

谷子穴播机勺链式导种装置设计与试验

衣淑娟 孙亭瀚 陈 涛 李衣菲 李怡凯

(黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 针对谷子播种时在导种管内弹跳严重,导致谷子落地后成穴性差的问题,设计了一种谷子穴播机勺链式导种装置。其工作原理为通过约束种子运移轨迹提高其落地后成穴性,对关键零部件进行了设计,对纳种与投种过程进行了运动分析,确定了影响导种性能的重要因素。为获得最佳参数组合,分别以圆形勺、方形勺、方形平嘴勺3种勺型式和 ABS、橡胶、亚克力3种材料为因素进行单因素试验,试验结果表明方形平嘴勺和橡胶材料效果最佳。在此基础上,以纳种角度、纳种高度和链轮转速为纳种试验因素,以纳种合格率为评价指标;以投种高度、投种角度和链轮转速为投种试验因素,以穴径合格率、穴粒数合格率及穴距变异系数为投种评价指标,通过 EDEM 离散元仿真软件分别进行纳种过程与投种过程的三因素五水平二次正交旋转组合仿真试验。纳种过程最佳参数组合为:纳种角度 45.95° 、纳种高度 74.05 mm、链轮转速 1.76 r/s;投种过程最佳参数组合为:投种角度 53.51° 、投种高度 25.96 mm、链轮转速 1.98 r/s。为进一步验证导种装置性能,在最佳参数组合下进行台架验证试验与对比试验,验证试验中纳种合格率为 95.53%、穴径合格率为 93.29%、穴粒数合格率为 94.73%、穴距变异系数为 7.46%,台架验证试验结果与仿真试验结果基本一致,相对差值均小于 5%;对比试验结果表明,安装勺链式导种装置的播种效果明显优于安装导种管的播种效果,穴径合格率、穴粒数合格率、穴距变异系数最大可提高 2.75、3.43、3.25 个百分点。

关键词: 谷子穴播机;勺链式;导种装置

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0039-14

OSID:



Design and Test of Spoon Chain Seed Guide Device for Grain Hole Seeder

YI Shujuan SUN Tinghan CHEN Tao LI Yifei LI Yikai

(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Aiming at the problem that grains bounce badly in the seed guide tube when sowing, resulting in poor hole formation after landing, a spoon chain seed guide device for grain hole seeder was designed. Its working principle was to improve the hole formation after landing by restraining the seed transport trajectory, the key components were designed, the motion analyses were carried out on the seed storage and seed casting process, and the important factors affecting the performance of the seed guide were determined. In order to obtain the best combination of parameters, three types of spoons, namely, round spoon, square spoon and square flat spoon, and three types of materials, namely, ABS, rubber and acrylic, were used as factors in the one-way test, and the test results showed that the square flat spoon and the rubber material were the most effective. On this basis, the angle of incorporation of seeds, height of incorporation seed and sprocket speed were taken as the incorporation of seed test factors, and the seeding qualification rate was taken as the evaluation index; the seeding height, seeding angle and sprocket speed were taken as the seeding test factors, and the qualification rate of hole diameter, qualification rate of the number of holes and the coefficient of variation of hole spacing were taken as the seeding evaluation indexes, and the three-factor, five-level quadratic rotational combination test was carried out for the seeding and the seeding process through the EDEM discrete element simulation software, respectively. The optimal parameter combinations for the seed-retention process were seed-retention angle of 45.95° , seed-retention height of 74.05 mm, and sprocket rotational speed of 1.76 r/s; and the optimal parameter combinations for the seed-introduction process were seed-introduction angle of 53.51° , seed-introduction height of 25.96 mm, and sprocket rotational speed of 1.98 r/s. In order to

收稿日期: 2024-04-16 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275246)

作者简介: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事小籽粒播种装置研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

further validate the performance of seed-guiding device, bench-top validation test and comparative test were carried out under the optimal parameter combinations. In the test, the seed qualification rate was 95.53%, the hole diameter qualification rate was 93.29%, the hole number qualification rate was 94.73%, and the coefficient of variation of hole spacing was 7.46%, and the results of the bench validation test were basically the same as those of the simulation test, with the relative differences being less than 5%; and the results of the comparative test showed that the sowing effect of the installation of the spoon chain seed-guiding device was significantly better than that of the installation of the seed-guiding tube, and the hole diameter qualification rate. The qualified rate of hole diameter, qualified rate of hole number and coefficient of variation of hole spacing can be improved by 2.75, 3.43 and 3.25 percentage points.

Key words: cereal hole planter; spoon chain; seed guides device

0 引言

目前,谷子播种以条播和撒播为主,但这两种播种方式需进行间苗处理^[1],存在种子与水肥用量大、成本高的问题。穴播作为一种先进的谷子播种方式,能够精确控制排种量、穴粒数,确保群体优势顶土能力,成为目前谷子播种技术重要发展方向。但因谷子种子粒径小、质量轻、易破损且含有糠皮,导致谷子穴播排种器存在易堵孔、排种均匀性差的问题^[2]。为此研制出正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器^[3],实现了定量分种,并有效解决了堵孔、排种均匀性差的问题。但排种器配合使用现有导种管,存在谷子在导种管内弹跳严重的问题,导致谷子落地后分布不均,影响播种成穴性。因此,改善谷子播种落地后成穴效果对促进谷子播种技术发展具有重要意义。

国内外学者对导种装置进行了大量研究。瑞典 Vaderstad 公司研制了一种圆形导种管^[4],该导种管由一段直线和一段曲线组合而成,在正压气流的作用下携种运动,实现快速、精确投种;美国 Precision Planting 公司研制了一种带式导种装置^[5],该装置通过拨指轮将排种器排出的种子输送至导种带,并通过导种带将种子最终输送至种沟;国内,陈学庚等^[6]针对免耕播种机双圆盘式开沟器投种点高导致播种合格率低的问题,基于时间平衡原理设计了一种传动与投种机构一体的带式导种装置,有效降低了投种高度,提高粒距均匀性;刘立晶等^[7]针对玉米精密播种机使用导种管的结构不合理导致株距均匀性差的问题,应用逆向工程方法对国外导种管进行反求重建,研制出满足精量播种农艺要求的曲线导种管,降低了设计成本,为导种管的研究和设计提供了参考。但国内外研发的导种装置因播种要求不同和关键部件不通用,因此并不适用于小籽粒多粒穴播,因此,有必要设计一种可有效约束小籽粒运移轨迹且成穴较好的导种装置。

基于此,本文设计一种谷子穴播机勺链式导种装置,提高谷子落地后的成穴性。利用 EDEM 软件对种勺工作性能进行仿真分析,通过三因素五水平二次正交旋转组合仿真试验得到导种装置纳种和投种过程的最佳作业参数,搭建试验台架,通过台架试验和对比试验验证导种装置的性能。

1 导种装置结构与工作原理

谷子穴播勺链式导种装置主要由链条、链轮、种勺、张紧装置及导种架等组成。其中,张紧装置主要由张紧链轮、张紧轴及张紧螺杆组成。整体结构如图 1 所示。导种装置的工作过程分为纳种、运种和投种 3 部分。工作时,主动链轮在电机驱动下转动,通过链传动带动从动链轮和张紧链轮转动,种勺在纳种点时完成纳种,跟随链条向下运动,运动至投种点时倾斜向上运动,种子在重力和离心力的作用下

