

链勺翘尾自清式半夏精量排种器设计与试验

黄玉祥<sup>1,2</sup> 刘卓韬<sup>1</sup> 杨鑫<sup>1</sup> 冯添<sup>1</sup> 毕于彬<sup>1</sup> 巨晓腾<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 针对半夏种子形状不规则、大小不均匀造成的充种不充分、清种困难等问题, 基于链条翻转运动特性, 本文提出利用转动惯性力清种方法, 设计一种链勺翘尾自清式半夏精量排种器, 通过翘尾种勺及水滴形型孔提高充种率, 实现自清种。通过对排种器工作过程中种子受力情况及运动状态进行分析, 阐述了链勺翘尾自清式排种器工作原理; 基于 DEM-MBD 耦合进行仿真试验, 分析种勺充种倾角、链条张紧力和种勺型孔结构参数对排种器工作性能的影响, 确定排种器结构参数; 设计二次回归正交旋转组合仿真试验, 确定种勺型孔最佳结构参数组合: 种勺型孔长度为 18.6 mm、种勺型孔宽度为 14.1 mm、种勺型孔留种孔深度为 8.6 mm; 为确定排种器最佳作业参数, 以主动链轮转速和种层高度为试验因素, 进行二次回归正交旋转组合台架试验。试验结果表明, 当排种器主动链轮转速为 39.2 r/min、种层高度为 206 mm 时, 排种器作业性能最优, 其合格指数为 93.37%、重播指数为 2.17%、漏播指数为 4.46%, 研究结果可为球茎类中药材排种器设计提供参考。

**关键词:** 半夏; 精量排种器; 链勺式; 自清式

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0279-12

OSID:



Design and Test of Chain Spoon Cocked Tail Self-cleaning  
*Pinellia ternata* Precision Seed Metering Device

HUANG Yuxiang<sup>1,2</sup> LIU Zhuotao<sup>1</sup> YANG Xin<sup>1</sup> FENG Tian<sup>1</sup> BI Yubin<sup>1</sup> JU Xiaoteng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shannxi 712100, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient seed filling and difficult seed cleaning caused by irregular shape and uneven size of *Pinellia ternata* seeds, based on the characteristics of chain flipping motion, a method of using rotational inertia force for seed cleaning was proposed. A chain spoon upturned tail self-cleaning *Pinellia ternata* precision seeder was designed, which improved the seed filling rate and achieved rapid seed cleaning through the spoon upturned tail structure and water droplet shaped holes. By analyzing the force and motion state of seeds during the working process of the seeder, the working principle of the chain spoon self cleaning seeder with upturned tail was explained. Through theoretical calculations and kinematic analysis, simulation experiments were conducted based on DEM-MBD coupling to analyze the effects of different spoon filling angles, chain tension forces, and spoon shaped hole structural parameters on the performance of the seeder. The structural parameters of the seeder were determined. A quadratic regression orthogonal rotation combination simulation experiment was designed to determine the optimal structural parameter combination for spoon shaped holes: spoon shaped hole length was 18.6 mm, spoon shaped hole width was 14.1 mm, and spoon shaped hole retention depth was 8.6 mm. To determine the optimal operating parameters of the seeder, a quadratic regression orthogonal rotation combination bench test was conducted with the driving sprocket speed and seed layer height as experimental factors. The experimental results showed that when the driving sprocket speed of the seeder was 39.2 r/min and the seed layer height was 206 mm, the operational performance of the seeder was optimal, with a qualification index of 93.37%, a replay index of 2.17%, and a leakage index of 4.46%, the research results can provide a reference for the design of seeders for bulbous Chinese medicinal materials.

**Key words:** *Pinellia ternata*; precision seed metering device; chain spoon type; self-cleaning type

收稿日期: 2024-12-15 修回日期: 2025-01-18

基金项目: 陕西省农机研发专项(K4040121337)

作者简介: 黄玉祥(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

0 引言

半夏在我国种植面积逐年提升,其用种量较大,但播种基本采用人工、半人工半机械化等作业方式,机械化水平较低,劳动强度大。播种作为半夏生产首要环节,实现机械化播种并持续提高播种精度是实现半夏高产的必经之路<sup>[1]</sup>。

排种器作为播种机械核心部件,直接影响播种质量<sup>[2-5]</sup>。传统中药材由于种子形状不规则,尺寸差异大等问题,目前没有针对各式中药材种子专用排种器,很大程度上影响了中药材种植机械化和产业化发展。研究人员对中药材排种器展开了大量研究。廖宜涛等<sup>[6]</sup>采用多行并联气力针式排种装置及行星轮点播式导种装置,设计了西洋参精密播种机。赖庆辉等<sup>[7]</sup>根据人参种子特点设计“天圆地方”结构种勺,基本实现播种过程零伤种。曾心玥等<sup>[8]</sup>采用冲突解决原理设计三七排种器,解决机械内充式排种器排种性能与机构设计的矛盾。目前国内半夏排种器大都是通过改进玉米、马铃薯等排种器设备。半夏种子由于具有形状不规则、大小不均匀、表皮易破损等特点,排种过程中主要存在充种不充分、清种困难所带来的重播率、漏播率高和种子表皮粗糙易破损导致的导种管堵塞和种子破损等问题。因此,通过改进其他作物排种器来进行半夏播种常常排种效果不佳、种子损伤率高。结合现有研究发现,窝眼轮式以及外槽轮式排种器在面对球茎类不规则种子时伤种现象明显且充种率较低。而舀勺式排种器由于易充种、损伤率低广泛应用于不规则种子排种过程中<sup>[9-11]</sup>。

针对半夏排种器存在的主要问题,本文在现有精密排种器研究基础上,结合半夏种植农艺及种子特点,以天门半夏种子为研究对象,设计一种球茎类中药材链勺式排种器。基于 DEM - MBD 耦合仿真技术设计翘尾式种勺结构,以改善充种效果并实现自清种功能;通过分析作业过程中种子运动和受力关系,开展性能优化试验,以确定排种器主要结构参数。

1 半夏种子 DEM 参数标定与模型构建

半夏种子尺寸差异较大,按照种子长度分为 20 mm 以上、15 ~ 20 mm、10 ~ 15 mm 及 0 ~ 10 mm 4 个等级。在种植半夏时,半夏产量会随着种茎增大而增加,但是发病率也会随着增加,选择种子长度为 10 ~ 15 mm 的半夏种子进行排种器设计<sup>[12]</sup>。

1.1 种子基础物理参数测量

试验通过分级处理筛选长度为 10 ~ 15 mm 的半夏种子,统计 300 粒种子 3 轴尺寸及 2 个特征尺

寸,发现半夏种子形状多趋近于球形或椭球形。根据半夏种子形状特点及尺寸,将种子分为 3 类。半夏种子尺寸如图 1 所示,种子形状数量分布及尺寸如表 1 所示。

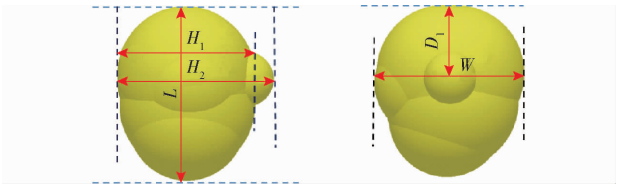


图 1 半夏种子尺寸示意图

Fig.1 *Pinellia ternata* seed size diagram

表 1 种子物理参数

| Tab.1 Seed physical parameters |     |        |        |          |            |              | mm |
|--------------------------------|-----|--------|--------|----------|------------|--------------|----|
| 形状                             | 数量  | 长度 $L$ | 宽度 $W$ | 厚度 $H_1$ | 特征厚度 $H_2$ | 芽尖离顶距离 $D_1$ |    |
| 椭球形                            | 238 | 12.97  | 11.19  | 9.81     | 11.70      | 5.29         |    |
| 顶芽形                            | 26  | 12.11  | 10.48  | 9.90     | 11.43      | 3.38         |    |
| 近球形                            | 36  | 12.33  | 10.77  | 11.39    | 12.82      | 4.33         |    |

