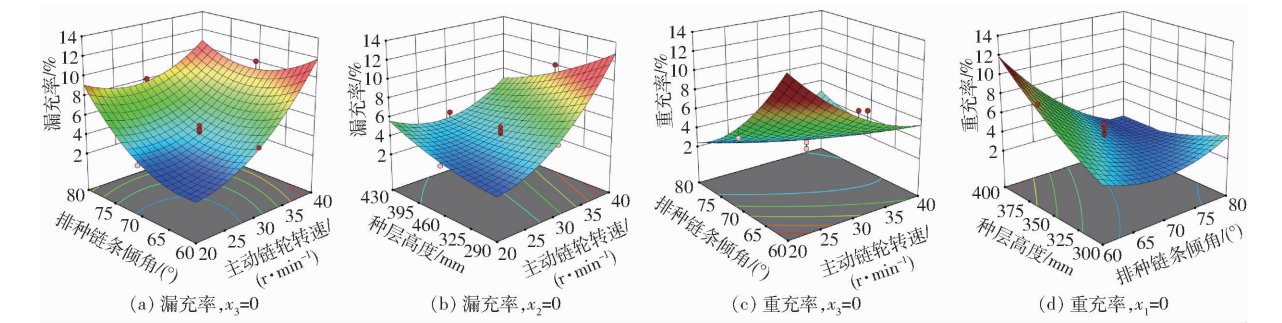


图 23 各因素交互作用对试验指标的响应曲面
Fig. 23 Response surface of the interaction of factors on the test indexes

定时,重充率随排种链条倾角的增加而减小,当排种链条倾角一定时,重充率随种层高度的增加而增加。

3.4.3 参数优化

为进一步获得试验因素的最优参数组合,采用多目标优化方法,以单粒率最高、漏充率最低为目标,其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ -1.682 \leq x_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_3 \leq 1.682 \end{cases} \quad (15)$$

利用 Design-Expert 10.0 软件的 Optimization 模块求解,得到充种性能最佳参数组合:主动链轮转速为 23.1 r/min、排种链条倾角为 67.6°、种层高度为 301.5 mm,此时单粒率为 92.5%,漏充率为 2.5%,重充率为 5.0%。

4 排种器台架验证试验

为验证排种器最优工作参数组合,以邳州地区

的白蒜品种为试验对象,在南京农业大学实验室内进行台架试验。试验所用排种器壳体、取种勺、种箱均使用树脂材料,通过 3D 打印技术制成,加工排种器壳体充种倾角为 68°。

排种器和直流电机分别固定在试验台架上并通过联轴器连接,通过调节电机输出转速调整主动链轮转速,下方传送带模拟拖拉机前进速度。设置主动链轮转速为 23 r/min,种层高度为 302 mm,记录排种器稳定工作状态下 100 个种勺取种情况,进行 5 次重复试验并对试验结果并取平均值,排种器排种效果如图 24 所示,试验结果如表 9 所示。

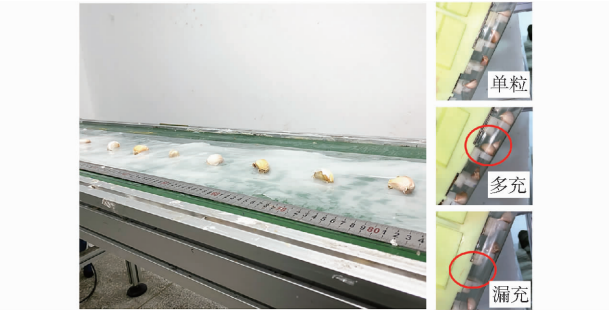


图 24 试验效果

Fig. 24 Test effect diagram

表 9 台架试验结果
Tab.9 Result of benth test %

序号	单粒率	漏充率	重充率
1	92.0	2.0	6.0
2	93.0	2.0	5.0
3	92.0	4.0	4.0
4	94.0	3.0	3.0
5	93.0	2.0	5.0
平均值	92.8	2.6	4.6

由表 9 可知,平均取种单粒率为 92.8%,漏充率为 2.6%,重充率为 4.6%,与仿真优化结果基本一致,满足大蒜精量播种需求。

5 结论

(1)设计了一种链勺式大蒜精量排种器,阐述了其结构组成和工作原理,通过分析蒜种填充姿

态,确定了取种勺关键结构参数,并对排种器工作过程进行了理论分析,得到了影响取种性能的关键因素。

(2)单因素仿真试验结果表明,当主动链轮转速为 20~40 r/min、充种角度为 60°~80°、种层高度为 290~430 mm 时,取种单粒率较高,漏充率和重充率较低,综合性能较好。

(3)正交试验仿真优化结果表明,当主动链轮转速为 23.1 r/min、播种链倾角为 67.6°、种层高度为 301.5 mm 时,排种性能最佳,该参数组合下取种单粒率为 92.5%,漏充率为 2.5%,重充率为 5.0%。

(4)台架试验结果表明,最优仿真参数组合下取种单粒率为 92.8%,漏充率为 2.6%,重充率为 4.6%,与仿真模型预测结果基本一致,能够满足大蒜单粒精量播种作业需要。

参 考 文 献

[1] 李新霞,史荣梅,刘睿婷. 大蒜主要化学成分及检测标准[J]. 新疆医科大学学报, 2020, 43(6): 697-700.
LI Xinxia, SHI Rongmei, LIU Ruiting. Main chemical components and detection standards of garlic[J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2020, 43(6): 697-700. (in Chinese)