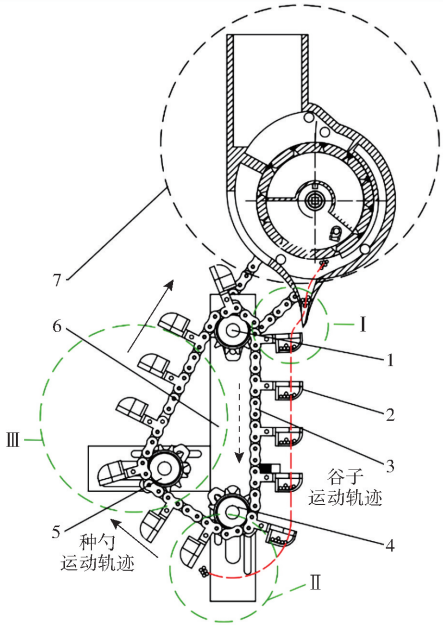


图 1 谷子穴播勺链式导种装置结构图

Fig. 1 Structure of grain hole sowing spoon chain seed guide device

1. 主动链轮 2. 种勺 3. 链条 4. 从动链轮 5. 张紧链轮 6. 导种架 7. 排种器 I. 纳种区 II. 投种区 III. 过渡区

离开种勺进入种沟,种勺循环进行上述工作,完成导种过程。

2 关键部件设计

2.1 种勺设计

种勺是导种装置纳入种子、平稳运输至投种点并按照成穴要求完成投种的核心部件^[8-10],其结构形状与尺寸参数影响整个导种装置的性能。种勺的基本尺寸(长度 L 、宽度 W 、深度 D)取决于谷子与种勺材料发生碰撞的弹跳情况^[11]。因种子离开排种器时具有初速度,为保证种子顺利进入种勺,需计算种子离开排种器时的速度。种子在排种器排种点时受力情况如图2所示。

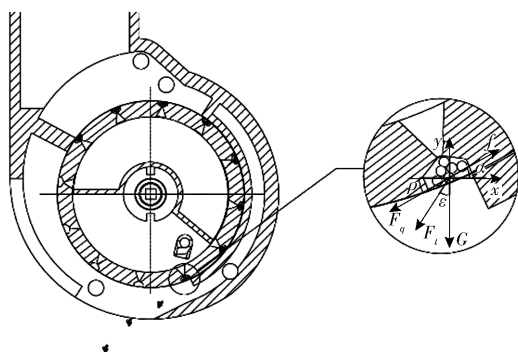


图2 谷子脱离排种器受力图

Fig. 2 Force diagram of millet detached from seed discharger

由图2得种子在排种器内受力方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_q \cos \rho + F_i \tan \varepsilon - f \cos \alpha \\ \sum F_y = G + F_i \cos \varepsilon + F_q \sin \rho - f \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F_i = \Delta P \frac{\pi d^2}{4} \\ F_q = \frac{mv_p^2}{r} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\sum F_x$ ——沿 x 坐标方向合力,N

$\sum F_y$ ——沿 y 坐标方向合力,N

G ——种子自身重力,N

F_q ——种子离心力,N

F_i ——正压气嘴对种子作用力,N

v_p ——型孔轮最大线速度,m/s

f ——护种板对种子的摩擦力,N

ΔP ——型孔内外压差,kPa

d ——型孔直径,mm

r ——型孔轮半径,mm

m ——种子质量,kg

ε ——正吹压力与竖直方向夹角,(°)

α ——摩擦力与水平方向夹角,(°)

ρ ——离心力与水平方向夹角,(°)

由公式(1)、(2)可知,种子脱离排种器时与重力 G 、气嘴正向吹力 F_i 、型孔壁对种子的推力 F_q 、护种板对种子摩擦力 f 及力与纵坐标轴的夹角等因素有关。

排种器最优正压力为2.5 kPa^[12],在满足最大作业速度6 km/h条件下,型孔轮转速 n 可达50 r/min。型孔轮半径为90 mm,型孔轮线速度计算公式为

$$\begin{cases} \omega = 2\pi n \\ v_p = \omega r \end{cases} \quad (3)$$

式中 ω ——型孔轮角速度,rad/s

通过公式(3)可算出,型孔轮最大线速度 v_p 可达0.47 m/s。

型孔轮上正压气力进气口直径 l_1 为9 mm,出气口直径 l_2 为1.2 mm,结构如图3所示。

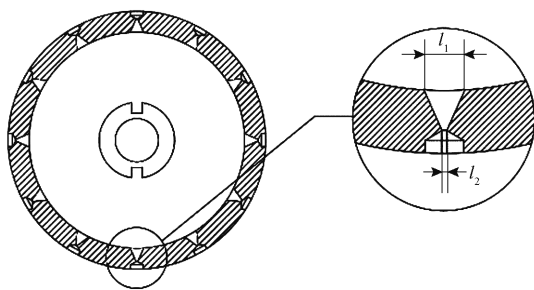


图3 型孔结构示意图

Fig. 3 Schematic of hole structure

经试验测得,谷子千粒质量为2.8~3.0 g。

$$\begin{cases} t = \frac{l_1}{v_p} \\ F = PA \\ a_1 = \frac{F_i}{m} \\ v = v_p + a_1 t \end{cases} \quad (4)$$

式中 t ——正压气嘴对种子作用时间,s

P ——正压气嘴产生的气压,kPa

F ——正压气嘴对种子施加的力,N

A ——型孔轮出气孔面积,m²

a_1 ——正压气嘴对种子施加的加速度,m/s²

v ——种子离开排种器时速度,m/s

利用公式(4)计算得出,正压气嘴对每个进气口作业时间为0.29 s,气压对种子施加 2.26×10^{-3} N的力,正压气力给种子施加的加速度最大值为0.81 m/s²,所以离开排种器时的最大瞬时速度 v 为0.69 m/s。动能守恒定律公式为

$$\frac{1}{2}mv_a^2 + mgh = \frac{1}{2}mv_b^2 \quad (5)$$

式中 v_a ——种子初始速度,m/s

v_b ——种子最终速度,m/s

h ——种子下落高度,m

g ——重力加速度, m/s^2

可得在高于排种点 24.3 mm 时释放种子,种子在排种点时可得到相应初速度。

结合实用性与经济性原则,选取“大穗金谷”为试验对象,选取 ABS、橡胶、亚克力塑料为种勺材料。排种器位于导种装置上方 70 ~ 90 mm,故需在 ABS、橡胶、亚克力材料上方 114.3 mm 时释放种子,试验测得,种子弹跳高度在 11.8 mm 内,弹射距离在 12.8 mm 内。考虑种子进入勺内弹射方向不唯一,且为了保证种勺纳种合格率,种勺深度 D 定为 13 mm,长度 L 与宽度 W 定为 26 mm。

为进一步保证种勺的纳种与投种合格率,对种勺形状进行设计。将种勺底部设计为球形使种子群在勺内呈聚集状态,结合种勺尺寸将勺口设计为圆形勺和方形勺使种子顺利进入种勺(图 4a、4b)。因成穴性要求高,在方形勺的前端加一平面,平面的长度介于 3 ~ 4 个谷子平均横向尺寸,使投种时在理想状态下种子按照每行 3 粒平行分布离开种勺(图 4c)。因种勺纳种与投种运动复杂,需后续利用 EDEM 软件对种勺形状进行分析,选取最佳结构型式种勺。

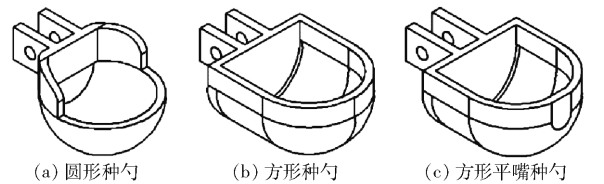


图 4 种勺结构示意图

Fig. 4 Schematics of seed spoon structure

2.2 种勺分布

在理想条件下,每一次投种时,落在种沟中的种子数与排种器所排出的种子数相等^[13]。满足公式

$$\frac{v_1 \Delta t}{S} = \frac{v_2 \Delta t}{l} \tag{6}$$

式中 v_1 ——播种机前进速度, m/s
 v_2 ——排种链条线速度, m/s
 S ——理论株距, mm l ——种勺间距, mm
 Δt ——落种时间间隔, s

谷子播种穴距一般介于 130 ~ 150 mm,播种机作业速度不超过 6 km/h,为保证充种质量,导种装置链条线速度不超过 0.55 m/s ^[14],此时链传动过程相对稳定。

