

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.02.002

# 预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构设计与试验

牟向伟<sup>1</sup> 陈林涛<sup>1</sup> 马旭<sup>2</sup> 薛俊祥<sup>1</sup> 向金山<sup>1</sup>

(1. 广西师范大学职业技术师范学院, 桂林 541004; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 针对目前预切种式木薯精密播种器存在充种困难以及播种合格指数低等问题, 在播种器中进一步设计勺链排种机构。阐述播种器工作原理以及设计勺链排种机构相关参数, 基于最速降线理论对排种机构的捞种勺进行参数设计, 并对机构作业的充种与投种过程中木薯种茎受力和运动状态进行理论分析, 确定影响充种性能因素显著性主次顺序为捞种勺型式、捞种勺数量、输送链运动速度以及充种倾角。利用 EDEM 软件进行单因素仿真, 得出不同试验因素对充种性能的影响规律; 进行响应面 BBD 仿真试验, 确定最优因素参数组合。研制播种器样机进行台架和田间试验, 结果表明当充种倾角为 37°、捞种勺数量为 12 个、输送链运动速度为 0.63 m/s 时, 充种合格指数为 93.8%, 漏充指数为 1.9%。田间试验表明预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构作业性能较优, 满足木薯精密播种农艺要求。

**关键词:** 木薯; 预切种式; 精密播种器; 离散元法; 勺链排种机构

中图分类号: S220.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0020-12

OSID:



## Design and Experiment of Spoon Chain Seed Metering Mechanism of Precutting Vibration Seed Feeding Cassava Planter

MOU Xiangwei<sup>1</sup> CHEN Lintao<sup>1</sup> MA Xu<sup>2</sup> XUE Junxiang<sup>1</sup> XIANG Jinshan<sup>1</sup>

(1. Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In the earlier stage, a stepped vibrating seed sowing mechanism in the seed supply link of the precutting cassava seeder was designed. In order to further realize the precision seeding of cassava seed stems, a seed sowing mechanism was designed behind the stepped vibrating seed sowing mechanism to complete reliable seed filling and precision seeding. However, it was blind to take a single kind of stem from the cassava seed stem group that had been adjusted and sequenced through the seed metering mechanism scoop, which was easy to cause problems such as missing filling and reseeding. The spoon chain seed metering mechanism was further designed to solve the problems of seed filling difficulty and low seeding qualification index of the current precutting cassava precision seeder. The working principle of the seeder and the parameters related to the design of the spoon chain metering mechanism were described. Based on the theory of the fastest descent line, the parameters of the seed scoops of the metering mechanism were designed. The forces on the cassava seed stems and the motion state during the seed filling and seed feeding process of the mechanism were theoretically analyzed. It was determined that the significant factors affecting the seed filling performance were the type of seed scoops, the number of seed scoops, the motion speed of the conveyor chain, and the seed filling angle. Single factor simulation was carried out by using EDEM software, and the influence rules of different test factors on seed filling performance were obtained. The response surface BBD simulation test was carried out to determine the optimal factor parameter combination. The prototype seeder was developed for bench and field tests. The results showed that when the seed filling angle was 37°, the number of seed scoops was 12, and the moving speed of the conveyor chain was 0.63 m/s, the qualified index of seed filling was 93.8%, and

收稿日期: 2022-03-25 修回日期: 2022-07-03

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050026)、国家重点研发计划项目(2018YFD0700703)和国家自然科学基金项目(51675188)

作者简介: 牟向伟(1982—),男,教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 1574287180@qq.com

通信作者: 陈林涛(1993—),男,讲师,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: clt13424050147@163.com

the missed filling index was 1.9%. The field experiment showed that the spoon chain seed metering mechanism of the pre cut seed vibrating seed feeding cassava seeder had better performance and it can meet the agronomic requirements of precision cassava sowing.

**Key words:** cassava; precut seed type; precision seeder; discrete element method; scoop chain metering mechanism

## 0 引言

由于我国木薯种植以个体农户为主,种植模式不统一、机械作业困难,目前依靠人工作业<sup>[1]</sup>,急需研发适应木薯种植农艺要求的精密种植机。现有播种器主要采用实时切种方式,由于木薯种较长,形状复杂,无法实现自动播种,且人工喂种持续性差、漏播现象严重<sup>[2]</sup>。预切种方式利用切种机将木薯种切成形状简单、长度约150 mm的种茎,清选后由播种器的排种机构将单段种茎排至种沟<sup>[3-6]</sup>。链勺式播种原理广泛应用于预切种方式中,工作时利用链条带动捞种勺进行充种,最终实现精密播种。该原理已成为国内外解决形状不规则种子播种的主要技术,在马铃薯、甘蔗等作物中均有应用,但在木薯精密播种研究中鲜有报道<sup>[6-7]</sup>。

目前预切种勺链式播种器研究主要包括限制排种速度、加大充种高度以及优化排种机构捞种勺与输送链参数等,实现了可靠充种<sup>[7-8]</sup>。澳大利亚的Massey Ferguson与P&HBonel等公司和美国的GESSNER等公司针对凹板提升式排种机构进行研究<sup>[3-4]</sup>,开发了相应的甘蔗种植机,其排种机构通过在升运链上设置凹板实现排种,但存在播种不均、漏充现象严重、耗种量大等问题。赵满全等<sup>[9]</sup>研制了2BSL-2型马铃薯起垄播种机,采用链勺式排种机构,在种箱最下端横截面投影面积几乎与种勺投影面积相等,改善了充种性能。李成松等<sup>[10]</sup>研制了单行悬挂式马铃薯施肥种植机,采用链勺式排种机构,通过增加人工补种段来降低漏播指数,但链勺式排种机构输送链后方需安装挡板,结构复杂,作业速度提升空间有限。韩杰等<sup>[11]</sup>研究预切种式甘蔗种植机,但由于排种机构结构和蔗槽设计不合理,出现因播种不连续而造成的漏种和耗种量大等问题。勺链式排种机构充种困难、漏充指数高仍是目前播种器的技术缺点。以上研究为预切种勺链式木薯精密播种器设计提供了技术参考。

木薯种茎为一定长度圆柱状木质茎秆,且表面具有凸起芽眼,播种过程中存在待充种茎乱序、充种困难以及播种合格指数低等问题<sup>[12]</sup>。笔者前期在预切种式木薯播种器供种环节中设计了一种阶梯式振动散种机构,通过“振动分散输送+种茎群姿态

调整”的方式进行乱序木薯种茎群的散种下滑和姿态调整,达到排序供种<sup>[12]</sup>。为进一步实现木薯种茎精密播种,在阶梯式振动散种机构后方配套设计一种排种机构,完成可靠充种与精密播种。但通过排种机构捞种勺从调姿排序好的木薯种茎群中主动捞取单一一种茎,具有一定盲目性,易产生漏充、重播等问题。

因此,本文在预切种振动供种式木薯精密播种器中设计一种勺链排种机构,优化播种器整机结构。基于最速降线理论对排种机构捞种勺进行参数设计,并对排种机构作业时充种与投种过程中的木薯种茎受力与运动状态进行分析,确定影响充种性能显著因素;以离散元法EDEM仿真为技术手段,优化排种机构参数提高排种机构作业性能;通过台架和田间试验验证勺链排种机构工作性能。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

播种器主要由阶梯式振动散种机构与勺链排种机构组成。阶梯式振动散种机构由喂种箱、种量控制板、限位板、振动散种板、阶梯式调姿板、落种滑板、供种箱以及振动系统等组成;勺链排种机构由充种箱、输送链、捞种勺、刮种部件、护种部件、种层挡板、机架以及电动机等组成,整体结构如图1所示。

### 1.2 工作原理

工作时,将一定量的木薯种茎(乱序)投至喂种箱,通过调控种量控制提升板高度,保证一定供种量。其次通过阶梯式振动散种机构下方振动系统,使种茎群在振动散种板和阶梯式调姿板上往复运动,通过阶梯式调姿板卡槽限位作用,实现种茎调姿定向。种茎经落种滑板有序落入充种箱,在充种箱上方设有种层挡板,防止经振动散种机构作用种茎群的“乱种”现象。接着后方输送链在电动机驱动下带动捞种勺转动,种茎在种茎群间挤压力及自身重力作用下进入捞种勺,完成充种。种茎进入清种区,当捞种勺存有多根种茎,刮种部件将多余的种茎清除。种茎随捞种勺继续运动,在护种部件作用下运动至投种口,依靠自身重力掉落、完成精密播种。