[2] 龚倩梅,刘永仕,袁何玲,等. 大蒜辣素缓解 CCl₄ 致小鼠急性肝损伤的作用研究[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 530-537.
GONG Qianmei, LIU Yongshi, YUAN Heling, et al. Effects of allicin on alleviating carbon tetrachloride-induced acute liver injury in mice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 530-537. (in Chinese)

[3] 吴小伟,武文娟,钟志堂,等. 大蒜机械化播种技术研究现状与问题分析[J]. 中国蔬菜, 2021(3): 9-16.
WU Xiaowei, WU Wenjuan, ZHONG Zhitang, et al. Research status and problem analysis of garlic mechanized sowing technology[J]. China Vegetables, 2021(3): 9-16. (in Chinese)

[4] 崔志超,刘先才,陈永生,等. 我国大蒜全程机械化生产现状、问题与对策[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 239-243.
CUI Zhichao, LIU Xiancai, CHEN Yongsheng, et al. The current situation, problems, and countermeasures of fully mechanized production of garlic in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 239-243. (in Chinese)

[5] 吴小伟,钟志堂,史新明,等. 不同播种模式和机型的大蒜播种效果试验分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 7-10.
WU Xiaowei, ZHONG Zhitang, SHI Xinming, et al. Experimental analysis of garlic sowing effects with different sowing modes and models[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 7-10. (in Chinese)

[6] 贾雅丽. 精量排种器对比及发展现状分析[J]. 农业技术与装备, 2022(5): 38-40.

[7] 赖庆辉,谢观福,苏微,等. 链勺翻转清种式蚕豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 82-92.
LAI Qinghui, XIE Guanfu, SU Wei, et al. Design and experiment of precision seed metering device for broad bean with chain spoon flipping seed cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 82-92. (in Chinese)

[8] 王业成,高云鹏,台文硕,等. 指夹式马铃薯精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 49-58.
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and test of pickup finger potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 49-58. (in Chinese)

[9] 王希英,唐汉,王金武,等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82-90.
WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82-90. (in Chinese)

[10] 苏微,洪方伟,赖庆辉,等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 87-97.
SU Wei, HONG Fangwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 87-97. (in Chinese)

[11] 杨镡,段宏兵,宋波涛,等. 半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 103-109.
YANG Kai, DUAN Hongbing, SONG Botao, et al. Design and trial of half-cup potato seed-metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 103-109. (in Chinese)

[12] 张春岭,吴晓庆,谢东波,等. 电液混合调控式大蒜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 166-174.
ZHANG Chunling, WU Xiaoqing, XIE Dongbo, et al. Design and experiment of electro-hydraulic mixed garlic planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 166-174. (in Chinese)

[13] 牟向伟,陈林涛,马旭,等. 预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2):

20 - 31.

MOU Xiangwei, CHEN Lintao, MA Xu, et al. Design and experiment of spoon chain seed metering mechanism of precutting vibration seed feeding cassava planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 20 - 31. (in Chinese)

[14] 侯加林,刘全程,李天华,等. 双充种室大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 21 - 32. HOU Jialin, LIU Quancheng, LI Tianhua, et al. Design and experiment of the garlic seed metering device with double seed-filling chambers[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14): 21 - 32. (in Chinese)

[15] 耿爱军,栗晓宇,侯加林,等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 17 - 25. GENG Aijun, LI Xiaoyu, HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 17 - 25. (in Chinese)

[16] 崔荣江,王小瑜,信嘉程,等. 弧形鸭嘴式大蒜正芽播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 120 - 130. CUI Rongjiang, WANG Xiaoyu, XIN Jiacheng, et al. Design and test of arc duck-billed garlic seed planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 120 - 130. (in Chinese)

[17] 崔荣江,荐世春,杨继鲁,等. 勺链式大蒜取种器的优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 99 - 102. CUI Rongjiang, JIAN Shichun, YANG Jilu, et al. Optimization design and test of take garlic spoon[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 99 - 102. (in Chinese)

[18] 李天华,张海阔,韩相龙,等. 勺链式大蒜播种机漏取种检测与补种装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 24 - 32. LI Tianhua, ZHANG Haikuo, HAN Xianglong, et al. Design and experiment of missing seed detection and the reseeding device for spoon chain garlic seeders[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 24 - 32. (in Chinese)

[19] 苏微,赵庆辉,赖庆辉,等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 144 - 155. SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and eperiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 144 - 155. (in Chinese)

[20] 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 *Inellia ternata*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 60 - 71. (in Chinese)

[21] 丁力,郭海钦,王万章,等. 油莎豆窝眼排种轮低位集穴排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 86 - 97. DING Li, GUO Haiqin, WANG Wanzhang, et al. Design and test of *Cyperus esculentus* cell-wheel seed-metering device with low-position seeding and cavitation function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 86 - 97. (in Chinese)

[22] 侯加林,王后新,牛子孺,等. 大蒜取种装置取种清种性能离散元模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 48 - 57. HOU Jialin, WANG Houxin, NIU Ziru, et al. Discrete element simulation and experiment of picking and clearing performance of garlic seed-picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 48 - 57. (in Chinese)

[23] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35 - 42. SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35 - 42. (in Chinese)

[24] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1 - 20. CENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 - 20. (in Chinese)

[25] WANG H, SUN X, LI H, et al. Design and parameter optimization of a finger clip plate garlic seed-metering device based on EDEM[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 23 - 34.

[26] 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)

[27] 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. 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. (in Chinese)

[28] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 基于 DEM - MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91 - 104. LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seeding-metering device for ginseng based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91 - 104. (in Chinese)