1.2 离散元颗粒模型构建

基于半夏种子外观特点建立三维模型,并将其导入 EDEM 中,通过颗粒快速填充功能,得到种子多球面聚合颗粒模型<sup>[13-14]</sup>,种子离散元模型如图 2 所示。

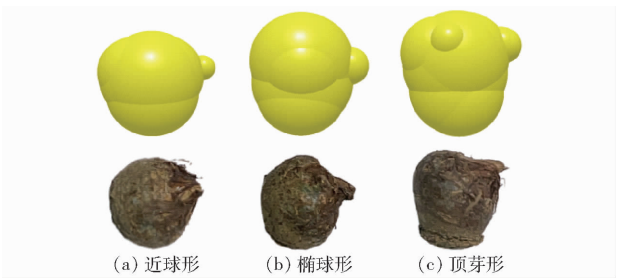


图 2 半夏种子离散元模型

Fig.2 *Pinellia ternata* seed discrete element models

2 排种器工作原理与工作过程

2.1 排种器整体结构

链勺翘尾自清式排种器总体结构如图 3 所示,主要由排种器壳体、限位方管、护种板、从动链轮、回流板、种勺、主动链轮、种箱、张紧弹簧、张紧装置、排种链轮等组成。种勺装配在链条外链节上,种勺与种勺之间紧密排列。

2.2 排种器工作原理

链勺翘尾自清式排种器工作过程分为充种区、清种区、护种区、投种区 4 个阶段,如图 4 所示。

当链勺翘尾自清式排种器开始工作时,主动链轮在动力驱动下带动排种器链条逆时针运动进入充种区,此时种群中下层半夏种子在重力、种子间和种子与种箱内壁间相互作用力共同作用下充入种勺取

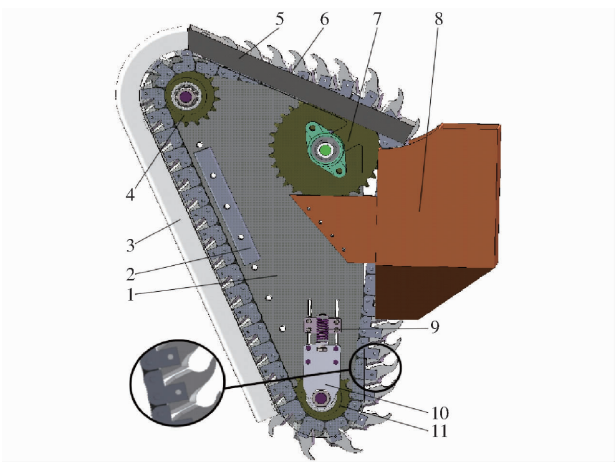


图 3 链勺翘尾自清式半夏精密排种器结构示意图  
Fig. 3 Schematic of structure of chain spoon warped tail self-cleaning *Pinellia ternata* precision seed metering device  
1. 排种器外壳 2. 限位方管 3. 护种板 4. 从动链轮 5. 回流板 6. 种勺 7. 主动链轮 8. 种箱 9. 张紧装置 10. 链条角度调节装置 11. 排种链轮

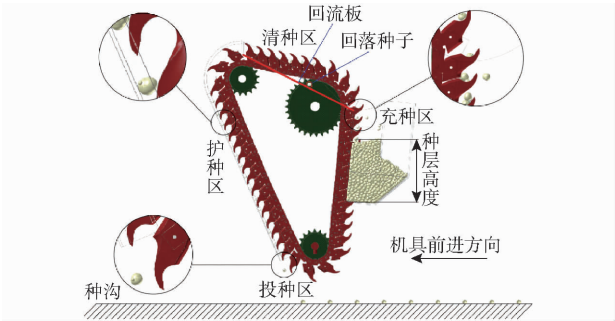


图 4 排种器工作原理示意图  
Fig. 4 Schematic of working principle of seed metering device

种部分,排种链上种勺依次舀取半夏种子;在经过清种区时,种勺处于留种部分的目标种子保留,多余种子会被清理,落入回流板,通过自身重力落回种箱;进入护种区,种勺和护种板形成封闭空间,种子随链条运动至投种区;进入投种区时,封闭空间打开,种子失去支持力掉落到种沟内,完成播种过程。

### 2.3 排种器工作过程

#### 2.3.1 排种器充种过程

充种过程是排种器工作过程第 1 阶段,是影响排种器工作合格率的关键环节,排种器充种过程如图 5 所示。为保证种勺在经过种箱时可以顺利取到种子,需满足

$$\begin{cases} W_t \geq L_{\max} \\ l \leq 2P \\ \alpha \geq \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中  $W_t$ ——充种腔宽度,mm  
 $l$ ——种勺长度,mm  
 $\alpha$ ——充种倾角, ( $^{\circ}$ )

$\varphi$ ——半夏种子自然休止角, ( $^{\circ}$ )  
 $P$ ——链条节距,mm  
 $L_{\max}$ ——半夏种子长度最大值,mm

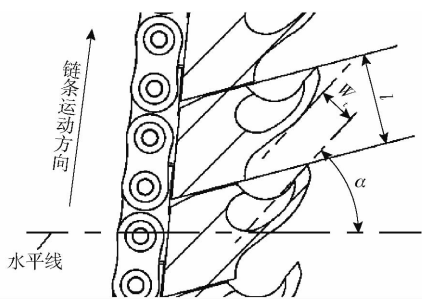


图 5 排种器链条充种示意图  
Fig. 5 Chain of seed metering device filling diagram

试验测得半夏种子自然休止角为  $35.72^{\circ}$ ,为使种子顺畅进入充种腔,故得到充种倾角  $\alpha$  需大于  $35.72^{\circ}$ ,通过单因素试验确定充种倾角为  $45^{\circ}$  时,排种器充种效果较好。

种勺安装在链条外链节上且紧密排列,所以种勺长度不能大于链条外链节的装配间距即两倍链条节距,考虑到装配间隙与加工误差存在,最后确定种勺长度为 36 mm。根据式(1)结合种勺外形具体尺寸,确定充种腔宽度  $W_t$  为 15 mm。

#### 2.3.2 排种器清种过程

为了保证种勺充种充分,种勺充种腔较大,在进入清种阶段时往往会携带 2 粒种子。链条带动种勺进入清种阶段时,种勺会发生翻转运动,种勺型孔部分留种孔内种子会保留,而型孔内多余种子由于惯性作用会从型孔内滑落。当种子从型孔内滑落时,为了快速有效地将种子落到回流板上,应保证种子第一时间落在种勺背部清种斜面上,因此清种链条应该存在一定倾角使种勺与种勺间存在高度差。同时,为了保证种勺留种孔内种子不会因为链条翻转而掉落,种勺留种孔在清种阶段应该保持在水平位置,为此链条清种倾角和种勺结构设计应满足

$$\begin{cases} \beta = \beta_1 \\ s = l \sin \beta_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\beta$ ——链条清种倾角, ( $^{\circ}$ )  
 $\beta_1$ ——种勺底部斜面倾角, ( $^{\circ}$ )  
 $s$ ——种勺抬升高度,mm

种勺背部清种斜面主要作用面高度为 7 mm 左右,因此种勺抬升高度  $s$  为 7 mm。结合式(2)可得链条清种倾角  $\beta$  与种勺底部斜面倾角  $\beta_1$  为  $11^{\circ}$ ,排种链清种阶段倾角如图 6 所示。