## 2 勺链排种机构理论分析与关键部件设计

勺链排种机构主要包括输送链和捞种勺。捞种

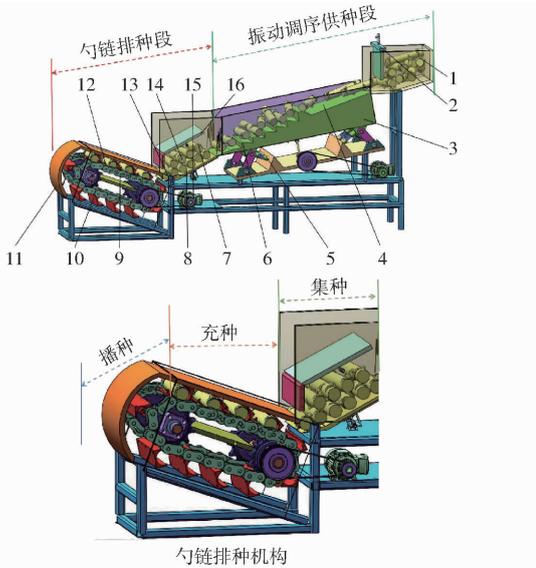


图1 预切种振动供种式木薯精密播种器结构示意图  
Fig. 1 Schematics of whole machine structure of pre cut seed vibrating cassava precision seeder

1. 喂种箱 2. 种量控制提升板 3. 阶梯式振动散种机构 4. 振动散种板 5. 振动系统 6. 阶梯式调姿板 7. 充种箱 8. 充种板 9. 输送链 10. 捞种勺 11. 护种部件 12. 刮种部件 13. 机架 14. 木薯种茎群 15. 电动机 16. 种层挡板

勺结构形状、尺寸参数以及其在输送链分布形式直接影响充种性能。基于最速降线理论对勺链排种机构捞种勺进行参数设计,对捞种勺充种和投种过程木薯种茎受力和运动状态进行分析,进而优化结构。

## 2.1 充种过程理论分析与结构设计

捞种勺是勺链排种机构将单根木薯种茎从种茎群中分离,并将种茎平稳输送到排种机构投种口完成播种的核心部件。在捞种勺优化设计过程中,应简化捞种勺内部凹槽结构,保证其各朝向种茎受力均匀,且快速充种至捞种勺,提高充种时间<sup>[13-14]</sup>。

### 2.1.1 捞种勺结构参数

选择广西地区种植面积最大的桂热4号(广西亚热带作物研究所提供)作为试验对象,清选处理后选择预切后100颗种茎(平均含水率68.46%,百颗质量5987.83g)进行种茎直径测量。统计得出种茎直径在29~31mm间占比为59%。取种茎平均直径 $d$ 为30mm。捞种勺基本结构参数(长度 $L$ 、宽度 $W$ 以及高度 $D$ )主要与种茎整体物料尺寸有关。种茎长度 $l$ 为150mm,捞种勺长度 $L$ 定为160mm。种茎平均直径 $d$ 为30mm,且考虑凸起种芽和种茎弯曲程度,宽度 $W$ 设为40mm。为保证种茎在捞种勺充种过程中保持稳定,并不从捞种勺中滑出,捞种勺高度 $D$ 应高于种茎质心高度 $d/2$ ,捞种勺高度 $D$ 定为20mm,捞种勺基本结构参数如图2所示。

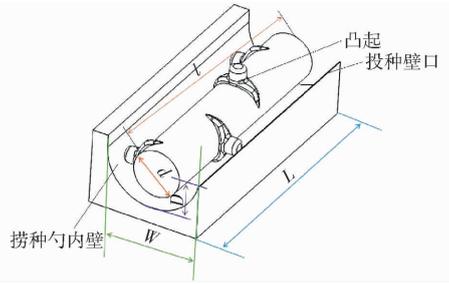


图2 捞种勺结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of seed scoop

### 2.1.2 捞种勺边界曲线

在充种过程中,为使木薯种茎稳定且高效充入捞种勺,捞种勺边界曲线选择最速降线进行理论分析<sup>[7]</sup>。以捞种勺内木薯种茎为研究对象,简化种茎沿捞种勺边界进入捞种勺曲线为抛物线,如图3所示,设抛物线方程为 $z = ax^2$ ,研究种茎在 $Oxz$ 平面内运动状态,受力方程为

$$\begin{cases} mg \cos \alpha = F_N \\ F_S = F_N \tan \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m$ ——木薯种茎质量,  $g$

$\alpha$ ——截曲线在滑落点切线夹角, ( $^\circ$ )

$\varphi$ ——木薯种茎与捞种勺间摩擦角, ( $^\circ$ )

$F_N$ ——捞种勺对木薯种茎的支持力, N

$F_S$ ——捞种勺对木薯种茎的摩擦力, N

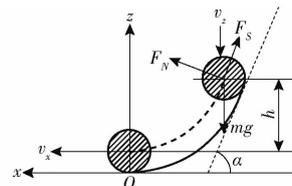


图3 捞种勺最速降线

Fig. 3 The fastest descending line of seed scoop

设在充种过程中捞种勺摩擦力 $F_S$ 所做功为 $A$ ,当木薯种茎滑移高度为 $h$ 时(滑移高度 $h$ 最大值为捞种勺高度 $D$ ),其横向位移为 $-\sqrt{\frac{h}{a}}$ ,即种茎滑落至捞种勺底部,摩擦力做功 $A$ 为

$$A = - \int_{-\sqrt{\frac{h}{a}}}^0 mg \tan \varphi dx = -mg \tan \varphi \sqrt{\frac{h}{a}} \quad (2)$$

过程中满足能量守恒定律,即

$$\frac{1}{2} m v_z^2 + mgh = -mg \tan \varphi \sqrt{\frac{h}{a}} + \frac{1}{2} m v_x^2 \quad (3)$$

式中  $v_z$ ——木薯种茎初始下滑速度, m/s

$v_x$ ——木薯种茎终止水平速度, m/s

由式(3)可得

$$v_z^2 + 2gh = -2g \tan \varphi \sqrt{\frac{h}{a}} + v_x^2 \quad (4)$$

将式(4)代入捞种勺曲线抛物线方程 $z = ax^2$

中, 捞种勺切线倾角  $\alpha$  为

$$\alpha = \arctan \left( 2h \left( \frac{2g \tan \varphi}{v_z^2 - v_x^2 + 2gD} \right)^2 x \right) \quad (5)$$

通过对捞种勺最速降线起始位置、初始滑移速度、种茎与捞种勺凹槽摩擦角、捞种勺高度  $D$  等参数设定, 推导出种茎进入捞种勺切线倾角  $\alpha$ , 此时能保证充种可靠。种茎稳定滑移到捞种勺凹槽, 在理想状态下种茎到达捞种勺底部时速度为零, 种茎滑落高度  $h$  为捞种勺高度  $D$ , 前期试验测得种茎与捞种勺凹槽内壁摩擦角  $\varphi$  为  $31^\circ \sim 43^\circ$ ; 种茎初始下落速度即为输送链线速度, 主动链轮转速取  $20 \sim 130 \text{ r/min}$ ,  $x$  为  $30 \text{ mm}$ , 代入式 (5) 中求得  $\alpha$  为  $37.72^\circ \sim 65.31^\circ$ 。如果  $\alpha$  较小, 易出现种茎被振出捞种勺的情况<sup>[7,14]</sup>。为保证种茎落入捞种勺的稳定性,  $\alpha$  取  $55^\circ$ 。

为进一步保证捞种勺充种稳定性, 需优化捞种勺凹槽参数。捞种勺凹槽总体形状越“细深”, 易产生卡种和投种不畅; 若其总体形状越“粗浅”, 充种能力有限, 易发生漏充。由于木薯种茎表面具有凸起种芽, 物料特性复杂, 捞种勺设计需避免种茎在捞种勺卡种以及减少种茎投出时与捞种勺的投种壁口发生碰撞; 当设计其凹槽向捞种勺内壁延伸, 能保证种茎在种勺中平稳运移, 充种可靠; 为方便种茎从捞种勺脱离投出, 凹槽结构可朝投种位置优化; 种茎充入捞种勺充种运动过程复杂, 需在后续 EDEM 仿真中重点对捞种勺形状参数进行分析。

### 2.1.3 充种过程动力学分析

充种过程是由木薯种茎自身重力、种茎间和种茎与捞种勺间的正压力、滑动摩擦力和滚动摩擦力等构成的复杂动力学系统<sup>[15]</sup>。为便于分析, 将种茎充种过程分为“预充种”和“完全充种”状态。