通过分析得出排种器在排种转速最大时,种勺间距小于 64.4 mm;结合连接种勺链条外链板尺寸参数,种勺分布间隔应满足 $2n_1p \leq 64.4 \text{ mm}$ (n_1 为链节数, p 为链条节距)。08A 链条节距为 12.7 mm, n_1 可以取 1 或 2,在不超过链条最大稳定速度的同时,

为增大纳种空间,加大种勺间距, n_1 取 2。故种勺分布间距 l 为 50.8 mm。

考虑种子在投种过程中受到上一种勺的影响,在谷子到达投种点时,通过重力和离心力离开种勺^[15]。种子在离开种勺临界点时,上一种勺运动至投种点时所需时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{l}{v_2} \tag{7}$$

在 t_1 时间内,种子相对导种装置向下运动距离 l_3 为

$$l_3 = v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \tag{8}$$

式中 v_0 ——种勺顶点线速度, m/s

种勺顶点距离链轮中心 73.4 mm,计算得出链轮最大转速为 2.4 r/s,种勺顶点处线速度为 $v_0 = 1.7 \text{ m/s}$ 。将各数值代入式(7)、(8)得 $l_3 = 88.4 \text{ mm}$ 。当下一种勺运动至投种点时,种子与种勺相距 87.1 mm,相隔距离较远,因此下一种勺对种子的运动轨迹无影响,故种勺分布合理。

2.3 张紧结构设计

链条振动是影响导种装置纳种与投种质量的重要因素,为此设计张紧机构,通过保证链条松紧程度来控制链条振动,并可调节投种角度。如图 5 所示,张紧结构主要由从动轴、张紧轴、张紧螺杆、螺母来完成。张紧结构工作原理:张紧螺杆前端有一套筒,张紧轴固定于张紧螺杆套筒内,顺时针扭动张紧螺母,张紧轴受张紧螺杆推力在导种架长孔内横向移动,从动轴与其相互配合固定,因张紧边传动水平角小于 45°,令张紧边总移动量 l_{AB} 与两啮齿点距离之比介于 4% ~ 6%,链条松紧程度适中^[16],完成张紧工作。

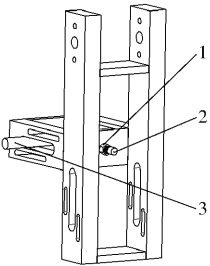


图 5 张紧结构示意图

Fig. 5 Schematic of tension structure

1. 螺母 2. 张紧螺杆 3. 张紧轴

3 导种过程运动分析

导种装置的纳种和投种过程是整个装置的核心过程,直接影响种子进入种沟时的数量和成穴性。为研究导种装置纳种稳定性与投种精准度,建立纳种过程和投种过程种子力学模型,对这两个阶段种子受力情况进行分析。

3.1 纳种过程

纳种过程是种群到达排种器排种点时通过排种器离心力、正压气力及自身重力离开排种器进入导种装置的过程,高质量纳种过程是导种装置平稳运行的前提。排种器与导种装置的转速与作业速度成正比,二者配合完成纳种工作。

排种器排种点与种子到达种勺底部高度差为纳种高度 H ,根据上述动能守恒定律可得

$$v_3 = \sqrt{v^2 + 2gH} \quad (9)$$

式中 v_3 ——种子与种勺第一次接触时速度, m/s

由公式(9)可知,种子与种勺碰撞时的瞬时速度与种子离开排种器时的速度及纳种高度有关。 v_3 越大,种子与种勺弹跳情况越剧烈,且种子在勺内的弹跳高度 h_1 满足公式

$$h_1 = \frac{v_3^2}{2g} \quad (10)$$

种子在勺内完成一次弹跳包括一次向上的弹跳和向下的自由落体运动,故种子在勺内弹跳 k 次所需时间 t_k 为

$$t_k = \sum_{i=1}^k \left(\frac{v_i}{g} + \sqrt{\frac{h_i}{g}} \right) \quad (11)$$

式中 v_i ——种子在勺内弹跳第 i 次时的速度, m/s

h_i ——种子在勺内弹跳第 i 次时的高度, mm

由公式(10)、(11)可知,种子与种勺碰撞后的速度、种子在勺内的弹跳时间与种子的初速度及纳种高度有关,种子在勺内运动时间越长越不稳定,种子的初速度取决于排种器转速与链轮转速,故链轮转速与纳种高度是影响纳种合格率的重要因素。

种子进入种勺与种勺发生碰撞时,种子表面与种勺表面均不光滑,故产生的碰撞为不完全弹性碰撞^[17],二者接触瞬间有动能损失,接触前后种子速度关系式为

$$v'_n = e_n v_n \quad (12)$$

式中 v'_n ——接触后种子法向速度, m/s

e_n ——法向碰撞恢复系数

v_n ——接触前种子法向速度, m/s

在纳种过程中,种子进入种勺时的速度方向与竖直方向的夹角为纳种角度。种子与种勺碰撞后沿法向速度方向运动,纳种时因种子进入种勺的方向不同,种子在勺内的运动情况也随之产生差异。通过高速摄像和图像目标追踪技术捕捉籽粒进入种勺后运动轨迹^[18],提取数据,可将其分为相同碰撞点不同纳种角度、不同碰撞点相同纳种角度与不同碰撞点不同纳种角度3种情况。种子运动轨迹如图6所示。

由图6可知,种子以不同角度进入种勺,种子的运动情况存在很大差异,从而影响纳种效果。

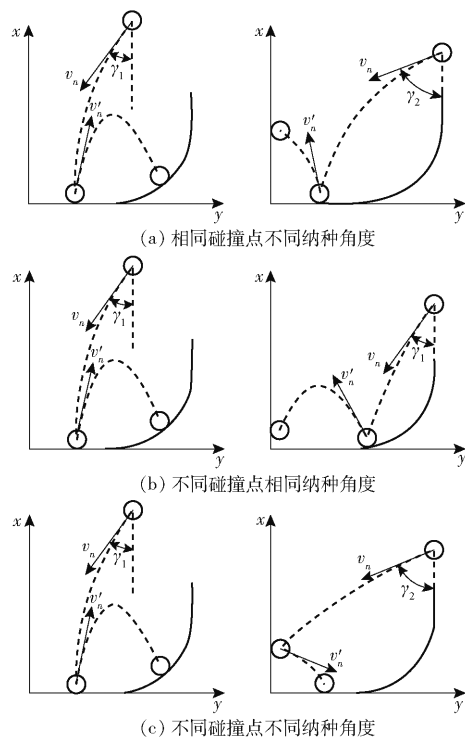


图6 谷子勺内碰撞轨迹

Fig. 6 Diagrams of collision trajectories within grain scoop

综上,得出影响导种装置纳种性能的显著因素分别为链轮转速、纳种高度与纳种角度。

3.2 投种过程

对于导种装置而言,投种情况直接影响种子落地后的成穴性^[19],种子经过导种装置运送至投种点时,在脱离种勺时会受到种子自身重力 G 和离心力 F'_q 的共同作用斜抛脱离种勺,如图7所示。

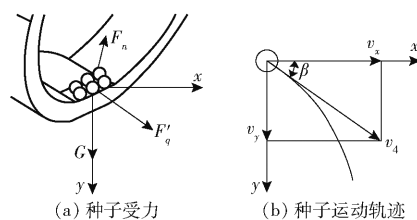


图7 投种种子受力与运动示意图

Fig. 7 Schematics of casting seed force and motion

在投种点时种子离心力 F'_q 与重力 G 可表示为

$$\begin{cases} F'_q = \frac{mv_0^2}{R} \\ G = mg \end{cases} \quad (13)$$

式中 R ——种勺运动半径, m

种子离开种勺时加速度 a_2 为

$$a_2 = \frac{F_z}{m} \quad (14)$$

式中 F_z ——种子在投种点时重力与离心力的合力, N

种子在做斜抛运动时,在 x 、 y 方向速度分别为

$$\begin{cases} v_x = v_4 \cos \beta \\ v_y = v_4 \sin \beta + g t_2 \\ v_4 = 2 \pi R n_2 \end{cases} \quad (15)$$