### 3 关键部件设计

#### 3.1 排种器链条设计

排种器链条属于与种子间接接触部件,所选链

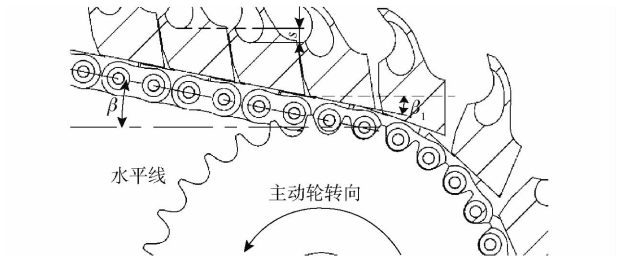


图 6 排种链清种阶段倾角示意图

Fig. 6 Inclination diagram of seeding chain clearing stage

条滚子间隙及链板内宽与半夏种子三轴尺寸有直接关系。同时,链条链节各参数也直接影响种勺结构与参数。半夏种子长度、宽度、厚度分别为 10.11 ~ 15.00 mm、8.59 ~ 14.28 mm、7.23 ~ 13.74 mm,其三轴尺寸平均值分别为:12.65、10.91、9.82 mm,整体呈椭球形。参考 GB/T 1243—2006《传动用短节距精密滚子链、套筒链、附件和链轮》选择链号 12A 链条作为排种链条,主要结构如图 7 所示,链条主要结构参数见表 2。

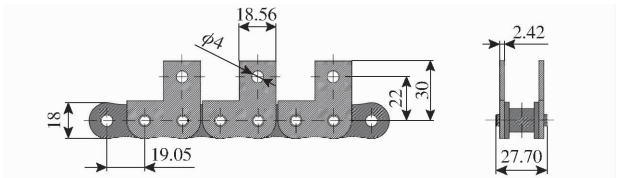


图 7 链条结构示意图

Fig. 7 Chain structure diagram

表 2 链条主要结构参数

| Tab. 2 Main structural parameters of chain mm |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| 参数                                            | 数值    |
| 12A 链条节距                                      | 19.05 |
| 链条内链板高度                                       | 18.00 |
| 单排链条销轴长度                                      | 27.70 |
| 链条附板厚                                         | 2.42  |
| 链条附板高                                         | 30.00 |
| 链条附板宽                                         | 18.56 |
| 链条附板孔径                                        | 4.00  |

3. 2 种勺结构及参数设计

种勺是链勺翘尾自清式半夏精量排种器将单粒半夏种子从种群分离,并将种子平稳输送到投种区完成排种过程关键部件。以半夏种子三轴尺寸及特征尺寸为参考,充种条件为依据,通过理论计算及运动学分析确定链勺翘尾自清式半夏精量排种器种勺部件结构参数<sup>[15-17]</sup>。

3. 2. 1 种勺总体结构设计

种勺整体分为留种部分和清种部分,为避免取种过程中充种不充分现象,并能保证种勺在进入护种区时,种勺能与护种板之间形成一定的相对独立的空间,因此种勺总体结构设计为上窄下宽形状,种勺结构如图 8 所示。

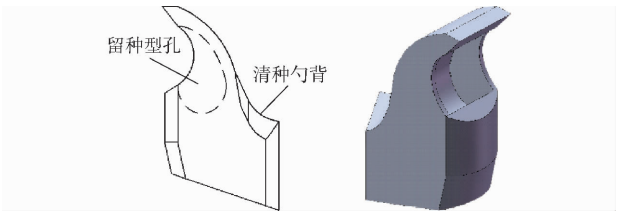


图 8 种勺结构示意图

Fig. 8 Seed scoop structure diagram

3. 2. 2 种勺型孔结构设计

型孔结构直接影响排种器工作性能,是排种器结构核心参数。为保证排种器单粒播种生产需要,型孔结构和尺寸应该满足一定的设计要求。

半夏种子球度  $S_p$  计算式为

$$S_p = \frac{\sqrt[3]{LHW}}{L} \times 100\% \tag{3}$$

根据测量半夏三轴平均尺寸按照式(3)计算可得半夏球度  $S_p$  为 80.5%,为保证种子顺利进入种勺且不滑出,种勺留种部分应为近球形结构。并且种勺型孔长度、宽度和深度满足

$$\begin{cases} L_{\max} < L_1 < L_{\text{ave}} + H_{\text{ave}} \\ W_{\text{ave}} < W_1 < 2H_{\min} \\ \frac{1}{2}H_{\max} < D < 2H_{\min} \end{cases} \tag{4}$$

式中  $L_{\text{ave}}$ ——半夏种子长度平均值,mm  
 $W_{\text{ave}}$ ——半夏种子宽度平均值,mm  
 $H_{\min}$ ——半夏种子厚度最小值,mm  
 $H_{\text{ave}}$ ——半夏种子厚度平均值,mm  
 $L_1$ ——种勺型孔长度,mm  
 $H_{\max}$ ——半夏种子厚度最大值,mm  
 $W_1$ ——种勺型孔宽度,mm  
 $D$ ——种勺型孔留种孔深度,mm

结合半夏种子三轴尺寸及球度,为使在充种过程中更加顺畅,将种勺型孔设计为水滴孔形状,种勺型孔结构如图 9 所示。

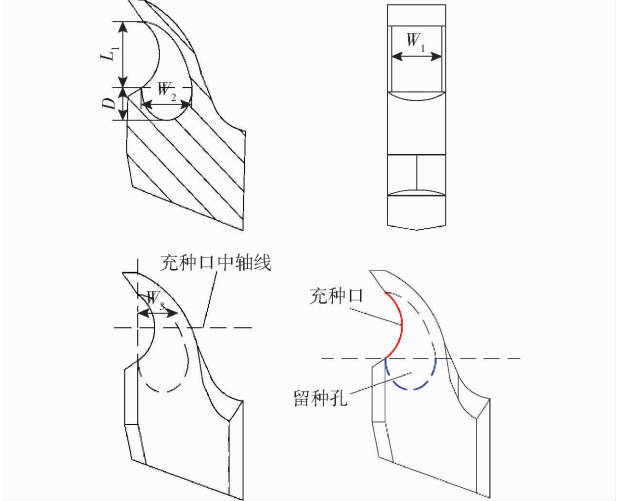


图 9 种勺型孔结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of seed scoop type hole



种勺型孔分为充种口和留种孔两部分组成,可以保证种子在充种口顺利滑入留种孔,同时其他种子无法进入留种孔。型孔充种口处设计有椭圆形缺口,缺口设计可以有效减少卡种及型孔携种过多的情况,种勺型孔携种状态如图 10 所示。为保证充种过程流畅,种勺型孔曲线采用 3 段不同曲线组合而成,充种口曲线根据  $L_{\max}/3$  和  $L_1$  作半椭圆线,型孔充种曲线根据  $L_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  作近似于椭圆线的拟合曲线,留种孔曲线根据  $W_2$ 、 $D$  作椭圆线。

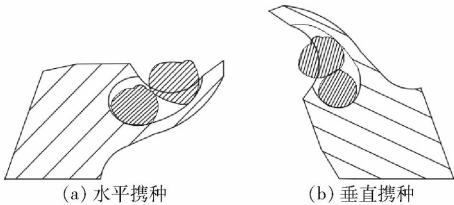


图 10 种勺型孔携种状态

Fig. 10 Seed ladle type bore carrying state

留种孔内仅容纳 1 粒种子,多余种子在排种器清种过程时从种勺取种部分顺利清掉。因此型孔组合尺寸还需要满足

$$\begin{cases} L_{\max} < L_1 + D < L_{\max} + W_{\max} \\ L_{\max} \leq W_2 < 2W_{\min} \\ L_{\text{ave}} \leq W_3 \leq \frac{3}{2}L_{\max} \\ D < W_1 < L_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $W_{\max}$ ——半夏种子宽度最大值,mm  
 $W_2$ ——种勺型孔留种孔宽度,mm  
 $W_3$ ——种勺型孔充种宽度,mm  
 $W_{\min}$ ——半夏种子宽度最小值,mm