(1) 捞种勺尚未进入充种区, 木薯种茎为预充种状态, 种茎主要受到捞种勺表面和种茎挤挤压作用。为便于分析, 假设木薯种茎为圆柱体, 如图 4 所

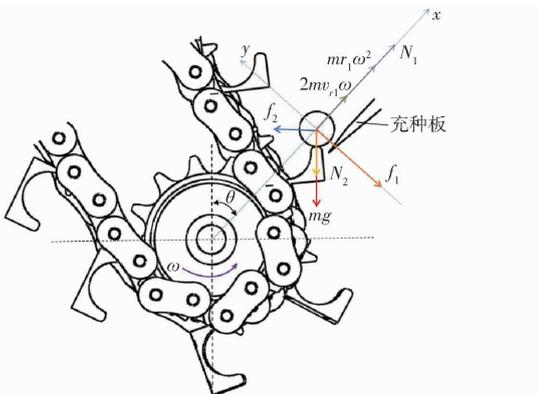


图 4 木薯种茎预充种状态力学模型

Fig. 4 Mechanical model of pre filling seed state of cassava seed stem

示。建立力学平衡方程

$$\begin{cases} ma_x = N_1 + mr_1 \omega^2 + 2mv_{r1} \omega + mg \cos \theta - \\ \quad N_2 \cos \theta - f_2 \cos \theta \\ ma_y = f_2 \sin \theta - f_1 - mgsin \theta - N_2 \sin \theta \\ f_1 = \mu_1 N_1 \\ f_2 = \mu_2 N_2 \end{cases} \quad (6)$$

- 式中  $r_1$ ——木薯种茎所在捞种接触位置半径,  $m$   
 $\omega$ ——捞种勺角速度,  $\text{rad/s}$   
 $v_{r1}$ ——种茎相对捞种勺外壁切向速度,  $\text{m/s}$   
 $\theta$ ——充种倾角,  $(^\circ)$   
 $\mu_1$ ——种茎与捞种勺外壁间摩擦因数  
 $\mu_2$ ——种茎间摩擦因数  
 $N_1$ ——捞种勺外壁对种茎支持力,  $N$   
 $N_2$ ——种茎群压力,  $N$   
 $f_1$ ——种茎与捞种勺外壁摩擦力,  $N$   
 $f_2$ ——种茎群摩擦力,  $N$   
 $a_x$ ——加速度  $x$  轴分量,  $\text{m/s}^2$   
 $a_y$ ——加速度  $y$  轴分量,  $\text{m/s}^2$

根据木薯种茎充种要求, 在捞种勺经过充种区时间内, 种茎必须完成完全充种。如若种茎进入凹槽时间过长, 则引起充种不充分, 导致漏充指数增大<sup>[16]</sup>。经预充种分析知种茎能否稳定进入捞种勺取决于种茎与捞种勺的相对运动情况。假设种茎在  $x$  轴方向位移为  $\frac{D}{2}$ ,  $y$  轴方向位移为  $W - \frac{d}{2}$ , 则有

$$\begin{cases} \frac{D}{2} = \frac{1}{2} a_x t_x^2 \\ W - \frac{d}{2} = v_{r1} t_y \cos \lambda + \frac{1}{2} a_y t_y^2 \end{cases} \quad (7)$$

- 式中  $\lambda$ ——捞种勺倾斜角,  $(^\circ)$   
 $t_x$ ——种茎  $x$  轴方向运动时间,  $s$   
 $t_y$ ——种茎  $y$  轴方向运动时间,  $s$

由式 (7) 得到种茎  $x$  轴和  $y$  轴方向运动时间为

$$\begin{cases} t_x = \sqrt{\frac{D}{a_x}} \\ t_y = \frac{\sqrt{(v_{r1} \cos \lambda)^2 + 2a_y \left( W - \frac{d}{2} \right)} - v_{r1} \cos \lambda}{a_y} \end{cases} \quad (8)$$

如果木薯种茎实现完全充种状态, 则完全充种必要限定条件为  $t_x \leq t_y$ , 满足

$$\sqrt{\frac{D}{a_x}} \leq \frac{\sqrt{(v_{r1} \cos \lambda)^2 + 2a_y \left( W - \frac{d}{2} \right)} - v_{r1} \cos \lambda}{a_y} \quad (9)$$

根据式 (6) ~ (9) 可知, 影响充种性能主要因素有捞种勺参数、充种倾角、种茎相对于捞种勺外壁切

向速度。当确定捞种勺尺寸参数后,种茎要实现完全充种状态,主要需确定充种倾角和输送链主动链轮线速度。

(2)种茎实现完全充种,木薯种茎处于完全充种状态,受力分析如图5所示。建立力学平衡方程

$$\begin{cases} ma_x = F_N + (mr_2\omega^2 + 2mv_{r2}\omega) \cos\alpha_1 - \\ f_2 \sin(\theta + \alpha_1) - (N_2 + mg) \cos(\theta + \alpha_1) \\ ma_y = (mr_2\omega^2 + 2mv_{r2}\omega) \sin\alpha_1 + f_2 \cos(\theta + \alpha_1) - \\ F_s - (N_2 + mg) \sin(\theta + \alpha_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $r_2$ ——种茎所在捞种位置半径,mm  
 $\alpha_1$ ——种茎所处捞种勺径向与  $x$  轴夹角, ( $^\circ$ )  
 $v_{r2}$ ——种茎相对于捞种勺的切向速度,m/s

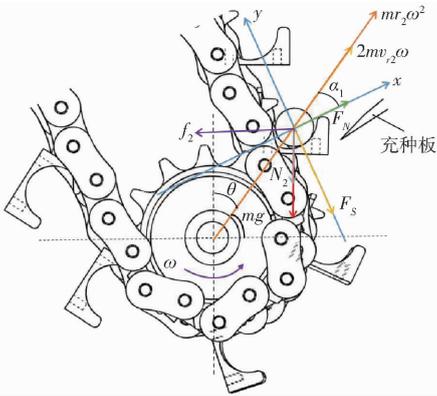


图5 木薯种茎完全充种状态力学模型

Fig.5 Mechanical model of filling seed state of cassava seed stem

由式(10)求解得

$$\begin{cases} a_x = \frac{F_N - N_2 \cos\theta - \mu_2 N_2 \cos\theta}{m} + \\ r_2\omega^2 + 2v_{r2}\omega + g \cos\theta \\ a_y = \frac{\mu_2 N_2 \sin\theta - \mu_1 F_N - N_2 \sin(\theta + \alpha_1)}{m} + \\ (r_2\omega^2 + 2v_{r2}\omega) \sin\alpha_1 - g \sin(\theta + \alpha_1) \end{cases} \quad (11)$$

可知充种倾角是影响捞种勺能否稳定捞起种茎重要因素,整理式(10)、(11)得充种倾角  $\theta$  满足

$$\theta \geq \arcsin \frac{2v_{r2}^2 + gr_2(\mu_1 - \mu_2^2 - \sin\varphi)}{gr_2} \quad (12)$$

综上,建立种茎在充种区“预充种”和“完全充种”2种状态下动力学方程,由式(12)知充种倾角与种茎所在捞种位置处半径  $r_2$ 、种茎相对捞种勺切向速度  $v_{r2}$  有关;且  $r_2$ 、 $v_{r2}$  与主动链轮分度圆直径和运动线速度有关,后续需对主动链轮进行参数设计,进而优化充种倾角。

## 2.2 投种过程理论分析与结构设计

在输送链上合理布置捞种勺是提高播种器充种性能的关键,有利于改善排种作业均匀性和直线度,

缓解种茎落入种沟时的瞬时速度,实现零速投种<sup>[13-17]</sup>。下面进行种茎抛送投种临界受力分析,以期优化播种器整机结构。

### 2.2.1 捞种勺数量与零速投种分析

在理想状态下,单根播种在相同时间( $t$ 为落种时间间隔)内落入种沟的种茎数量等于播种器排出种茎的数量<sup>[17]</sup>,满足

$$\frac{v_0 t}{S} = \frac{v_1 t}{L_1} \quad (13)$$

式中  $v_0$ ——播种机前进速度,m/s  
 $S$ ——木薯种茎理论株距,mm  
 $L_1$ ——捞种勺间距离,mm  
 $v_1$ ——输送链运动线速度,m/s