其中
式
中
 v_x ——种子在 x 轴方向速度, m/s
 v_y ——种子在 y 轴方向速度, m/s
 n_2 ——种勺转速, r/min
 v_4 ——种子斜下抛初速度, m/s
 β ——种子斜下抛角度, ($^{\circ}$)
 t_2 ——种子进入种沟所用时间, s
将 v_4 代入公式(15)可得

$$\begin{cases} v_x = 2 \pi R n_2 \cos \beta \\ v_y = 2 \pi R n_2 \sin \beta + F_z t_2 / m \end{cases} \quad (16)$$

根据公式(16)可知,种子离开种勺的速度与种勺转速有关。种子速度过大会导致与种沟的碰撞情况加重,与种沟冲击越大,严重时导致种子弹出种沟,造成漏播现象。
当种子在投种点被投送时,种子落地后的速度受投种高度的影响,其过程与纳种环节纳种高度对种子的影响原理相似,若投种过高,种子与种沟接触时速度过大,落地后发生弹跳现象,导致种子较分散,成穴性差。由此可知,种子落地的速度与种勺转速及投种高度有关。

在投种过程中,对临界状态下的种子进行受力分析,如图 8 所示。以谷子质心为原点,临界条件下^[14]种子不被投出应满足

$$\begin{cases} \sum F_x = mg \cos \theta - F_s - F_1 \sin \delta \leq 0 \\ \sum F_y = -F_n + F_1 \cos \delta + mg \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = m \frac{v^2}{1\,000R} \\ R = \frac{d+L}{2} \end{cases} \quad (18)$$

式中
 F_1 ——转动惯性力, N
 F_s ——种勺对种子产生的摩擦力, N
 F_n ——种勺对种子支持力, N
 δ —— F_1 与 y 轴夹角, ($^{\circ}$)
 θ ——投种角度, ($^{\circ}$)

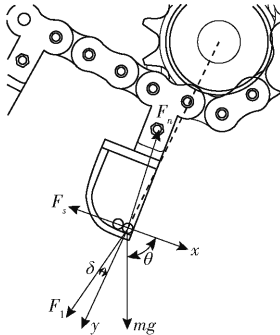


图 8 种子投种临界力学分析

Fig. 8 Critical mechanics analysis of seed casting

联立式(17)、(18)可得

$$\theta \leq \arccos \frac{F_s + m \frac{v^2}{1\,000R} \sin \delta}{F_n + m \frac{v^2}{1\,000R} \cos \delta} \quad (19)$$

公式(19)表明,种子投送在临界条件下与投种角度有关,但不同投种角度对投种性能的影响需通过后续 EDEM 仿真确定。
综上,分析得出影响导种装置投种性能的显著因素分别为链轮转速、投种高度、投种角度。

4 EDEM 离散元仿真

为了更好地验证该导种装置的工作性能,采用 EDEM 软件对其工作过程进行仿真模拟^[20-21]。因链条最大速度不超过 0.55 m/s,链条工作稳定,为提高仿真效率,在仿真过程只对种勺部件进行离散元分析。

4.1 仿真参数确定及模型建立

4.1.1 仿真参数确定

在仿真过程中,谷子会与其他谷子、种勺、土壤接触,其中种勺的材料为 ABS 塑料、橡胶、亚克力。各参数如表 1 所示^[22-23]。

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter settings

项目	参数	数值
谷子	密度/(g·cm ⁻³)	1.20
	剪切模量/MPa	1.46
	泊松比	0.39
ABS	密度/(g·cm ⁻³)	1.05
	剪切模量/MPa	3×10 ³
	泊松比	0.39
橡胶	密度/(g·cm ⁻³)	0.94
	剪切模量/MPa	0.30
	泊松比	0.49
亚克力	密度/(g·cm ⁻³)	1.21
	剪切模量/MPa	1.2×10 ³
	泊松比	0.38
土壤	密度/(g·cm ⁻³)	1.56
	剪切模量/MPa	100
	泊松比	0.22
谷子-谷子	静摩擦因数	0.510
	动摩擦因数	0.021
	碰撞恢复系数	0.300
谷子-ABS	静摩擦因数	0.363
	动摩擦因数	0.032
	碰撞恢复系数	0.460
谷子-橡胶	静摩擦因数	0.344
	动摩擦因数	0.034
	碰撞恢复系数	0.280
谷子-亚克力	静摩擦因数	0.374
	动摩擦因数	0.038
	碰撞恢复系数	0.380
谷子-土壤	静摩擦因数	1.120
	动摩擦因数	0.120
	碰撞恢复系数	0.030

4.1.2 仿真模型建立

本文以“大穗金谷”种子为研究对象,取 1 000 粒种子测量其三轴尺寸(表 2),通过球度公式测量其球度^[24],算得其球度为 82.77%,因其球度较高,可忽略形状对仿真效果的影响,故用直径为 2 mm 的球体代替谷子种子模型,谷子仿真模型如图 9 所示。

表 2 谷子三轴尺寸
Tab.2 Grain triaxial dimensions

参数	平均值	标准差	变异系数
长度	2.3 mm	0.23 mm	10.7%
宽度	2.0 mm	0.20 mm	10.9%
厚度	1.5 mm	0.17 mm	14.6%
球度	82.77%	0.19%	12.8%

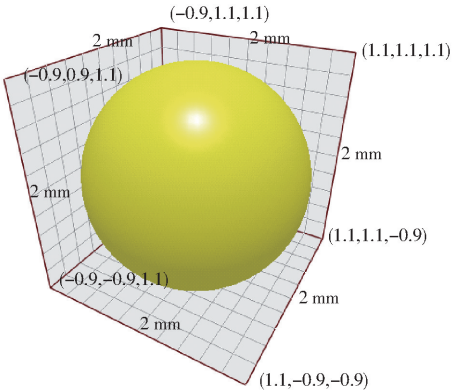


图 9 谷子仿真模型
Fig.9 Grain simulation model

通过 Solidworks 绘图软件建立导种装置模型,简化导种装置模型,并将种勺模型导出 . STL 格式导入 EDEM 软件中,固定种勺数量 12 个,在排种位置按照排种角度生成附加相应初速度种子,并在投种点下方按照投种高度、土壤参数生成平面,模拟土壤,导种装置简化模型如图 10 所示。

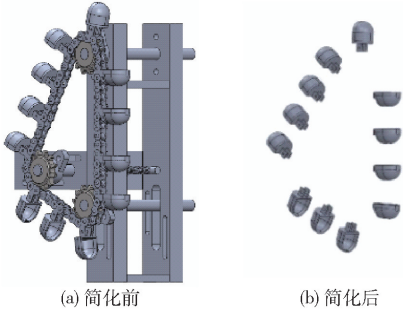


图 10 导种装置三维模型
Fig.10 Three-dimensional model of seed-guiding device

导入 EDEM 仿真模型及土壤简化后模型如图 11 所示。

4.2 评价指标

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》及 DB11/T 459—2007《蔬菜穴播播种机技

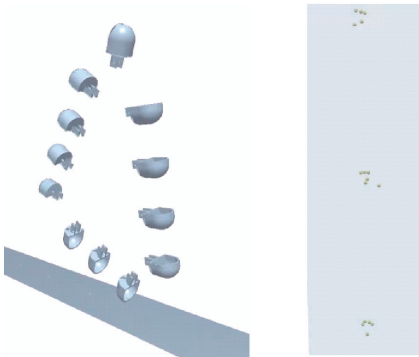


图 11 导种过程仿真模型
Fig.11 Simulation model of seed introduction process

术条件》的要求,选取纳种合格率 S_1 、穴径合格率 S_2 、穴粒数合格率 S_3 、穴距变异系数 S_4 为试验指标。

穴径判别需截取每段仿真种群图像,首先通过 Matlab 对图像进行预处理,包括彩色阈值转换灰度图像,中值滤波法进行背景分割和图像二值化处理。对预处理后的图像进行 Canny 算子边缘提取,对所提取的边缘进行特征点的提取,将所提出点放置于建立的坐标系中,通过凸包算法对所有点进行筛选,筛选掉点集中的内部点,以简化后续的程序运行,通过数学方法对剩余点作最小外接圆处理,对所得圆进行直径测定可得出穴径,对多组图像综合分析可得出穴距等结果,最终对试验结果进行归纳整理可进行成穴性判断^[25-26],图像处理过程如图 12 所示。