由于种勺型孔留种孔宽度  $W_2$  和种勺型孔充种宽度  $W_3$  直接影响着型孔留种的合格率,应该严格保证该部分单一留种,因此将该部分尺寸设计为允许最小尺寸即  $W_2 = 15 \text{ mm}$ ,  $W_3 = 12.6 \text{ mm}$ ,通过仿真试验进行设计检验,该尺寸可以保证排种器顺利充种。根据式(4)、(5)计算得到型孔其余尺寸  $L_1$  为 15 ~ 22.47 mm,  $W_1$  为 10.91 ~ 15.68 mm,  $D$  为 6.87 ~ 14.46 mm。后续结构和尺寸确定还需经过力学分析以及多因素试验来进行优化设计。

3.2.3 种勺清种结构设计

在面对表皮粗糙且体积较小的中药材种子时,传统链勺式排种器作业时容易出现重播、漏播现象<sup>[18]</sup>。为解决排种器清种效果不佳的问题,在种勺型孔研究基础上设计翘尾清种部分。种勺背部设计清种曲面,总体呈 U 形,当种子掉落在该部分时,可以快速把种子清走。为保证种子掉落在勺背曲面上时,种子可及时滑落,将曲面设计为 2 个斜面组合,斜面沿种勺中轴线对称分布,且斜面倾角设置为 25°,大于半夏种子与 ABS 材料之间的最大静摩擦

角,清种结构如图 11 所示。

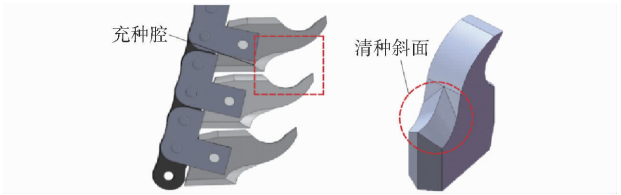


图 11 种勺清种斜面

Fig. 11 Seed scoop clear seed bevel

由于翘尾种勺排列紧凑,种勺尾部结构在随链条运动至清种阶段时会发生明显抬起与回落运动。种勺通过链条带动在翻越链轮处后,种勺一般只携带 1 ~ 2 粒种子进入清种阶段,种勺运动如图 12 所示。从图 12 可得,种勺尾部在翻越主动链轮处时,相对于充种口会有明显抬起与回落运动。在链条运动到主动链轮处时,翘尾结构相对充种口抬起,对充种腔内种区起到扰动作用,避免种子由于表皮粗糙卡在种勺充种口处导致重播或漏播。同时还能有效减少种勺在进入清种阶段携种量,避免由于过量携种导致清种不及时。

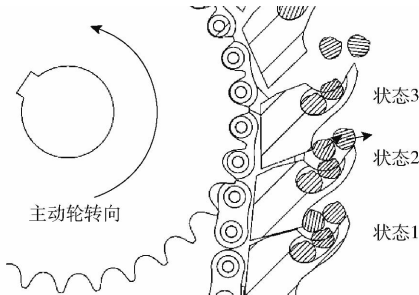
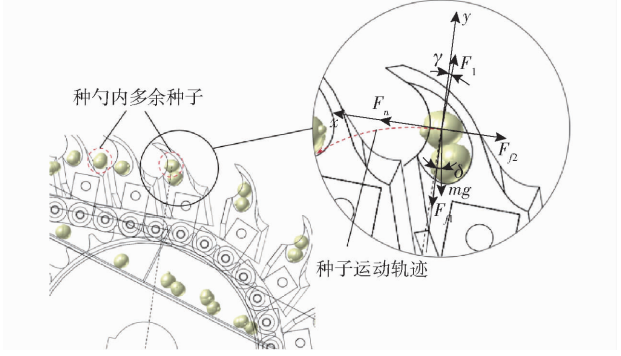


图 12 种勺清种结构工作示意图

Fig. 12 Kind scoop clear kind structure work schematic

3.3 主动链轮设计

种勺在翻越主动链轮进入链条清种区时,种勺往往会携带 1 到 2 粒种子。半夏种子在随种勺翻越主动链轮时,留种孔内的半夏种子由于型孔壁阻拦作用得到保留,而留种孔外种子在转动惯性力作用下保持圆周运动导致从种勺内滑出。对翻越主动链轮时种勺内的多余半夏种子进行受力分析,如图 13



所示。

以半夏种子质心为原点,垂直于种子与勺壁接触面为  $x$  轴,具有运动趋势的方向为  $x$  轴正向,垂直于  $x$  轴指向勺壁方向为  $y$  轴正向,建立直角坐标系,临界状态下半夏种子受力方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_n - F_1 \sin \gamma - mg \sin \delta - F_{f2} = 0 \\ \sum F_y = F_1 \cos \gamma - F_{f1} - mg \cos \delta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = m \frac{1\,000v^2}{R} \\ F_{f1} = \mu_1 F_n \\ F_{f2} = \mu_2 mg \cos \delta \\ \delta = \beta = 11^\circ \end{cases} \quad (7)$$

- 式中
- $\sum F_x$ ——种子在  $x$  方向上所受合力,N
- $\sum F_y$ ——种子在  $y$  方向上所受合力,N
- $F_1$ ——转动惯性力,N
- $F_n$ ——种勺壁对种子支持力,N
- $F_{f1}$ ——种子与种勺间的摩擦力,N
- $F_{f2}$ ——种子与种子间的摩擦力,N
- $m$ ——半夏种子质量,kg
- $R$ ——转动半径,mm
- $\gamma$ —— $F_1$ 与  $y$  轴正向夹角, ( $^\circ$ )
- $\delta$ ——重力与  $y$  轴负向夹角, ( $^\circ$ )
- $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$
- $\mu_1$ ——种子与种勺间摩擦因数
- $\mu_2$ ——种子与种子间摩擦因数
- $v$ ——排种链条线速度,  $\text{m/s}$

为保证种勺内多余的种子沿运动轨迹滑落到清种曲面上,需保证  $y$  轴方向上合力  $\sum F_y \leq 0$ ,即

$$F_1 \cos \gamma \leq F_{f1} + mg \cos \delta \quad (8)$$

联立式(6)~(8)得

$$R \geq \frac{10^3 v^2 (\cos \gamma - \mu_1 \sin \gamma)}{g (\cos \delta - \mu_1 \sin \delta - \mu_1 \mu_2 \cos \delta)} \quad (9)$$

机械自走式播种机速度一般为不超过 3 km/h, 为保证充种质量,排种链条线速度不超过 0.55 m/s, 故排种链最大线速度  $v_{\max}$  为 0.55 m/s<sup>[19]</sup>。当  $\gamma$  取 0 $^\circ$ 时,不等式右侧取最大值即  $R \geq 44$  mm。较大的分度圆直径可减小排种链条弯曲应力,可以减少种勺在翻越主动链轮时的翻转间隙,避免卡种,综合考虑,确定主动链轮分度圆半径为 94 mm,即 31 齿。

3.4 链条张紧装置结构设计

当两链轮靠近或者同一铅垂面时,链节磨损伸长后,会降低传动能力,因此需增加张紧装置。同时,由于排种器在充种、清种和过渡阶段容易受到外力影响。因此,将排种器下侧从动链轮设计为张紧

链轮,张紧方向沿张紧链轮与主动链轮中心连线<sup>[20]</sup>。为避免因作业条件改变导致的跳齿或者脱链情况,将链条张紧装置设计为可滑动调节结构,装置如图 14 所示。