木薯种茎播种理论株距  $S$  介于 150 ~ 500 mm,设播种机速度不超过 1.5 m/s,为保证可靠充种,查阅文献确定输送链运动线速度不超过 0.9 m/s<sup>[28]</sup>。经式(13)计算,捞种勺间距宜取 90 ~ 300 mm。为使参数设计进一步具体化,播种器作业速度按照传统单行种植模式计算<sup>[7]</sup>,作业速度与电动机转速关系式为

$$v_0 = \frac{3\pi L_1 \lambda_1 d_1 Q n}{50M} \quad (14)$$

式中  $n$ ——电动机转速,r/min  
 $Q$ ——捞种勺数量,个  
 $\lambda_1$ ——电动机与主动链轮传动比,取 0.7  
 $M$ ——链条长度,取 2 500 mm  
 $d_1$ ——主动链轮分度圆直径,mm

在保证播种效率及各个捞种勺间距相同的前提下,根据式(14)优取捞种勺数量为 9、12、15、18 个,即捞种勺间距离为 277.8、208.3、166.7、138.9 mm,在捞种勺间距 90 ~ 300 mm 宜取范围,均符合播种器播种作业要求。捞种勺数量决定捞种勺间距,影响捞种勺充种时间。捞种勺过少不利于排种机构工作效率提高;捞种勺过多不利于捞种勺充种,使漏充指数升高。为保证充种质量,具体数量还需通过 EDEM 仿真进行详细确定。

考虑木薯种茎落地前对相邻捞种勺干扰作用,在种茎运动至投种点位置时,种茎在重力及离心力共同作用下离开捞种勺<sup>[17]</sup>。为满足零速投种要求,选取种茎相对播种器输送链投送方向为水平方向,设定输送链运动两个相邻捞种勺距所需时间为  $t_0$ ,则

$$t_0 = \frac{L_1}{v_0} \quad (15)$$

在时间  $t_0$  内种茎相对播种器下落位移为

$$l_1 = v_0 t_0 \sin\beta_1 + \frac{1}{2} g t_0^2 \quad (16)$$

将式(13)、(15)、(16)合并整理,可得

$$l_1 = L_1 \sin\beta_1 + \frac{L^2 g}{8\pi^2 n^2 R^2} \quad (17)$$

式中  $\beta_1$ ——种茎投送速度与水平间夹角, ( $^\circ$ )

由于木薯种茎相对播种器作业速度为零,故种茎投送速度与水平间夹角  $\beta_1 = 0^\circ$ ,将各参数代入式(17)得  $l_1 = 95.1$  mm。在时间  $t_0$  内下一个捞种勺运动到投种点位置时,种茎相对播种器垂直方向运动 165.2 mm,未对种茎投落造成播种干扰,满足播种器零速投种要求。

### 2.2.2 木薯种茎抛送投种临界条件

在输送链工作过程中需保证播种器运行稳定,当种茎翻越主动链轮时易被甩出捞种勺,通过预试验发现在主动链轮上设计护种部件,若种茎被甩出捞种勺,部分种茎将无法顺利投种,造成漏播。因此,需求使种茎不被甩出捞种勺的最小输送链主动链轮的直径,优化播种器整机结构,如图6所示。

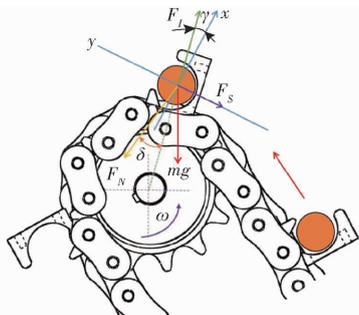


图6 木薯种茎抛送投种临界力学分析

Fig.6 Critical mechanical analysis of cassava seed stalk throwing

以木薯种茎质心为原点,临界状态下保证种茎不被甩出应满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_t \cos\gamma - F_N - mg \cos\delta = 0 \\ \sum F_y = F_t \sin\gamma - F_s - mg \sin\delta \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} F_t = m \frac{v_1^2}{1000R} \\ R = \frac{d_1 + D}{2} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $\sum F_x$ ——种茎在  $x$  方向所受合力, N

$\sum F_y$ ——种茎在  $y$  方向所受合力, N

$F_t$ ——转动惯性力, N

$\gamma$ —— $F_t$  与  $x$  轴正向夹角, ( $^\circ$ )

$\delta$ ——重力与  $x$  轴负向夹角, ( $^\circ$ )

$R$ ——主动链轮转动半径, mm

联立式(18)、(19)得

$$d_1 \geq \frac{2v_1^2 (\sin\gamma - \mu_1 \cos\gamma)}{g(\sin\delta - \mu_1 \sin\delta)} - D \quad (20)$$

木薯理论播种株距介于 150 ~ 500 mm,为保证播种器能够在合适速度工作,参考文献[18-20],输送链运动速度优选 0.3、0.5、0.7、0.9 m/s,对应播种机作业速度为 1.08、1.8、2.5、3.2 km/h。为保证工作效率,取输送链运动最大速度 0.9 m/s,计算主动链轮分度圆直径,此时需满足  $d_1 \geq 90$  mm,综合考虑选择 ST12A-16-N20 型链轮为主动链轮;但不同输送链运动速度对充种性能的影响需通过后续 EDEM 仿真进行确定。

综上,上述分析得出影响播种器勺链排种机构充种性能显著因素分别是捞种勺型式、输送链速度、捞种勺数量、充种倾角。

## 3 仿真试验

### 3.1 试验因素与试验指标

在前期大量研究成果基础上,固定捞种勺数量为 12 个、输送链运动速度为 0.5 m/s 和充种倾角为  $40^\circ$  进行试验。单因素仿真试验以充种合格指数  $Y_1$ 、漏充指数  $Y_2$  和重充指数  $Y_3$  为评价指标。

### 3.2 仿真模型建立及仿真参数确定

#### 3.2.1 仿真模型建立

选取广西地区常用的桂热4号木薯种茎为试验材料,由于木薯种茎颗粒的表面没有粘附力,选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型作为颗粒间及颗粒与捞种勺间的接触模型<sup>[12]</sup>。为真实仿真木薯种茎之间运动特性,采用多球聚合模型<sup>[12]</sup> (Multi-spher method) 建立种茎颗粒模型,结果如图7所示。

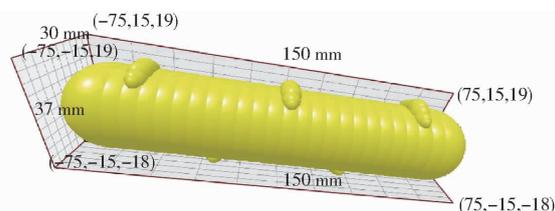


图7 木薯种茎颗粒仿真模型

Fig.7 Simulation model of cassava seed stem particle

利用 SolidWorks 对预切种木薯精密播种器进行建模,参考文献[7],为减少仿真过程的计算量,对播种器模型进行简化处理,播种器模型简化成一块向上运动足够长且带捞种勺的平面薄板,按照实际距离安装固定捞种勺,在 EDEM 的 Parameter 模块中对颗粒工厂进行初始条件设置,充种箱上方添加种茎工厂用来模拟种层高度调节装置,在充种箱中落入一定量的木薯种茎颗粒后,平面薄板运动如图8所示;每次投入 50 根种茎进行模拟仿真,进行 EDEM 后处理分析,在软件中 Rayleigh 时间步长为 1%,总时长设置为 55 s。

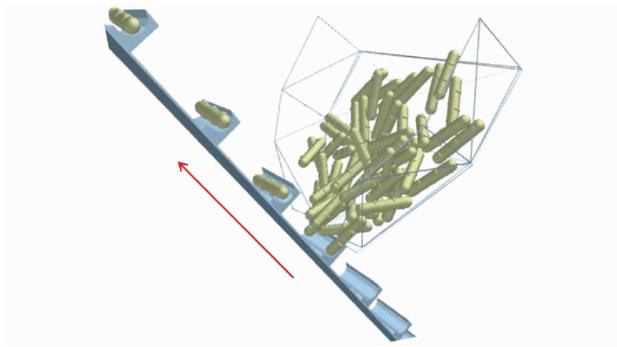


图8 木薯精密播种器仿真模型

Fig. 8 Seeder simulation model

### 3.2.2 仿真参数

经木薯种茎参数标定试验,并结合农业物料离散元参数<sup>[21-22]</sup>,得到所需的仿真基本参数如表1。

表1 离散元模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of discrete element model