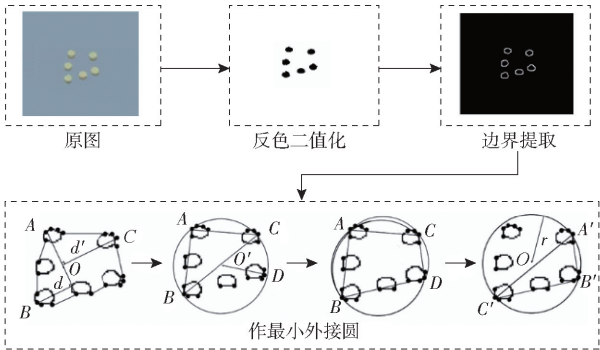


图 12 图像处理过程图
Fig.12 Image processing process diagram

纳种合格率:勺内种子数量等于排种数量为纳种合格,计算公式为

$$S_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \tag{20}$$

式中 n_1 ——纳种合格数量
 N ——试验穴数

穴径合格率:种群最小外接圆小于 5 cm 为穴径合格,计算公式为

$$S_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\% \tag{21}$$

式中 n_2 ——穴径合格穴数

穴粒数合格率:穴内种子数等于勺内种子数量为穴粒数合格,计算公式为

$$S_3 = \frac{n_3}{N} \times 100\%$$
 (22)

式中 n_3 ——穴粒数合格穴数

穴距变异系数计算公式为

$$S_4 = \sqrt{\frac{\sum (a - \bar{a})^2}{(N - 1)\bar{a}^2}} \times 100\%$$
 (23)

式中 a ——穴距,cm

$\bar{a}$ ——平均穴距,cm

4.3 单因素仿真试验

4.3.1 种勺型式

为验证不同种勺型式对种效果的影响,分别以圆形勺、方形勺和方形平嘴勺3种不同型式的种勺进行单因素试验。链轮转速依次设置为1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 r/s 进行试验(所对应作业速度依次为4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 km/h)。各进行3次重复试验,取性能最佳种勺进行后续试验。试验结果如图13所示。

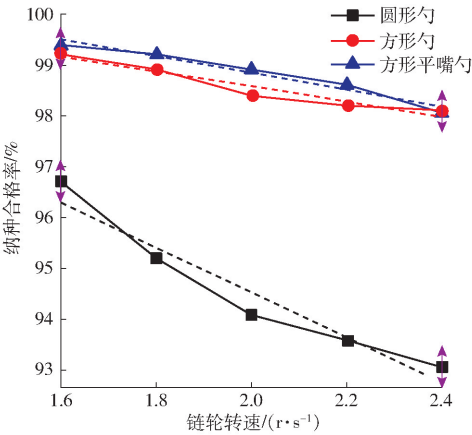


图 13 不同种勺纳种合格率变化曲线

Fig. 13 Variation curves of nanoseed pass rate for different seed spoons

由图13可知,3种种勺的纳种合格率都随着链轮转速的提高呈下降趋势,因圆形勺勺口相对其他两种种勺面积较小,种子弹跳于勺外现象相对其余两类型种勺明显,如图14所示,故选取方形勺和方形平嘴勺进行下一步试验,研究不同种勺对投种效果的影响。

经过SPSS分析,圆形勺、方形勺、方形平嘴勺的作业速度与纳种合格率拟合曲线回归方程分别为 $Y = -4.4X + 103.34$ 、 $Y = -1.45X + 101.46$ 、 $Y = -1.65X + 102.13$, 决定系数 R^2 分别为0.938、0.924、0.965, R 显著性水平均小于0.05, 方程系数显著性水平均小于0.05, 回归显著。

由仿真试验可得出,方形平嘴勺投种效果远优

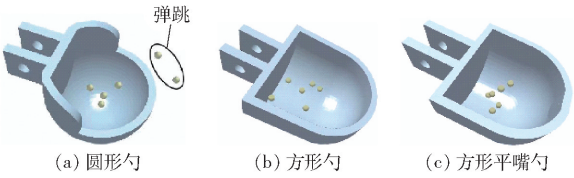


图 14 不同型式种勺纳种情况

Fig. 14 Various types of seed spoons incorporation of seeds

于方形勺,因方形勺前方为圆形,谷子会从勺前顶点依次排出,条播现象明显,种子分散,不满足成穴性要求;而方形平嘴勺前端为一平面,且尺寸满足勺内6粒种子排出时分布要求,故可得出结论,方形平嘴勺性能最佳,采用方形平嘴勺进行后续试验。种子在方形勺与方形平嘴勺排出情况如图15所示。

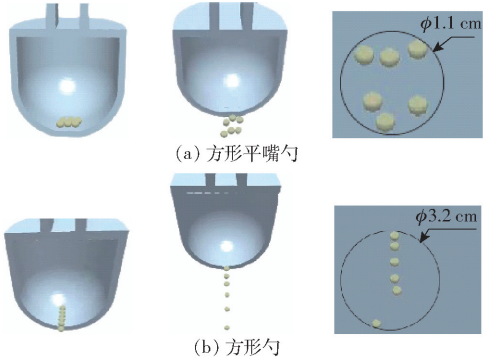


图 15 方形勺与方形平嘴勺投种种子分布对比图

Fig. 15 Comparisons of seed distribution between a square spoon and a square flat-billed spoon casting seeds

4.3.2 种勺材料

为验证不同种勺材料对纳种效果的影响,分别以ABS材料、橡胶材料和亚克力材料的种勺进行单因素仿真对比试验。各进行3次重复试验,取平均值,试验中以纳种合格率为试验指标。试验结果如图16所示。

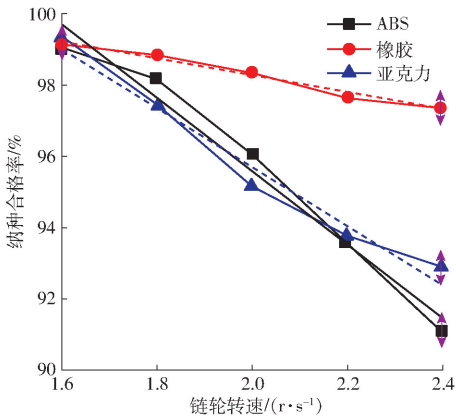


图 16 不同材料纳种合格率变化曲线

Fig. 16 Variation curves of incorporation seed pass rate for different materials

由图16可知,当前进速度低时,不同材料对纳种效果的影响不显著,当链轮转速大于1.8 r/s 时,橡胶材料种勺纳种效果明显优于ABS材料和亚克力材料。

力材料,弹跳情况如图 17 所示。证明种勾选用橡胶材料可提高导种装置的纳种性能。



图 17 不同材料种子弹跳情况

Fig. 17 Seed bouncing for different materials

经过 SPSS 分析,ABS、橡胶、亚克力材料种勾的作业速度与纳种合格率拟合曲线回归方程分别为 $Y = -10.3X + 116.22$ 、 $Y = -2.4X + 103.12$ 、 $Y = -8.35X + 112.46$, 决定系数 R^2 分别为 0.975、0.981、0.974, R 显著性水平均小于 0.05, 方程系数显著性水平均小于 0.05, 回归显著。