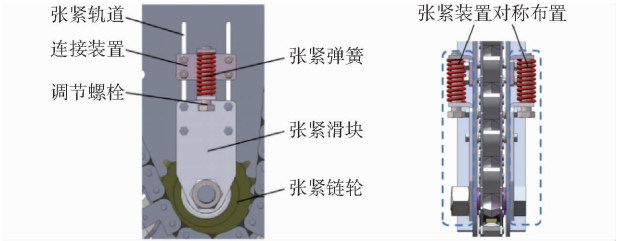


图 14 张紧装置结构示意图

Fig. 14 Structure diagram of chain tensioning device

张紧装置采用弹簧自动张紧方式,对称结构设计避免单一弹簧受力过大。根据 GB1239—76《主要弹簧材料的使用性能》弹簧材料选择不锈钢弹簧。弹簧设计参数参考《机械设计手册》结合排种器具体工作要求及总体结构设计,选择弹簧线径  $d_m$  为 2.5 mm、弹簧中径  $D_m$  为 16 mm,初步设计弹簧自由长度  $L_f$  为 50 mm、弹簧压缩量  $X_c$  为 10 mm。根据 12A 链条单排链测量力为 280 N,弹簧张紧力需满足

$$\begin{cases} F_s \leq 280 \text{ N} \\ F_s = 2kX_c \\ k = \frac{Gd_m^4}{8D_m^3N_c} \end{cases} \quad (10)$$

- 式中
- $F_s$ ——弹簧预紧力,N
- $G$ ——不锈钢弹簧剪切弹性模量,取 7 300 N/mm
- $k$ ——弹簧刚度,N/mm
- $N_c$ ——弹簧有效圈数

由式(10)可知,在张紧力未知情况下,弹簧刚性和弹簧有效圈数无法确定。所以,张紧力、弹簧刚度和有效圈数还需进一步试验后确定。

4 基于 DEM - MBD 耦合的仿真试验

4.1 排种器仿真模型构建

由于 EDEM 和 RecurDyn 耦合仿真十分耗时,为了在不影响仿真真实性情况下减少仿真时长,需在三维建模时对排种器模型进行简化处理。将多体动力学仿真过程中不影响工作性能部件如外壳、转动轴等省去,同时对模型中各零部件进行简化处理。链条张紧装置结构复杂,并且弹簧为柔性体结构,在仿真中会大大增加仿真时长,考虑到张紧装置在排种器工作过程中主要是施加张紧方向上的张紧力作用,可将该部分简化为转动轴部件,通过设置移动副限制运动方向并添加轴向力来实现张紧力作用效果,排种器简化仿真模型如图 15 所示。

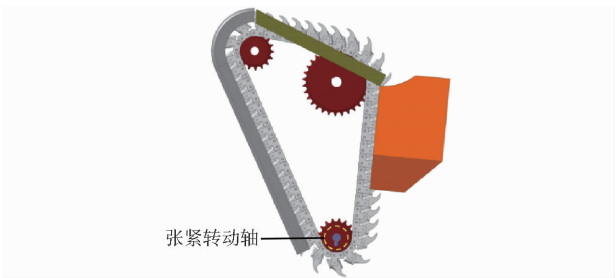


图 15 排种器简化仿真模型

Fig. 15 Simplified simulation model of seed metering device

4.2 仿真参数确定

根据排种器实际加工所用材料对仿真模型零部件进行材质特性设置。在排种器工作过程中与种子接触的部件有种箱、种勺、排种链条、回流板和护种板,其中种箱、种勺和护种板为 ABS 注塑件,排种链条和回流板为不锈钢材料。颗粒-颗粒及颗粒-排种器模型均采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型<sup>[21-24]</sup>。半夏种子、不锈钢和 ABS 塑料的基础物理参数及相互间接触参数如表 3 所示。

表 3 离散元仿真参数

Tab.3 Discrete element simulation parameters

| 参数                       | 半夏颗粒               | 不锈钢                  | ABS 塑料            |
|--------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| 泊松比                      | 0.37               | 0.30                 | 0.34              |
| 剪切模量/Pa                  | $1.03 \times 10^7$ | $7.0 \times 10^{10}$ | $3.0 \times 10^9$ |
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.03               | 7.80                 | 1.25              |
| 碰撞恢复系数(与半夏颗粒)            | 0.463              | 0.531                | 0.421             |
| 静摩擦因数(与半夏颗粒)             | 0.454              | 0.492                | 0.424             |
| 滚动摩擦因数(与半夏颗粒)            | 0.093              | 0.052                | 0.059             |

4.3 单因素仿真试验

结合排种器结构设计与工作过程,采用 DEM - MBD 耦合仿真对排种器作业性能进行单因素仿真试验。通过预试验确定主动链轮转速为 32 r/min、充种倾角为 50°、种层高度为 200 mm、种勺型孔长度为 20 mm、种勺型孔宽度为 14 mm、种勺型孔深度为 9 mm、链条张紧力为 280 N 进行单因素仿真试验。试验性能指标包括合格指数、重播指数和漏播指数,每组试验重复试验 3 次,每次统计 100 个种勺取种情况<sup>[25]</sup>。

4.3.1 排种链条张紧力试验

为确定张紧装置弹簧预紧力,在仿真模型的张紧转动轴上沿张紧轨道方向添加恒定轴向力进行仿真试验。根据 12A 单排链条测量力为 280 N,分析弹簧预紧力为 200、220、240、260、280 N 时对排种器作业性能的影响。由于张紧装置结构对称,故在传动轴两侧沿张紧轨道分别添加 100、110、120、130、140 N 恒定轴向力<sup>[26]</sup>,试验结果如表 4 所示。

表 4 链条张紧力单因素试验结果

Tab.4 Results of single factor test of anti-stuck seed combination surface

| 张紧力/N | 合格指数/% | 漏播指数/% | 重播指数/% |
|-------|--------|--------|--------|
| 200   | 84.67  | 10.33  | 5.00   |
| 220   | 87.33  | 8.33   | 4.33   |
| 240   | 89.67  | 6.67   | 3.67   |
| 260   | 92.33  | 4.00   | 3.67   |
| 280   | 90.67  | 5.33   | 4.00   |

由表 4 可知,随着对链条施加预紧力逐渐增大,合格指数呈先增大后减小趋势,漏播指数呈先减少后增大趋势,重播指数呈逐渐减少趋势并且趋于平稳,当张紧力为 260 N 时合格指数最高,漏播指数最低,重播指数也处于较低值。

用 RecurDyn 的后处理功能分析排种链条工作过程中的法向位移,得到不同张紧力作用下链条法向位移曲线如图 16 所示。

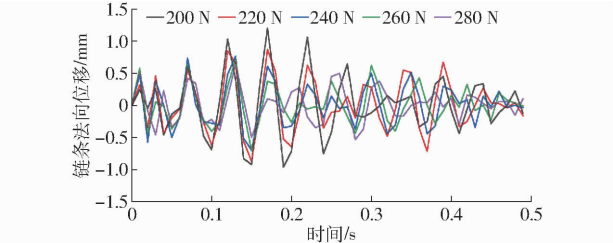


图 16 不同张紧力下链条法向位移变化曲线

Fig. 16 Change curves of chain normal displacement under different tensions

由图 16 可知,随着链条张紧力增加,排种链条法向位移逐渐减小,链条抖动量也随之减小;排种器充种阶段种勺充种质量先提高后减小,排种器合格指数也随着先增大后减小,说明适当的链条抖动有助于种勺充种故选择链条张紧力为 260 N。结合张紧装置理论分析,根据《机械设计手册》选择弹簧有效圈数为 7,确定弹簧刚度为 12.4 N/mm,弹簧压缩量为 10.5 mm。

试验结果表明,随着链条抖动量逐渐减小,排种器重播指数变化趋势并不明显,通过 EDEM 后处理功能对待清种子清种阶段的运动轨迹进行分析,种子运动轨迹如图 17 所示。由图 17 可知,排种器清

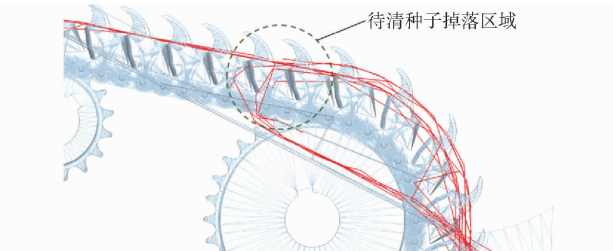


图 17 清种阶段种子运动轨迹

Fig. 17 Movement path of seeds in clearing stage

种阶段种子掉落区域基本在种勺翻越完主动链轮处。通过对各个张紧力作用下待清种子运动轨迹进行分析,发现随着链条张紧力改变,待清种子主要掉落区域并未发生明显改变,说明链条振动情况对排种器清种阶段作业效果影响较小。