参数	数值
木薯种茎泊松比	0.42
木薯种茎剪切模量/Pa	$1.76 \times 10^7$
木薯种茎间碰撞恢复系数	0.40
木薯种茎间静摩擦因数	0.20
木薯种茎间滚动摩擦因数	0.09
木薯种茎-钢碰撞恢复系数	0.40
木薯种茎-钢静摩擦因数	0.68
木薯种茎-钢滚动摩擦因数	0.05

### 3.3 单因素仿真试验

#### 3.3.1 捞种勺形状

基于2.1.2节捞种勺边界曲线分析,本文捞种勺设计首先保证切线倾角 $\alpha$ 不变,结合工程经验设计3种捞种勺<sup>[18-19]</sup>:捞种勺I(圆弧形凹槽)、捞种勺II(凹槽向内“延伸”)、捞种勺III(凹槽向捞种勺投种壁口),具体形状如图9所示,其中捞种勺I的 $D_{11}$ 为20 mm, $r_{11}$ 为18 mm;捞种勺II的 $D_{22}$ 为20 mm, $W_{22}$ 为23 mm, $r_{22}$ 为5 mm, $\varphi_{22}$ 为 $15^\circ$ ;捞种勺III的 $D_3$ 为15 mm, $D_{33}$ 为5 mm, $r_{33}$ 为25 mm, $r'_{33}$ 为40 mm。每种捞种勺试验重复3次,结果取平均值,见表2。可知捞种勺II充种性能优于捞种勺I、III。捞种勺III充种性能最差,漏充指数7.72%,漏充现象严重。

分析可知充种区内木薯种茎数量和捞种勺外侧种茎间的相对运动状态是影响捞种勺可靠充种的重要因素<sup>[7,14]</sup>。因此,结合 EDEM 后处理功能采用充种区内木薯种茎的回填质量和捞种勺外种茎间法向力分别衡量不同时步下种茎回填效果和捞种勺外侧种茎间相对运动状态,以此进一步说明以最速降线理论设计的捞种勺对充种性能的影响规律。当充种区木薯种茎的回填质量越大,说明捞种勺的充种

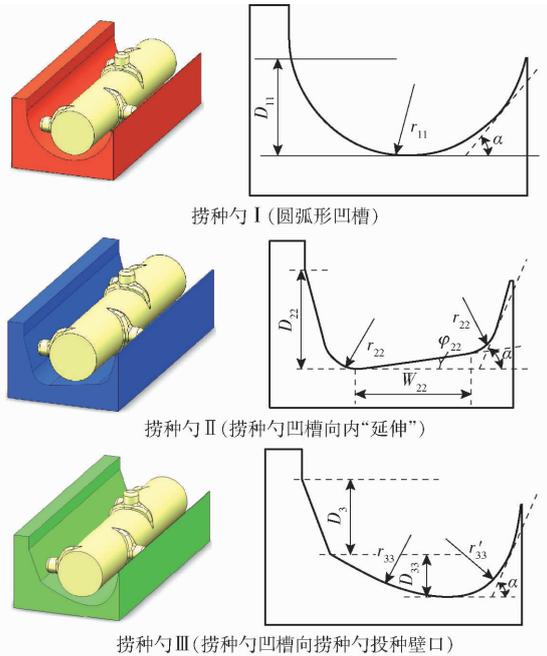


图9 不同型式的捞种勺形状结构与参数

Fig. 9 Shape and structure parameters of different types of seed scoops

表2 不同捞种勺型式的充种性能仿真结果

Tab.2 Simulation results of seed picking performance of different seed scoops

捞种勺型式	充种合格指数 $Y_1$	漏充指数 $Y_2$	重充指数 $Y_3$
I	90.45	5.90	3.65
II	91.48	4.87	3.65
III	88.03	7.72	4.25

性能越好。

为监测充种区局部种茎质量和捞种勺外局部种茎群相对运动状态,在播种器充种箱内木薯种茎群中建立监测器<sup>[14]</sup>,如图10所示。其中监测器主要监测充种区局部种茎质量与捞种勺外局部种茎群相对运动状态。

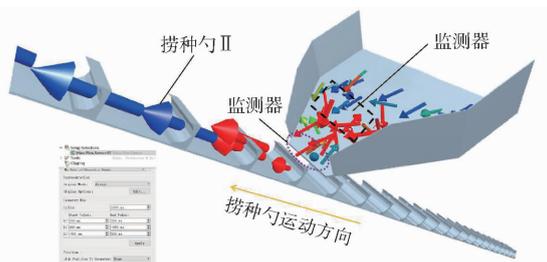


图10 仿真试验中建立的2个监测器

Fig. 10 Two monitors established by simulation test

利用 EDEM 后处理功能,分别分析在3种捞种勺下,充种区局部种茎回填质量和平均法向力,如图11所示。

结合图11可知,当采用捞种勺III进行充种作业,单根木薯种茎平均法向力较大,出现多个较大波峰值,且充种区局部种茎回填质量波动也较大,是因

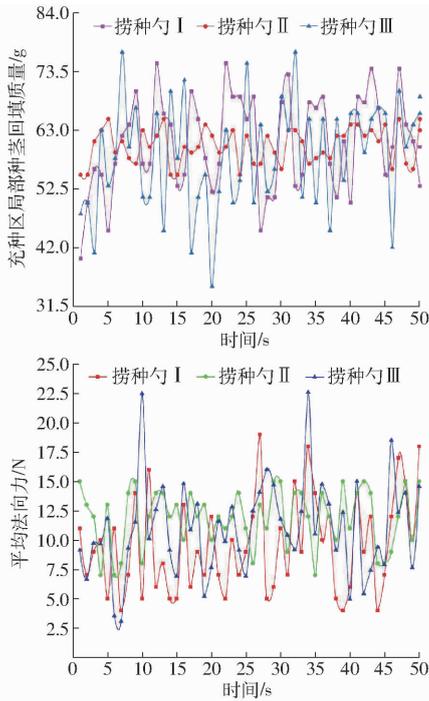


图 11 不同捞种勺型式时充种区局部种茎回填质量和平均法向力变化曲线

Fig. 11 Variation curves of backfilling quality and average normal force of local stems in seed filling area with different types of seed scoops

为捞种勺 III 凹槽向捞种勺投种壁口靠近, 充种区局部木薯种茎回填质量不稳定, 导致了木薯种茎平均法向力波动大, 这种捞种勺易造成木薯种茎漏充; 当采用捞种勺 II 进行充种作业, 捞种勺凹槽向内延伸, 种茎群流动稳定, 充种区局部种茎回填质量波动小, 且单根木薯种茎平均法向力波动较小, 充种可靠。

因此, 对比分析表 2 和图 11, 基于最速降线理论设计的捞种勺 I, 其内部凹槽平缓, 虽重充指数较低, 但漏充指数也较高, 不宜采用该种型式捞种勺。捞种勺 II 凹槽向内延伸, 种茎进入捞种勺充种稳定, 此时排种机构充种合格指数可达 91.48%, 漏充指数为 4.87%, 充种效果较佳。故此, 捞种勺优选为捞种勺 II。

### 3.3.2 捞种勺数量

为进一步研究捞种勺数量对充种性能的影响规律, 根据式 (14) 优取捞种勺数量为 9、12、15、18 个, 进行单因素试验。仿真时捞种勺优选捞种勺 II, 每组仿真重复 3 次, 取平均值, 结果如表 3。

随着捞种勺数量增加, 呈现充种合格指数减小, 漏充指数增加。主要是因为捞种勺数量过多, 在相同主链轮线速度的情况下, 充种时间变短, 导致漏充指数增加。为保证较高充种性能, 捞种勺数量取 9~15 个。

表 3 不同捞种勺数量下充种性能仿真结果

Tab. 3 Simulation results of different numbers of scoops on seed picking performance %

捞种勺数量/ 个	充种合格指数 $Y_1$	漏充指数 $Y_2$	重充指数 $Y_3$
9	89.05	5.87	5.08
12	92.09	6.09	1.82
15	87.45	9.50	3.05
18	85.43	12.31	2.26

### 3.3.3 输送链运动速度

为保证播种器能够在合适作业速度下正常工作, 输送链运动速度优选 0.3、0.5、0.7、0.9 m/s。充种性能仿真结果如表 4。

表 4 不同输送链速度下充种性能仿真结果

Tab. 4 Simulation results of different conveyor chain speeds on seed picking performance %

输送链运动速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	充种合格指数 $Y_1$	漏充指数 $Y_2$	重充指数 $Y_3$
0.3	89.24	7.09	3.67
0.5	92.87	4.69	2.44
0.7	90.05	6.90	3.05
0.9	85.45	12.72	1.83