4.4 多因素试验

为研究使用最佳种勾材料后的纳种稳定性和投种准确性,采用 2 组三因素五水平正交旋转组合试验^[26]分别研究导种装置纳种和投种过程最佳作业参数组合。

4.4.1 纳种过程

4.4.1.1 试验设计

以纳种角度、纳种高度和链轮转速为试验因素,进行三因素五水平二次回归正交旋转组合试验。选取纳种角度为 30°~50°,纳种高度为 70~90 mm,链轮转速为 1.6~2.4 r/s,纳种合格率为指标,试验编码如表 3 所示。

表 3 纳种过程试验因素编码

Tab.3 Factor coding for nano seeding process test

编码	因素		
	纳种角度/	纳种高度/	链轮转速/
	(°)	mm	(r·s ⁻¹)
1.682	50	90	2.4
1	45.946	85.946	2.237
0	40	80	2.0
-1	34.054	74.054	1.763
-1.682	30	70	1.6

4.4.1.2 结果与分析

选取试验指标为纳种合格率 Q_1 ,纳种角度、纳种高度及链轮转速为影响因素,正交试验设计与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

4.4.1.3 回归模型建立与显著性检验

对试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示。通过 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行回归分析,筛选出较为显著影响因素,进而得到性能指标与因素编码值回归方程

$$Q_1 = 96.75 + 0.5501X_1 - 0.2160X_2 - 0.2230X_3 - 0.4375X_1X_3 + 0.6107X_1^2 + 0.3880X_3^2 \quad (24)$$

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and results

序号	因素			纳种合格率 $Q_1/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	97.73
2	1	-1	-1	99.41
3	-1	1	-1	96.91
4	1	1	-1	98.76
5	-1	-1	1	97.93
6	1	-1	1	98.13
7	-1	1	1	97.40
8	1	1	1	97.23
9	-1.682	0	0	97.31
10	1.682	0	0	99.66
11	0	-1.682	0	97.31
12	0	1.682	0	97.28
13	0	0	-1.682	98.13
14	0	0	1.682	97.58
15	0	0	0	96.45
16	0	0	0	97.53
17	0	0	0	96.97
18	0	0	0	96.48
19	0	0	0	96.84
20	0	0	0	96.55
21	0	0	0	96.59
22	0	0	0	96.50
23	0	0	0	96.86

表 5 纳种过程方差分析

Tab.5 Analysis of variance of seeding process

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	15.79	9	1.75	13.68	<0.0001**
X_1	4.13	1	4.13	32.24	<0.0001**
X_2	0.64	1	0.64	4.97	0.0440*
X_3	0.68	1	0.68	5.30	0.0386*
X_1X_2	0.005	1	0.005	0.04	0.8465
X_1X_3	1.53	1	1.53	11.95	0.0043**
X_2X_3	0.002	1	0.0002	0.002	0.9691
X_1^2	5.93	1	5.93	46.24	<0.0001**
X_2^2	0.57	1	0.57	4.48	0.0543
X_3^2	2.39	1	2.39	18.66	0.0008**
残差	1.67	13	0.13		
失拟	0.70	5	0.14	1.15	0.1431
误差	0.97	8	0.12		
总和	17.45	22			

注: * 表示差异显著 (0.01 < P < 0.05), ** 表示差异极显著 (P < 0.01)。下同。

通过对公式(24)回归系数的检验得知,影响纳种合格率的因素主次顺序为纳种角度、链轮转速、纳种高度。

为了更直观地分析各指标与因素的关系,使用 Design-Expert 13.0 软件得到其响应曲面。纳种角

度和链轮转速的交互作用对试验性能指标影响的响应曲面如图 18 所示。

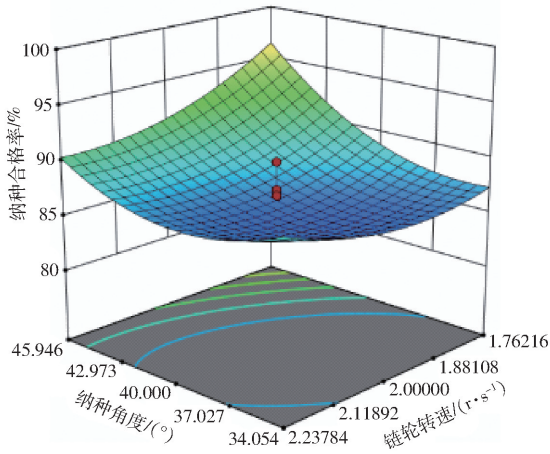


图 18 纳种角度和链轮转速对纳种合格率影响的响应曲面

Fig. 18 Response surface of effect of seed napping angle and sprocket speed on seed napping pass rate

由图 18 可知,纳种合格率随投种角度和链轮转速的增大皆呈先降低后升高趋势;分析其变化原因:纳种角度较小时,种勺前端控制种子向外弹跳可能性较大,纳种角度较大时,种子进入种勺后滑梯轨迹较长,摩擦较大,在勺内较稳定,故纳种合格率随投种角度的增大皆呈先降低后升高趋势;链轮转速较小时,种子相应初速度较小,与种勺碰撞较轻,链轮转速较大时,种子初速度较大,但与种勺运动速度差相对较小,二者接触时弹跳不明显,故纳种合格率随链轮转速的增大呈先降低后升高趋势。

在此基础上,为得到试验因素最佳水平,即导种装置纳种过程最佳工作参数组合,对试验进行优化设计。建立参数优化数学模型,结合试验因素的边界条件,对纳种合格率回归方程进行分析,得到其非线性规划优化模型为

$$\begin{cases} \max Q_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

通过优化求解得出当投种角度为 45.95°、纳种高度为 74.05 mm、链轮转速为 1.76 r/s 时,导种装置性能最佳,在此参数组合下,对应的纳种合格率为 99.40%。

4.4.2 投种过程

4.4.2.1 试验设计与结果

在纳种环节确定最佳参数组合之后,为进一步研究导种装置的导种性能,采用最佳纳种条件,对投种效果进行试验分析,选取投种角度为 40°~60°、投种高度为 20~40 mm、链轮转速为 1.6~2.4 r/s,

选取试验指标为穴径合格率、穴粒数合格率及穴距变异系数。试验因素编码和试验设计与结果如表 6、7 所示, X_4 、 X_5 为因素编码值。

表 6 投种过程试验因素编码

Tab. 6 Coding of test factors for seeding process

编码	因素		
	投种角度/ (°)	投种高度/ mm	链轮转速/ (r·s ⁻¹)
1.682	60	40	2.4
1	55.946	35.946	2.237
0	50	30	2.0
-1	44.054	24.054	1.763
-1.682	40	20	1.6

表 7 投种过程试验方案与结果

Tab. 7 Test scheme and results of seeding process

序号	因素			穴径 合格率	穴粒数 合格率	穴距变 异系数
	X_4	X_5	X_3	$Q_2/\%$	$Q_3/\%$	$Q_4/\%$
1	-1	-1	-1	95.21	92.74	13.60
2	1	-1	-1	96.32	95.07	2.62
3	-1	1	-1	93.31	91.87	15.94
4	1	1	-1	94.52	91.09	11.44
5	-1	-1	1	94.17	93.89	11.58
6	1	-1	1	95.64	97.14	4.74
7	-1	1	1	94.12	91.53	17.30
8	1	1	1	94.91	92.77	15.82
9	-1.682	0	0	94.80	91.79	15.42
10	1.682	0	0	96.61	92.87	4.32
11	0	-1.682	0	95.45	98.06	5.86
12	0	1.682	0	93.40	91.53	17.88
13	0	0	-1.682	96.01	94.80	8.02
14	0	0	1.682	93.53	97.30	11.00
15	0	0	0	97.26	98.30	9.36
16	0	0	0	97.13	98.15	9.68
17	0	0	0	96.65	97.19	9.00
18	0	0	0	97.54	98.61	8.68
19	0	0	0	97.02	98.92	5.28
20	0	0	0	97.30	99.35	7.00
21	0	0	0	96.61	98.13	9.06
22	0	0	0	97.53	99.71	6.20
23	0	0	0	97.64	99.47	7.20