4.3.2 种勺型孔结构参数单因素试验

种勺型孔尺寸直接影响排种器作业性能,通过单因素仿真试验分析种勺型孔结构参数  $L_1$ 、 $W_1$ 、 $D$  对排种器作用性能的影响,以合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标。通过理论分析结合种勺实际加工精度,单因素试验参数设计如表 5 所示。单因素试验时,只改变其中 1 个因素数值,其他两个因素取中间值,每组重复 3 次试验,每次统计 100 次种勺取种情况,统计结果取 3 次试验的平均值,试验结果如表 6 所示。

表 5 种勺型孔最优参数单因素试验设计  
Tab.5 Single factor experimental design of optimal parameters of seed scoop hole

| 水平 | 因素                  |                     |                       |
|----|---------------------|---------------------|-----------------------|
|    | 种勺型孔长度<br>$L_1$ /mm | 种勺型孔宽度<br>$W_1$ /mm | 种勺型孔留种<br>孔深度 $D$ /mm |
| 1  | 16                  | 11.5                | 7                     |
| 2  | 17                  | 12.5                | 8                     |
| 3  | 18                  | 13.5                | 9                     |
| 4  | 19                  | 14.5                | 10                    |
| 5  | 20                  | 15.5                | 11                    |

表 6 种勺型孔最优参数单因素试验结果  
Tab.6 Single factor test results of optimal parameters of seed scoop hole

| 因素                | 数值/mm | 合格指数/<br>% | 漏播指数/<br>% | 重播指数/<br>% |
|-------------------|-------|------------|------------|------------|
| 种勺型孔长度 $L_1$      | 16    | 82.33      | 16.33      | 1.33       |
|                   | 17    | 87.67      | 10.33      | 2.00       |
|                   | 18    | 92.00      | 4.67       | 3.33       |
|                   | 19    | 92.67      | 3.33       | 4.00       |
|                   | 20    | 85.33      | 4.33       | 10.33      |
| 种勺型孔宽度 $W_1$      | 11.5  | 81.00      | 17.33      | 1.67       |
|                   | 12.5  | 85.67      | 12.00      | 2.33       |
|                   | 13.5  | 91.67      | 5.33       | 3.00       |
|                   | 14.5  | 92.33      | 5.00       | 2.67       |
|                   | 15.5  | 87.00      | 4.67       | 8.33       |
| 种勺型孔留种孔<br>深度 $D$ | 7     | 88.33      | 10.33      | 1.33       |
|                   | 8     | 92.00      | 5.67       | 2.33       |
|                   | 9     | 90.67      | 4.67       | 4.67       |
|                   | 10    | 85.33      | 3.33       | 11.33      |
|                   | 11    | 81.00      | 2.00       | 17.00      |

根据表 6,考虑到各因素间的交互作用,选择种勺型孔长度  $L_1$ 、种勺型孔宽度  $W_1$  以及种勺型孔留种

孔深度  $D$  分别为 18 ~ 20 mm、13.5 ~ 15.5 mm、7 ~ 10 mm,进行组合试验。

4.4 种勺型孔最佳结构参数组合试验

以种勺型孔长度  $L_1$ 、种勺型孔宽度  $W_1$ 、种勺型孔留种孔深度  $D$  为试验因素,以合格指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、漏播指数  $Y_3$  为评价指标进行二次回归正交旋转组合仿真试验,因素水平编码见表 7。

表 7 试验因素编码  
Tab.7 Test factors and code

| 编码     | 因素                  |                     |                       |
|--------|---------------------|---------------------|-----------------------|
|        | 种勺型孔长度<br>$L_1$ /mm | 种勺型孔宽度<br>$W_1$ /mm | 种勺型孔留种<br>孔深度 $D$ /mm |
| -1.682 | 18.0                | 13.5                | 7.0                   |
| -1     | 18.4                | 13.9                | 7.6                   |
| 0      | 19.0                | 14.5                | 8.5                   |
| 1      | 19.6                | 15.1                | 9.4                   |
| 1.682  | 20.0                | 15.5                | 10.0                  |

排种器工作参数:动链轮转速为 32 r/min、充种倾角为 45°、种层高度为 200 mm、链条张紧力为 260 N。在排种器稳定工作状态下,对连续 100 个种勺排种情况进行统计,每组取 3 次重复试验平均值作为试验结果,试验方案与试验结果如表 8 所示,其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分别为种勺型孔长度、种勺型孔宽度、种勺型孔留种孔深度编码值。

表 8 试验方案与结果  
Tab.8 Experimental scheme and results

| 序号 | 因素     |        |        | $Y_1$ /% | $Y_2$ /% | $Y_3$ /% |
|----|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
|    | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  |          |          |          |
| 1  | -1     | -1     | -1     | 91.00    | 0.67     | 8.33     |
| 2  | 1      | -1     | -1     | 91.67    | 1.67     | 6.67     |
| 3  | -1     | 1      | -1     | 90.67    | 1.00     | 8.33     |
| 4  | 1      | 1      | -1     | 91.67    | 3.00     | 5.33     |
| 5  | -1     | -1     | 1      | 91.67    | 6.67     | 1.67     |
| 6  | 1      | -1     | 1      | 91.00    | 4.33     | 4.67     |
| 7  | -1     | 1      | 1      | 87.00    | 10.67    | 2.33     |
| 8  | 1      | 1      | 1      | 85.67    | 10.33    | 4.00     |
| 9  | -1.682 | 0      | 0      | 93.67    | 2.67     | 3.67     |
| 10 | 1.682  | 0      | 0      | 92.00    | 2.33     | 5.67     |
| 11 | 0      | -1.682 | 0      | 93.00    | 1.67     | 5.33     |
| 12 | 0      | 1.682  | 0      | 87.00    | 7.33     | 5.67     |
| 13 | 0      | 0      | -1.682 | 92.00    | 1.00     | 7.00     |
| 14 | 0      | 0      | 1.682  | 87.33    | 10.67    | 2.00     |
| 15 | 0      | 0      | 0      | 93.00    | 3.00     | 4.00     |
| 16 | 0      | 0      | 0      | 93.33    | 3.67     | 3.00     |
| 17 | 0      | 0      | 0      | 92.33    | 4.00     | 3.67     |
| 18 | 0      | 0      | 0      | 92.67    | 3.67     | 3.67     |
| 19 | 0      | 0      | 0      | 93.67    | 3.00     | 3.33     |
| 20 | 0      | 0      | 0      | 93.00    | 3.67     | 3.33     |
| 21 | 0      | 0      | 0      | 94.00    | 3.00     | 3.00     |
| 22 | 0      | 0      | 0      | 92.67    | 3.33     | 4.00     |
| 23 | 0      | 0      | 0      | 93.00    | 3.33     | 3.67     |



为了确定排种器最佳作业参数,运用 Design-Expert 13 的多目标优化算法对试验指标回归模型进行优化求解,根据排种器作业性能要求,以合格指数最高、重播指数和漏播指数最低为优化目标。优化目标函数和试验因素约束条件为

$\max Y_1$

$\min Y_2$

$\min Y_3$

s. t.