由表 4 可知, 随着输送链运动速度增加, 充种合格指数呈现减小趋势, 漏充指数呈现增大趋势。在输送链不同线速度作用下, 在充种区木薯种茎与捞种勺间的接触法向力影响木薯种茎与捞种勺相对运动, 从而影响充种效果<sup>[15]</sup>。为进一步分析不同输送链运动速度对充种性能的影响规律, 利用 EDEM 后处理功能输出木薯种茎与捞种勺接触法向力随时间的变化曲线, 如图 12 所示。可知当输送链运动速度为 0.9 m/s, 接触法向力波动较大, 种茎受捞种勺不稳定力作用不利于充种。为保证工作效率和充种稳定性, 输送链运动速度取 0.3~0.7 m/s。

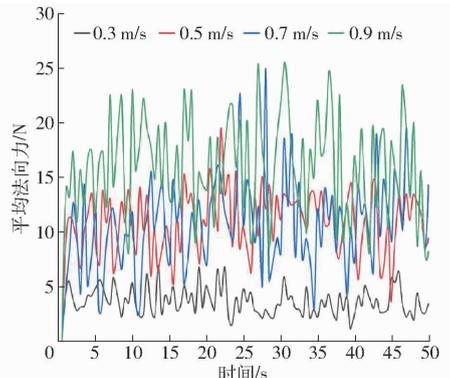


图 12 不同输送链运动速度下木薯种茎接触法向力变化曲线

Fig. 12 Variation curves of normal force of cassava seed stem contact at different conveying chain speeds

### 3.3.4 充种倾角

由图5所示的种茎充种过程分析可知,当捞种勺充种倾角增大,由于捞种勺滑落点切线夹角不变,捞种勺入口路线变短,捞种勺深度也随着充种倾角增加而降低,会进一步影响种茎在捞种勺中的稳定性,经大量试验得到在不影响充种性能情况下,最大值为 $45^{\circ}$ <sup>[7]</sup>。为研究不同充种倾角对充种性能的影响规律,充种倾角取 $30^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 进行仿真试验,充种性能仿真结果如表5。

表5 不同充种倾角下充种性能仿真结果

Tab.5 Different inclinations of seed filling simulation results of seed picking performance %

充种倾角/ ( $^{\circ}$ )	充种合格指数 $Y_1$	漏充指数 $Y_2$	重充指数 $Y_3$
30	89.05	4.27	6.68
35	92.09	4.87	3.04
40	90.87	6.09	3.04
45	85.45	10.9	3.65

结果表明随着充种倾角增加,充种合格指数先增加后减小,原因是随着充种倾角增加,增加了种茎运动侧向力,充种能力增加<sup>[12]</sup>,但随着充种倾角增加,运动速度变大,降低了种茎进入捞种勺的机率,漏充指数增加。为进一步分析不同充种倾角对充种性能的影响,输出不同充种倾角下种茎速度变化曲线<sup>[15]</sup>如图13所示,充种倾角为 $45^{\circ}$ 时,种茎速度变化大,充种合格指数减小。为保证工作效率和充种稳定性,充种倾角取 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。

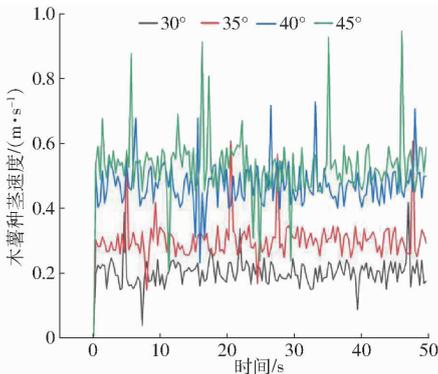


图13 不同充种倾角下木薯种茎速度变化曲线

Fig.13 Cassava speed change curves with different filling inclinations

EDEM单因素仿真表明当选择捞种勺II时,因素较优取值范围是:捞种勺数量为9~15个,充种倾角为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,输送链运动速度为 $0.3 \sim 0.7 \text{ m/s}$ 。

### 3.4 响应面BBD仿真试验

基于单因素试验所确定的因素取值范围,通过响应面BBD试验确定最优因素参数组合。

#### 3.4.1 试验方案与结果分析

试验因素编码值和试验方案如表6、7,其中 $x_1$ 、

$x_2$ 、 $x_3$ 为充种倾角、捞种勺数量以及输送链运动速度的编码值,每组试验重复3次,结果取平均值。

表6 试验因素编码

Tab.6 Coding of factors

编码	因素		
	充种倾角/ ( $^{\circ}$ )	捞种勺数量/ 个	输送链运动速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
-1	30	9	0.3
0	35	12	0.5
1	40	15	0.7

表7 试验方案与结果

Tab.7 Experiment scheme and results

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$			
1	-1	-1	0	88.2	0.6	11.2
2	1	-1	0	90.2	6.2	3.6
3	-1	1	0	78.6	7.4	14.0
4	1	1	0	87.6	8.6	3.8
5	-1	0	-1	81.0	11.4	7.6
6	1	0	-1	89.9	7.9	2.2
7	-1	0	1	91.6	1.3	7.1
8	1	0	1	90.2	3.2	6.6
9	0	-1	-1	87.8	7.3	4.9
10	0	1	-1	80.3	13.0	6.7
11	0	-1	1	90.4	3.1	6.5
12	0	1	1	91.1	2.6	6.3
13	0	0	0	92.8	4.0	3.2
14	0	0	0	93.7	4.5	1.8
15	0	0	0	93.2	2.8	4.0
16	0	0	0	93.4	4.1	2.5
17	0	0	0	92.5	2.8	4.7

根据表7试验结果进行充种合格指数与漏充指数的方差分析,结果如表8、9所示。

表8 充种合格指数回归模型方差分析

Tab.8 Variance analysis of regression model of seed filling qualification index

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	347.61	9	38.62	39.38	<0.0001
$x_1$	42.78	1	42.78	43.62	0.0003
$x_2$	45.12	1	45.12	46.01	0.0003
$x_3$	73.81	1	73.81	75.26	<0.0001
$x_1x_2$	12.25	1	12.25	12.49	0.0095
$x_1x_3$	26.52	1	26.52	27.04	0.0013
$x_2x_3$	16.81	1	16.81	17.14	0.0043
$x_1^2$	40.40	1	40.40	41.19	0.0004
$x_2^2$	63.14	1	63.14	64.38	<0.0001
$x_3^2$	14.37	1	14.37	14.65	0.0065
失拟项	5.96	3	1.99	8.75	0.0313
误差	0.9080	4	0.2270		
总和	354.48	16			

根据上述分析结果,建立充种合格指数 $Y_1$ 、漏

表 9 漏充指数回归模型方差分析

Tab.9 Variance analysis of regression model of

leakage charging index

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	180.92	9	20.10	10.57	0.002 6
$x_1$	3.38	1	3.38	1.78	0.224 3
$x_2$	25.92	1	25.92	13.62	0.007 7
$x_3$	108.05	1	108.05	56.79	0.000 1
$x_1x_2$	4.84	1	4.84	2.54	0.154 7
$x_1x_3$	7.29	1	7.29	3.83	0.091 2
$x_2x_3$	9.61	1	9.61	5.05	0.059 4
$x_1^2$	2.40	1	2.40	1.26	0.298 4
$x_2^2$	7.17	1	7.17	3.77	0.093 3
$x_3^2$	10.18	1	10.18	5.35	0.053 9
失拟项	10.83	3	3.61	5.79	0.614
误差	2.49	4	0.623 0		
总和	194.24	16			

充指数  $Y_2$ 、重充指数  $Y_3$  与  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  之间的回归方程

$$Y_1 = 93.12 + 2.31x_1 - 2.37x_2 + 3.04x_3 + 1.75x_1x_2 - 2.58x_1x_3 + 2.05x_2x_3 - 3.1x_1^2 - 3.87x_2^2 - 1.85x_3^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 3.64 + 0.65x_1 + 1.80x_2 - 3.68x_3 - 1.1x_1x_2 + 1.35x_1x_3 - 1.55x_2x_3 + 0.755x_1^2 + 1.3x_2^2 + 1.56x_3^2 \quad (22)$$

$$Y_3 = 3.24 - 2.96x_1 + 0.575x_2 + 0.64x_3 - 0.65x_1x_2 + 1.23x_1x_3 - 0.50x_2x_3 + 2.34x_1^2 + 2.57x_2^2 + 0.29x_3^2 \quad (23)$$