4.4.2.2 回归模型建立与显著性检验

对试验结果进行方差分析,结果如表 8 所示。通过 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行回归分析,筛选出较为显著影响因素,进而得到性能指标与因素编码值回归方程

$$Q_2 = 97.19 + 0.5583X_4 - 0.5805X_5 - 0.3435X_3 + 0.3650X_5X_3 - 0.5357X_4^2 - 0.9882X_5^2 - 0.8660X_3^2 \quad (26)$$

表 8 投种过程方差分析

Tab. 8 Seeding process analysis of variance						
评价 指标	方差 来源	平方和	自由 度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
穴径合 格率	模型	43. 18	9	4. 80	22. 98	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₄	4. 26	1	4. 26	20. 39	0. 000 6 **
	<i>X</i> ₅	4. 60	1	4. 60	22. 04	0. 000 4 **
	<i>X</i> ₃	4. 61	1	1. 61	7. 72	0. 015 7 *
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₅	0. 04	1	0. 04	0. 20	0. 661 0
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₃	0. 000 4	1	0. 000 4	0. 002 2	0. 963 7
	<i>X</i> ₅ <i>X</i> ₃	1. 07	1	1. 07	5. 1	0. 041 7 *
	<i>X</i> ₄ ²	4. 56	1	4. 56	21. 84	0. 004 **
	<i>X</i> ₅ ²	15. 52	1	15. 52	74. 32	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₃ ²	11. 92	1	11. 92	57. 11	<0. 000 1 **
	残差	2. 71	13	0. 21		
	失拟	1. 60	5	0. 32	2. 28	0. 143 1
	误差	1. 12	8	0. 14		
穴粒数 合格率	总和	45. 89	22			
	模型	200. 1	9	22. 23	31. 27	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₄	4. 52	1	4. 52	6. 36	0. 025 5 *
	<i>X</i> ₅	37. 27	1	37. 27	52. 43	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₃	5. 62	1	5. 62	7. 91	0. 014 7 *
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₅	3. 28	1	3. 28	4. 61	0. 051 2
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₃	1. 08	1	1. 08	1. 52	0. 239 5
	<i>X</i> ₅ <i>X</i> ₃	0. 44	1	0. 44	0. 62	0. 444 7
	<i>X</i> ₄ ²	92. 61	1	92. 61	13. 27	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₅ ²	37. 82	1	37. 82	53. 20	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₃ ²	19. 19	1	19. 19	27. 00	0. 000 2 **
	残差	9. 24	13	0. 71		
	失拟	4. 11	5	0. 82	1. 28	0. 359 5
穴距变 异系数	误差	5. 13	8	0. 64		
	总和	209. 34	22			
	模型	402. 87	9	44. 76	39. 10	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₄	138. 35	1	138. 35	120. 86	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₅	177. 07	1	177. 07	154. 67	<0. 000 1 **
	<i>X</i> ₃	7. 11	1	7. 11	6. 21	0. 027 0 *
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₅	20. 61	1	20. 61	18. 00	0. 001 0 **
	<i>X</i> ₄ <i>X</i> ₃	4. 74	1	4. 74	4. 14	0. 062 7
	<i>X</i> ₅ <i>X</i> ₃	5. 51	1	5. 51	4. 81	0. 047 0 *
	<i>X</i> ₄ ²	9. 26	1	9. 26	8. 09	0. 013 8 *
	<i>X</i> ₅ ²	34. 35	1	34. 35	30. 01	0. 000 1 **
	<i>X</i> ₃ ²	6. 43	1	6. 43	5. 61	0. 034 0 *
	残差	14. 88	13	1. 14		
	失拟	3. 34	5	0. 67	0. 46	0. 794 3
	误差	11. 54	8	1. 44		
	总和	417. 75	22			

影响穴径合格率的因素主次顺序为投种高度、投种角度、链轮转速;影响穴粒数合格率的因素主次顺序为投种高度、链轮转速、投种角度;影响穴距变异系数的因素主次顺序为投种高度、投种角度、链轮转速。

为了更直观地分析各指标与因素的关系,使用 Design-Expert 13. 0 软件得到其响应曲面。因投种高度和链轮转速交互作用对穴径合格率影响显著、投种角度和链轮转速对穴距变异系数影响较显著,故分别分析两组交互作用对试验性能指标的影响,响应曲面如图 19 所示。

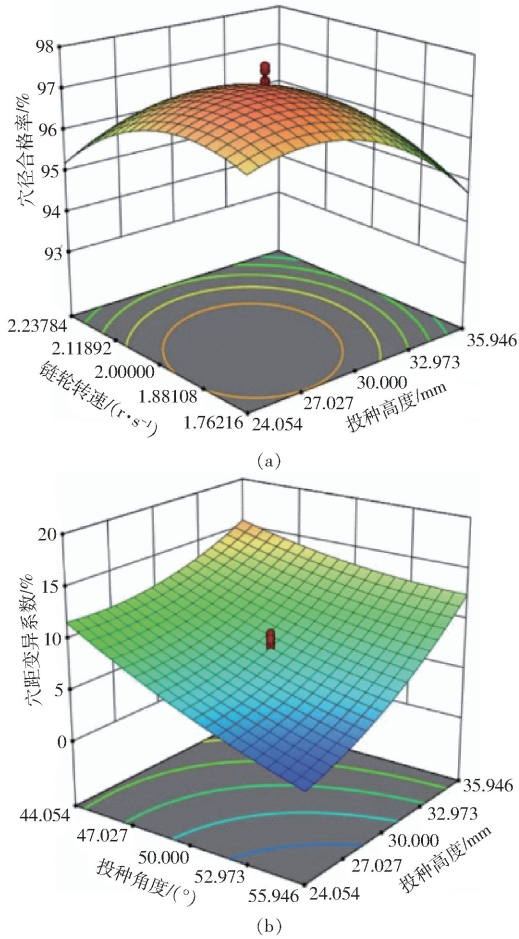


图 19 因素交互作用对投种合格率影响的响应曲面
Fig. 19 Response surfaces for effect of factor interactions on seeding pass rate

由图 19a 可知,穴径合格率随链轮转速和投种高度增大呈先上升后下降趋势;由图 19b 可知,穴距变异系数随投种角度的增大呈下降趋势,随投种高度的增大呈上升趋势。分析其变化原因:链轮转速较低时,种群离开种匀相对间隔时间较长,链轮转速较大时,种子离开种匀时初速度较大,与地面碰撞现象严重;投种高度较小时,种子落地后受种匀运动影响较大,滚动现象较明显,投种高度较大时,种子落地后弹跳较明显,故穴径合格率随链轮转速和投种

$$Q_3 = 98. 67 + 0. 574 7X_4 - 1. 65X_5 + 0. 641 8X_3 - 2. 41X_4^2 - 1. 54X_5^2 - 1. 10X_3^2 \quad (27)$$

$$Q_4 = 7. 92 - 3. 11X_4 + 3. 53X_5 + 0. 794 6X_3 + 1. 48X_4X_5 + 0. 705 0X_5X_3 + 0. 902 8X_4^2 + 1. 61X_5^2 + 0. 775 5X_3^2 \quad (28)$$

通过对公式(26) ~ (28) 回归系数的检验得知,

高度增大呈先上升后下降趋势。投种角度较小时,种子不易被投出,投种高度较大时,落地后弹跳较明显,故穴距变异系数随投种角度的增大呈下降趋势,随投种高度的增大呈上升趋势。

为得到试验因素最佳水平,即导种装置投种过程最佳工作参数组合,对试验进行优化设计。建立参数优化数学模型,结合试验因素的边界条件,对穴径合格率、穴粒数合格率和穴距变异系数回归方程进行分析,得到其非线性规划优化模型为

$$\begin{cases} \max Q_2(X_4, X_5, X_3) \\ \max Q_3(X_4, X_5, X_3) \\ \min Q_4(X_4, X_5, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_4 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_5 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