$-1.682 \leq X_1 \leq 1.682$

$-1.682 \leq X_2 \leq 1.682$

$-1.682 \leq X_3 \leq 1.682$

(11)

求解式(11)可得,种勺型孔长度为 18.6 mm、种勺型孔宽度为 14.1 mm、种勺型孔留种孔深度为 8.6 mm 时排种器作业性能最优,此时合格指数最高、重播和漏播指数最低,分别为 93.52%、3.14%、3.34%。

5 台架试验

为了进一步检验链勺翘尾自清式半夏精量排种器可靠性,同时进行排种器最佳工作参数二次回归正交旋转组合试验,进行排种器试验样机台架试验。

试验在西北农林科技大学农业机械装备实验室 JSP-12 型视觉排种器性能试验台上进行,试验装置如图 18 所示。

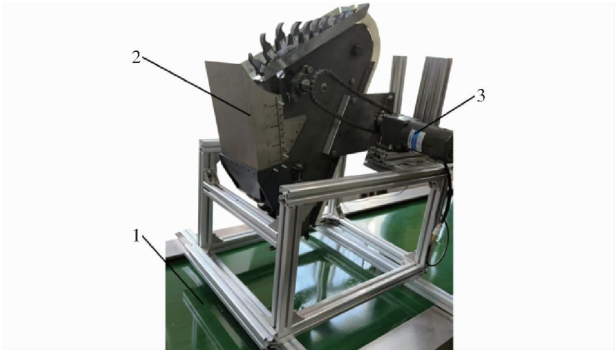


图 18 排种器台架试验装置

Fig. 18 Bench test device of seed metering device

1. JSP-12 型试验平台 2. 链勺翘尾自清式半夏精量排种器  
3. 调速电机

通过仿真试验确定种勺最优参数,进行台架试验对种勺最优参数进行验证试验,试验结果为合格指数为 92.67%、重播指数为 2.67%、漏播指数 4.67%,试验结果较仿真结果相比作业性能有所下降。

5.1 最佳工作参数组合试验

主动链轮转速及种层高度对排种器充种、清种效果有重要影响,是排种器主要工作参数之一。通过台架单因素试验确定工作参数:主动链轮转速为 30~50 r/min,种层高度确定为 150~250 mm。

为获得排种器最佳作业参数,进一步探究主动链轮转速与种层高度对排种器作业性能的影响,基于单因素试验结果结合排种器工作参数设计,采取二因素五水平中心旋转组合试验来确定排种器最佳作业参数,其中试验编码如表 9 所示。

表 9 台架试验因素编码  
Tab. 9 Test factors and code

| 编码     | 因素                            |         |
|--------|-------------------------------|---------|
|        | 主动链轮转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 种层高度/mm |
| -1.414 | 30.0                          | 150     |
| -1     | 32.9                          | 165     |
| 0      | 40.0                          | 200     |
| 1      | 47.1                          | 235     |
| 1.414  | 50.0                          | 250     |

试验方案和结果如表 10 所示,其中  $x_1$ 、 $x_2$  分别为主动链轮转速和种层高度编码值,以合格指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、漏播指数  $Y_3$  为试验指标。

表 10 台架试验方案与结果  
Tab. 10 Experimental scheme and results

| 序号 | 因素     |        | $Y_1/\%$ | $Y_2/\%$ | $Y_3/\%$ |
|----|--------|--------|----------|----------|----------|
|    | $x_1$  | $x_2$  |          |          |          |
| 1  | -1     | -1     | 88.33    | 1.33     | 10.33    |
| 2  | 1      | -1     | 86.00    | 2.67     | 11.33    |
| 3  | -1     | 1      | 92.00    | 4.67     | 3.33     |
| 4  | 1      | 1      | 90.33    | 3.33     | 6.33     |
| 5  | -1.414 | 0      | 90.33    | 4.00     | 5.67     |
| 6  | 1.414  | 0      | 86.33    | 2.67     | 11.00    |
| 7  | 0      | -1.414 | 85.33    | 1.00     | 13.67    |
| 8  | 0      | 1.414  | 92.67    | 4.33     | 3.00     |
| 9  | 0      | 0      | 92.33    | 2.33     | 5.33     |
| 10 | 0      | 0      | 92.67    | 2.00     | 5.33     |
| 11 | 0      | 0      | 93.33    | 2.00     | 4.67     |
| 12 | 0      | 0      | 94.00    | 1.00     | 5.00     |
| 13 | 0      | 0      | 91.67    | 2.67     | 5.67     |
| 14 | 0      | 0      | 94.33    | 1.33     | 4.33     |
| 15 | 0      | 0      | 93.67    | 1.67     | 4.67     |
| 16 | 0      | 0      | 91.33    | 2.33     | 6.33     |

5.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行方差分析,结果见表 11。通过对试验数据进行分析 and 拟合,建立合格指数  $Y_1$ 、重播指数  $Y_2$ 、漏播指数  $Y_3$  与主动链轮转速  $x_1$ 、种层高度  $x_2$  间的回归方程

$$Y_1 = 92.92 - 1.19x_1 - 2.31x_2 - 0.1651x_1x_2 - 2.18x_1^2 - 1.85x_2^2$$

(12)

$$Y_2 = 1.92 - 0.2408x_1 + 1.10x_2 - 0.6794x_1x_2 + 0.7143x_1^2 + 0.3777x_2^2$$

(13)

$$Y_3 = 5.17 + 1.43x_1 - 3.41x_2 + 0.5092x_1x_2 + 1.46x_1^2 + 1.47x_2^2$$

(14)

由表 11 可得,回归模型合格指数、重播指数和漏播指数模型  $P$  均小于 0.01,差异极显著,且失拟项差异不显著,回归方程不失拟。为直观分析两因

素对试验指标的影响,对试验结果数据处理得到其响应面如图 19 所示。

由图 19a 可得,当排种器主动链轮转速为 36.4 ~

表 11 试验结果方差分析  
Tab. 11 Analysis of variance for the results of orthogonal experiments

| 方差来源     | 合格指数    |     |         |             | 重播指数    |     |         |            | 漏播指数   |     |        |             |
|----------|---------|-----|---------|-------------|---------|-----|---------|------------|--------|-----|--------|-------------|
|          | 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       | 118.57  | 5   | 24.07   | <0.000 1 ** | 16.90   | 5   | 12.79   | 0.000 4 ** | 143.50 | 5   | 47.53  | <0.000 1 ** |
| $x_1$    | 11.35   | 1   | 11.52   | 0.006 8 **  | 0.462 6 | 1   | 1.75    | 0.215 3    | 16.40  | 1   | 27.15  | 0.000 4 **  |
| $x_2$    | 42.26   | 1   | 42.89   | <0.000 1 ** | 9.53    | 1   | 36.06   | 0.000 1 ** | 91.93  | 1   | 152.23 | <0.000 1 ** |
| $x_1x_2$ | 0.106 2 | 1   | 0.107 8 | 0.749 4     | 1.80    | 1   | 6.81    | 0.026 1 *  | 1.01   | 1   | 1.67   | 0.224 9     |
| $x_1^2$  | 37.82   | 1   | 38.39   | 0.000 1 **  | 4.07    | 1   | 15.40   | 0.002 8 ** | 17.06  | 1   | 28.26  | 0.000 3 **  |
| $x_2^2$  | 26.98   | 1   | 27.39   | 0.000 4 **  | 1.13    | 1   | 4.27    | 0.065 6    | 17.06  | 1   | 28.25  | 0.000 3 **  |
| 残差       | 9.85    | 10  |         |             | 2.64    | 10  |         |            | 6.04   | 10  |        |             |
| 失拟项      | 1.47    | 3   | 0.408 2 | 0.752 1     | 0.474 7 | 3   | 0.510 9 | 0.687 4    | 3.16   | 3   | 2.56   | 0.138 2     |
| 纯误差      | 8.39    | 7   |         |             | 2.17    | 7   |         |            | 2.88   | 7   |        |             |
| 总和       | 128.42  | 15  |         |             | 19.54   | 15  |         |            | 149.52 | 15  |        |             |