根据回归结果,分别固定输送链运动速度、取捞种勺数量和充种倾角为零水平,绘制相应的曲面和

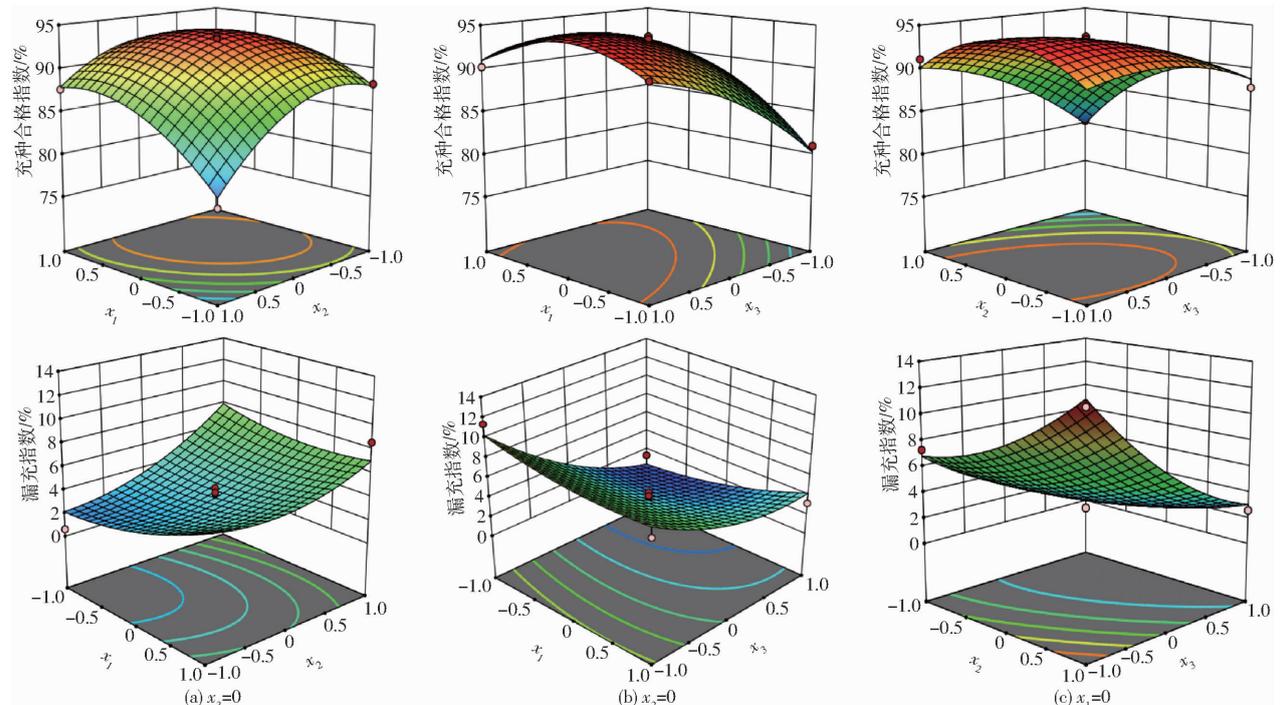


图 14 试验因素对试验指标影响的响应曲面

Fig.14 Response surfaces of test factors to test indexes

等值曲线,分析试验因素对充种合格指数及漏充指数的影响规律,如图 14 所示。由表 8、9 可知,影响排种机构充种合格指数的因素主次顺序为输送链运动速度、捞种勺数量以及充种倾角;影响漏充指数的因素主次顺序为输送链运动速度、捞种勺数量以及充种倾角。

### 3.4.2 试验结果目标优化

为了获得最佳作业参数,优化工作参数,实现因素间的合理匹配是提高合格指数的关键,以充种合格指数  $Y_1$  最大、漏充指数  $Y_2$  最小与重充指数  $Y_3$  最小为目标,目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_3(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

采用线性规划数学模型对目标函数进行优化,求得充种倾角为  $37.04^\circ$ 、捞种勺数量为 11.7 个、输送链运动速度为 0.627 m/s 时,充种合格指数为 94.3%,漏充指数为 1.8%,重充指数为 3.9%。

## 4 播种性能试验

### 4.1 台架试验

为验证仿真试验准确性以及试验样机作业可靠性,研制预切种振动供种式木薯精密播种器试验样机进行试验。试验采用与仿真一致的桂热 4 号木薯

种茎为试验材料,地点为广西师范大学机械工程实验室,试验于2022年4月22—24日进行。选用捞种勺Ⅱ(为方便加工和参数调节,圆整充种倾角为 $37^\circ$ 、捞种勺数量12个、输送链运动速度为 $0.63\text{ m/s}$ 进行试验)。图15为方便观察充种性能,去掉护种部件。利用湖南科天健光电技术有限公司的ACUTEYE-2M-1000型高速摄像机(采用高性能CMOS传感器,像素分辨率为 $1\,920\text{ 像素}\times 1\,080\text{ 像素}$ ,最高帧率 $1\,087\text{ f/s}$ )拍摄充种情况,待播种器稳定后统计播种器进行50个捞种勺充种时情况,以充种合格指数 $Y_1$ 、漏充指数 $Y_2$ 和重充指数 $Y_3$ 为试验指标进行试验,试验重复3次,结果取平均值。

振动调序供种段



图15 播种器台架试验

Fig. 15 Seeder bench test

1. 阶梯式振动散种机构 2. 图像显示器 3. 落种滑板 4. 木薯种茎 5. 勺链排种机构 6. 高速摄像机

根据台架试验可知,播种器充种合格指数为 $93.8\%$ ,漏充指数为 $1.9\%$ ,重充指数为 $4.3\%$ ,试验结果与仿真结果吻合,说明基于EDEM的播种器工作参数优化试验结果可靠。

#### 4.2 田间试验

2022年4月26日在广西壮族自治区资源县中峰农场试验地进行田间试验。为验证播种器对不同品种木薯适应性能,选取桂垦09-26、新选048、华南205品种进行田间试验。试验土壤坚实度 $63.2\text{ kPa}$ ,土壤含水率 $18\%$ 。国内目前还没有针对木薯播种装备的技术标准,依据文献[23-24]以及农民实际播种需求,选取种茎株间合格指数 $y_1$ 、重播指数 $y_2$ 和漏播指数 $y_3$ 为指标进行田间试验。

测定各项播种性能指标,为减少试验误差,将作业区划分为启动区、测试区和停止区,测量总距离为 $150\text{ m}$ ,前后启动区和停止区为 $15\text{ m}$ (试验现场如图16所示),在此工况下进行3次田间试验,结果取平均值,如表10。为较好观察木薯精密播种机播

种效果,3次田间试验时,在部分测试区播种时,播种机的覆土装置不进行作业,方便观察播种效果。待试验指标测定后,这部分试验区域后续进行人工覆土。由于田间作业时,土地不平整,使播种机产生振动,田间试验结果与台架试验结果存在差异。



图16 田间试验现场

Fig. 16 Field test site

表10 田间播种性能对比

Tab. 10 Seeding performance comparison results %			
品种	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
桂垦09-26	91.4	6.8	1.8
新选048	93.7	4.6	1.7
华南205	92.3	5.2	2.5

## 5 结论

(1)设计了一种预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构。基于最速降线理论对捞种勺进行设计,并对排种机构充种和投种过程木薯种茎受力和运动状态进行分析,找出影响机构性能显著因素分别是捞种勺型式、输送链速度、捞种勺数量、充种倾角。

(2)基于EDEM建立了木薯种茎-勺链排种机构充种过程离散元模型,以充种合格指数、漏充指数、重充指数为试验指标进行单因素试验,结果表明选取捞种勺Ⅱ,捞种勺数量为 $9\sim 15$ 个,充种倾角为 $30^\circ\sim 40^\circ$ ,输送链运动速度为 $0.3\sim 0.7\text{ m/s}$ 是较优取值范围;通过响应面BBD试验确定最优因素参数组合;当充种倾角 $37.04^\circ$ ,捞种勺数量 $11.7$ 个、输送链运动速度 $0.627\text{ m/s}$ 时,充种合格指数为 $94.3\%$ ,漏充指数为 $1.8\%$ 。

(3)研制试验样机进行了台架与田间试验。在最优因素参数组合下,播种器充种合格指数为 $93.8\%$ ,漏充指数为 $1.9\%$ 。田间试验表明在该作业参数组合下播种器性能满足木薯精密播种的农艺要求。

## 参考文献

- [1] 卢赛清,雷开文,韦丽君,等.广西木薯种植气候适宜性分析及高产栽培技术[J].农业与技术,2021,41(24):57-59.  
LU Saiqing, LEI Kaiwen, WEI Lijun, et al. Climate suitability analysis and high yield cultivation techniques of cassava in Guangxi[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(24): 57-59. (in Chinese)

- [2] 曹升,陈江枫,黄富宇,等.广西木薯产业现状分析及其发展建议[J].南方农业学报,2021,52(6):1468-1476.  
CAO Sheng, CHEN Jiangfeng, HUANG Fuyu, et al. Current situation analysis and development suggestions of cassava industry in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021,52(6):1468-1476. (in Chinese)
- [3] LUNGKAPIN J, SALOKHE V M, KALSIRISILP R, et al. Development of a stem cutting unit for a cassava planter[J]. Agricultural Engineering International, 2007, 9(4):1-16.
- [4] LUNGKAPIN J, SALOKHE V M, KALSIRISILP R, et al. Design and development of a cassava planter[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2):393-399.
- [5] 邵仁清,关意昭,周世英.2BMSU/2X 旋切开沟式木薯播种机的研制[J].广西农业机械化,2014(4):34-36.  
SHAO Renqing, GUAN Yizhao, ZHOU Shiyong. Development of 2BMSU/2X rotary cutting and ditching cassava planter[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2014(4):34-36. (in Chinese)
- [6] 曾伯胜,叶才学,鲁华.2CMS-2 型木薯联合种植机的研究设计[J].广西农业机械化,2011(6):21-22.  
ZENG Bosheng, YE Caixue, LU Hua. Research and design of 2CMS-2 cassava combine planter[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2011(6):21-22. (in Chinese)
- [7] 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):88-97.  
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):88-97. (in Chinese)
- [8] 麻芳兰,刘天翔,李尚平,等.预切种式甘蔗横向排种器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(7):72-81.  
MA Fanglan, LIU Tianxiang, LI Shangping, et al. Design and test of transverse transplanter for pre-cut sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7):72-81. (in Chinese)
- [9] 赵满全,窦卫国,赵士杰,等.2BSL-2 型马铃薯起垄播种机的研制[J].内蒙古农业大学学报,2001,22(1):101-104.  
ZHAO Manquan, DOU Weiguo, ZHAO Shijie, et al. Development of 2BSL-2 potato ridging planter[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2001,22(1):101-104. (in Chinese)
- [10] 李成松,冯玉磊,坎杂,等.单行悬挂式马铃薯施肥种植机的研制[J].江苏农业科学,2013,41(6):369-371.  
LI Chengsong, FENG Yulei, KAN Za, et al. Development of single row hanging potato fertilizer planter[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2013,41(6):369-371. (in Chinese)
- [11] 韩杰,文晟,刘庆庭,等.预切种式甘蔗种植机的设计与试验[J].华南农业大学学报,2019,40(4):109-118.  
HAN Jie, WEN Sheng, LIU Qingting, et al. Design and test of pre cutting sugarcane planter[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(4):109-118. (in Chinese)
- [12] 陈林涛,薛俊祥,牟向伟,等.预切种木薯播种器阶梯式振动散种机构设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(8):27-37.  
CHEN Lintao, XUE Junxiang, MOU Xiangwei, et al. Design and experiments of the stepped vibration seed dispersal mechanism for pre-cut cassava planters[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(8):27-37. (in Chinese)
- [13] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):43-53.  
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):43-53. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等.宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(1):75-84.  
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):75-84. (in Chinese)
- [16] 张青松,余琦,王磊,等.油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):47-54,64.  
ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):47-54,64. (in Chinese)
- [17] 吕金庆,朱明芳,竹筱歆,等.气吸式马铃薯播种机一体式风机优化设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):80-90.  
LÜ Jinqing, ZHU Mingfang, ZHU Xiaoxin, et al. Optimization design and test of integrated fan of air suction potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):80-90. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [19] 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [20] 吕金庆,杨颖,尚琴琴.气吸式马铃薯排种器正压吹种零速投种性能优化试验[J].农业工程学报,2016,32(20):40-48.  
LÜ Jinqing, YANG Ying, SHANG Qinqin. Optimization test of positive pressure seed blowing and zero speed seed feeding performance of air suction potato seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(20):40-48. (in Chinese)
- [21] 杨望,蔡敢为,杨坚,等.木薯块根拔起力的力学模型和数学模型分析[J].农业工程学报,2011,27(11):95-100.  
YANG Wang, CAI Ganwei, YANG Jian, et al. Mechanical and mathematical model analysis of uprooted force on cassava storage root[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(11):95-100. (in Chinese)
- [22] 杨望,杨坚,郑晓婷,等.木薯力学特性测试[J].农业工程学报,2011,27(14):50-54.  
YANG Wang, YANG Jian, ZHENG Xiaoting, et al. Experiment on mechanical properties of cassava[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(14):50-54. (in Chinese)

- LU Huazhong, LI Jun, LI Can. Research progress of orchard mechanized production technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(11): 226 - 235. (in Chinese)
- [13] 王海波, 刘凤之, 王孝娣, 等. 我国果园机械研发与应用概述[J]. 果树学报, 2013, 30(1): 165 - 170.  
WANG Haibo, LIU Fengzhi, WANG Xiaodi, et al. Overview of R&D and application of orchard machinery in China[J]. Journal of Fruits Science, 2013, 30(1): 165 - 170. (in Chinese)
- [14] 刘思宇, 李冬洁. 基于计算机视觉的人体行为识别方法的应用与探讨[J]. 中国新通信, 2020, 22(12): 98.
- [15] 张会珍, 刘云麟, 任伟建, 等. 人体行为识别特征提取方法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(3): 360 - 370.  
ZHANG Huizhen, LIU Yunlin, REN Weijian, et al. A review of human behavior recognition feature extraction methods[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2020, 38(3): 360 - 370. (in Chinese)
- [16] 沈祥培. 人体姿态识别算法研究及其应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
SHEN Xiangpei. Research and application of human pose recognition algorithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. (in Chinese)
- [17] NAVEED H, JAFRI F, JAVED K, et al. Driver activity recognition by learning spatiotemporal features of pose and human object interaction[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2021, 77(2-3): 103135.
- [18] YAO Bangpeng, LI Feifei. Recognizing human-object interactions in still images by modeling the mutual context of objects and human poses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(9): 1691.
- [19] DUNG M, HOANG K. Motorbike theft detection based on object detection and human activity recognition[C]//2013 IEEE International Conference on Control, Automation and Information Sciences. IEEE, 2013: 358 - 362.
- [20] 吴蓬勃, 张金燕, 王帆, 等. 快递暴力分拣行为视觉识别系统[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 245 - 252.  
WU Pengbo, ZHANG Jinyan, WANG Fan, et al. Visual recognition system for express violent sorting behavior[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 245 - 252. (in Chinese)
- [21] 李颀, 姜莎莎. 面向家庭安防系统的姿态和物体融合识别方法[J]. 中国科技论文, 2021, 16(3): 281 - 287.  
LI Qi, JIANG Shasha. Attitude and object fusion recognition method for home security system[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(3): 281 - 287. (in Chinese)
- [22] ZHE C, SIMON T, WEI S E, et al. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2017: 1302 - 1310.
- [23] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2016: 779 - 788.
- [24] HEARST M A, DUMAIS S T. Support vector machines[J]. IEEE Intelligent Systems & Their Applications, 1998, 13(4): 18 - 28.
- [25] HSU C W, LIN C J. A comparison of methods for multiclass support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(2): 415 - 425.

(上接第 31 页)

- [23] 中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [24] 中国机械工业联合会. 单粒(精密)播种机技术条件: JB/T 10293—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [25] 李尚平, 黄宗晓, 张伟, 等. 预切种式宽窄行甘蔗种植机单辊排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 113 - 121.  
LI Shangping, HUANG Zongxiao, ZHANG Wei, et al. Experiments and design on single-rolled seed-sowing system of pre-seed-cutting sugarcane planters with wide and narrow row spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 113 - 121. (in Chinese)
- [26] 刘彩玲, 王超, 宋建农. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108 - 115.  
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108 - 115. (in Chinese)
- [27] 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65 - 73.  
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65 - 73. (in Chinese)
- [28] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错匀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)
- [29] 李峰. 刮板输送机驱动链轮的优化设计及应用[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(5): 198 - 200.  
LI Feng. Optimization design and application of drive sprocket of scraper conveyor[J]. Mechanical Research and Application, 2021, 34(5): 198 - 200. (in Chinese)