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

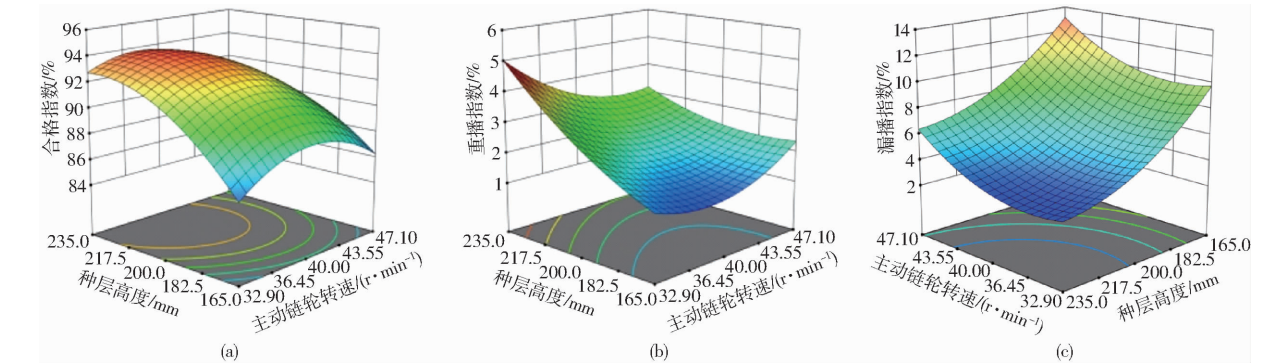


图 19 各试验因素对工作性能的响应曲面

Fig. 19 Response surfaces of each test factor to working performance

43.5 r/min、种层高度为 200 ~ 230 mm 时,排种器合格指数较高。当主动链轮转速一定时,随着种层高度增加,排种器充种区内种匀充种效率提高,漏播指数下降,合格指数逐渐上升,但随着种层高度过大,排种器清种阶段无法及时清种导致重播指数上升,合格指数会逐渐下降。由图 19b 可得,当排种器主动链轮转速为 35 ~ 40 r/min、种层高度为 165 ~ 200 mm 时,排种器重播指数较低。当种层高度一定时,随着主动链轮转速增大,重播指数逐渐下降,合格指数逐渐上升,但随着链轮转速过大,重播指数反而会上升,这是由于转速过大时,待清种子无法及时完成清种。由图 19c 可得,漏播指数随着种层高度增加和主动链轮转速减小呈下降趋势,当主动链轮转速下降到一定区间或者种层高度增加到一定区间时,漏播指数变化将趋于平缓。

运用 Design-Expert 13 的多目标优化算法对试验指标回归模型进行优化求解,以合格指数最高、重播指数和漏播指数最低为优化目标。求解可得,当主动链轮转速为 39.2 r/min、种层高度为 206 mm 时

排种器作业性能最优,此时合格指数最高、重播和漏播指数最低,分别为 93.37%、2.17%、4.46%。为验证最佳工作参数准确性,在相同条件下对排种器进行验证试验,其试验结果为合格指数 93.00%、重播指数为 2.33%、漏播指数 4.67%。

5.3 种子破损现象

在台架组合试验时对种子破损情况进行统计,破损率保持在 2.33% 以下,当排种器在最佳工作参数条件下作业时,种子破损率约为 1%。并且种子破损率与重播率具有相关性,当重播率较高时,种子破损情况有所增加。

通过试验分析发现,当出现重播现象时容易导致种子与种匀间、种子与种子间相互碰撞挤压,进而出现种子破损情况;当种匀单一充种或漏充时,基本无种子破损情况。

6 结论

(1)设计了一种链匀翘尾自清式半夏精量排种

器,采用翘尾种勺结构和水滴形型孔实现了高效充种、稳定自清种。通过对工作过程中种子受力情况及运动状态进行分析,阐述了排种器工作原理;通过理论计算和运动学分析,确定了链条清种倾角为 $11^{\circ}$ 、主动链轮为 31 齿、种勺长度为 36 mm、充种腔宽度为 15 mm、种勺底部斜面倾角为 $11^{\circ}$ 以及种勺型孔部分结构参数范围。

(2)利用 EDEM 与 RecurDyn 耦合仿真技术,通过单因素仿真试验,分析了不同链条张紧力和不同

种勺型孔结构参数对排种器工作性能的影响。通过正交旋转组合试验研究种勺型孔设计参数对排种器工作性能的影响,试验结果表明,当种勺型孔长度为 18.6 mm、种勺型孔宽度为 14.1 mm、种勺型孔留种孔深度为 8.6 mm 时排种器作业性能最好。

(3)台架试验结果表明,当主动链轮转速为 39.2 r/min、种层高度为 206 mm 时排种器作业性能最优。此时,排种合格指数为 93.37%、重播指数为 2.17%、漏播指数为 4.46%。

参 考 文 献

[1] 肖杰,熊金剑,康科星,等. 天门半夏标准化栽培技术[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(11): 38-39, 100.  
XIAO Jie, XIONG Jinjian, KANG Kexing, et al. Standardized cultivation technique of Tianmen *Pinellia ternata* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(11): 38-39, 100. (in Chinese)

[2] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46-52.  
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46-52. (in Chinese)

[3] 程修沛,卢彩云,孟志军,等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 1-9.  
CHENG Xiupei, LU Caiyun, MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 1-9. (in Chinese)

[4] 王吉奎,郭康权,吕新民,等. 夹持式棉花精密穴播轮作业振动对取种的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 114-118.  
WANG Jikui, GUO Kangquan, LÜ Xinmin, et al. Effect of clamping cotton-seed precision dibbler operating vibration on seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 114-118. (in Chinese)

[5] 刘彩玲,都鑫,张福印,等. 锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 56-65.  
LIU Cailing, DU Xin, ZHANG Fuyin, et al. Design and test of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 56-65. (in Chinese)

[6] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 窄行密植西洋参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 92-103.  
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 92-103. (in Chinese)

[7] 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 seed-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)

[8] 曾心玥,赖庆辉,赵瑾汶,等. 内充式三七精密排种器的设计[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 139-154.  
ZENG Xinyue, LAI Qinghui, ZHAO Jinwen, et al. Design of internal filling precise seed metering device for *Panax notoginseng* [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 139-154. (in Chinese)

[9] 顿国强,郭娜,纪欣鑫,等. 红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 77-86,97.  
DUN Guoqiang, GUO Na, JI Xinxin, et al. Design and experiment of side-hung seed-rowing spoon type precision seed metering device for radish [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 77-86,97. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 张国帅,魏富德,许健,等. 半夏播种机排种器的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(10): 91-94, 99.  
ZHANG Guoshuai, WEI Fude, XU Jian, et al. The design and experiment of the seeding machine in semi-summer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 91-94, 99. (in Chinese)

[12] 王海玲,张俊,唐映军,等. 不同种茎种植对半夏产量及构成因素的影响[J]. 农业科技通讯, 2022(11): 97-101.  
WANG Hailing, ZHANG Jun, TANG Yingjun, et al. Effects of different stem planting on the yield and constituent factors of *Pinellia ternata* [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2022(11): 97-101. (in Chinese)

[13] 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)

[14] MADRID M A, FUENTES J M, AYUGA F, et al. Determination of the angle of repose and coefficient of rolling friction for wood pellets[J]. MDPI AG, 2022(2): 424.

[15] 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007,23(3):108–112.  
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(3):108–112. (in Chinese)

[16] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱动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)

[17] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 玉米姿控驱动式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 25–34.  
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25–34. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 吕金庆,杨颖,李紫辉,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 17–25.  
LÜ Jinqing, YANG Ying, LI Zihui, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 17–25. (in Chinese)

[20] 赖庆辉,谢观福,苏微,等. 链勺翻转清种式蚕豆精量排种器设计与试验[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)

[21] BALEVICIUS R, SIJELAMOWICZ I, KACIANAUSKAS R. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: a comparison of the DEM model results with the experimental measurements[J]. Powder Technology, 2011, 214: 322–336.

[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] 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)

[24] 李汉青,颜丙新,武广伟,等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 60–72.  
LI Hanqing, YAN Bingxin, WU Guangwei, et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 60–72. (in Chinese)

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

[26] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 51–60.  
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type potato seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 51–60. (in Chinese)