通过优化求解得出当投种角度为 53.51°、投种高度为 25.96 mm、链轮转速为 1.98 r/s 时,导种装置性能最佳,在此参数组合下,对应的穴径合格率为 97.34%,穴粒数合格率为 98.75%,穴距变异系数为 4.19%。

5 验证试验

为验证导种装置最佳参数组合的可靠性,采用 3D 打印技术获得导种装置,试验地点为黑龙江八一农垦大学播种实验室,试验装置主要由 JPS-16 型计算机视觉排种器试验台、pco. dimax cs3 型高速摄像机(pco. dimax cs 高速摄像机、Nikon 镜头,德国;图像拍摄程序为 Camware,图像处理程序为 TEMA)、正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器、谷子穴播勺链式导种装置以及 PC 计算机(惠普公司,美国)等搭建组成,如图 20 所示。



图 20 导种装置性能检测试验台

Fig. 20 Seed guide performance testing test bench

因纳种与投种过程为一个传动系统,且两过程性能最佳转速相似,故取二者转速中间值进行试验。试验前将工作参数设置为链轮转速 1.9 r/s、纳种角度 46°、纳种高度 74 mm、投种角度 54°、投种高度 26 mm。利用高速摄像技术观察纳种情况,对纳种结果进行验证。在该参数下进行 3 次台架验证

试验,取平均值为验证试验结果。试验结果如表 9 所示。

表 9 验证试验结果

Tab. 9 Validation test results				%
试验序号	纳种合格率 Q_1	穴径合格率 Q_2	穴粒数合格率 Q_3	穴距变异系数 Q_4
1	95.26	92.73	95.17	6.36
2	94.79	93.15	94.64	8.04
3	96.53	93.99	94.38	7.98
平均值	95.53	93.29	94.73	7.46

试验结果表明,在最佳参数组合下,导种装置纳种合格率为 95.53%、穴径合格率为 93.29%、穴粒数合格率为 94.73%、穴距变异系数为 7.46%,导种装置台架验证试验结果与仿真试验结果差值均小于 5%,满足要求,表明该装置适于谷子穴播导种。

6 台架对比试验

为进一步验证勺链式导种装置的实际导种性能,将排种器安装普通导种管与勺链式导种装置进行台架试验对比^[27]。设置链轮转速分别为 1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 r/s,纳种与投种过程采用仿真试验得出的最佳参数,试验指标为穴径合格率、穴粒数合格率及穴距变异系数,每组进行 3 次,取平均值,试验方法同上,试验结果如表 10 所示。

表 10 有无导种装置时试验结果

Tab. 10 Test results with and without seed guide							%
链轮转速/ (r·s ⁻¹)	勺链式导种装置			导种管			
	穴径合格率	穴粒数合格率	穴径变异系数	穴径合格率	穴粒数合格率	穴径变异系数	
1.6	95.93	94.56	7.76	93.18	93.22	8.83	
1.8	94.76	95.84	8.03	92.72	94.04	9.77	
2.0	94.15	94.60	8.94	92.37	93.45	10.51	
2.2	93.26	95.42	7.57	91.34	92.74	10.36	
2.4	93.03	94.58	8.68	90.84	91.15	11.93	

由表 10 可知,安装勺链式导种装置的排种器在链轮转速 1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 r/s 下相对安装导种管,穴径合格率分别提高 2.75、2.04、1.78、1.92、2.19 个百分点,穴粒数合格率分别提高 1.34、1.80、1.15、2.68、3.43 个百分点,穴距变异系数分别提高 1.07、1.74、1.57、2.79、3.25 个百分点。由此可见,加有勺链式导种装置时的播种效果显著优于安装导种管的播种效果。

7 结论

(1) 针对谷子在导种管内弹跳严重,落地后分

布不均,严重影响谷子成穴性,设计了谷子穴播机勺链式导种装置,并对关键零部件进行了设计,确定了种勺长度 L 、宽度 W 、深度 D 分别为 26、26、13 mm。分析了纳种和投种过程运动情况,并确定了影响导种性能的关键因素。

(2)为获取最佳参数组合,进行仿真模拟试验。其中单因素仿真试验结果表明,种勺类型为方形平嘴勺、种勺材料为橡胶时,种勺性能最佳。多因素仿真试验结果表明,在纳种过程,最佳参数组合为纳种角度 45.95° 、纳种高度 74.05 mm、链轮转速 1.76 r/s;在

投种过程中,最佳参数组合为投种角度 53.51° 、投种高度 25.96 mm、链轮转速 1.98 r/s。

(3)结合纳种与投种最佳参数组合,转速取二者中值进行台架验证试验与台架对比试验。台架验证试验结果表明,在最佳参数组合下与仿真试验结果基本一致,相对差值均小于 5%,满足要求;台架对比试验表明,在不同作业速度下,安装勺链式导种装置相对于安装导种管的穴径合格率、穴粒数合格率、穴距变异系数最大可提高 2.75、3.43、3.25 个百分点,表明该导种装置适于谷子穴播。

参 考 文 献

[1] 王节之,郝晓芬,王根全,等. 化控间苗谷种栽培技术研究[J]. 河北农业科学,2010,14(11):15-18.
WANG Jiezhi, HAO Xiaofen, WANG Genquan, et al. Study on the cultivation technique of millet seedlings thinning out by chemical control[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2010,14(11):15-18. (in Chinese)

[2] 侯华铭,崔清亮,张燕青,等. 2BZ-2 型谷子精少量播种机的研制[J]. 农业工程学报,2017,33(13):16-22.
HOU Huaming, CUI Qingliang, ZHANG Yanqing, et al. Development of 2BZ-2 type fine and small-amount seeder for foxtail millet[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(13):16-22. (in Chinese)

[3] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):83-94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):83-94. (in Chinese)

[4] 瑞典 Vaderstad 公司介绍[EB/OL]. [2024-03-01]. <http://www.vaderstad.com/en/Planting/tempoplanter/tempor-12-18/#zone-4777>.

[5] SAUDER G A, DILL K R, DUNLAP D L. Apparatus and method for controlled delivery of seeds to an open furrow: U. S. Patent 6,681,706[P]. 2004-01-27.

[6] 陈学庚,钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):8-15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22):8-15. (in Chinese)

[7] 刘立晶,杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报,2015,31(11):40-45.
LIU Lijing, YANG Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11):40-45. (in Chinese)

[8] 李辉,赵武云,石林榕,等. 舀种勺舌式胡麻精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):85-95.
LI Hui, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and test of seed ladle tongue type flax precision burrow planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):85-95. (in Chinese)

[9] 苏微,陈子威,赖庆辉,等. 轮勺式半夏精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):60-71.
SU Wei, CHEN Ziwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):60-71. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 陈涛. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
CHEN Tao. Design and experimental study of millet hill-seeder with positive and negative air pressure and type hole wheel combination[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023. (in Chinese)

[13] 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 Xiyong, 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)

[14] 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)
- [15] 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. Optimal design and experiment of integrated fan of air suction potato planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):80–90. (in Chinese)
- [16] 孟繁忠,叶斌. 链传动技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [17] 廖宜涛,孙迈,廖庆喜,等. 油菜精量播种导种环节种子流有序性分析[J]. 农业工程学报,2023,39(23):23–35.
LIAO Yitao, SUN Mai, LIAO Qingxi, et al. Ordering of seed flow in seed guiding of precision sowing for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(23):23–35. (in Chinese)
- [18] 贾昕宇,衣淑娟,张吉军,等. 基于高速摄像技术的梗稻脱粒与分离运动轨迹及速度变化的分析[J]. 南方农机,2022,53(5):1–4.
JIA Xinyu, YI Shujuan, ZHANG Jijun, et al. The analysis of trajectory and velocity change for japonica rice in the threshing and separation movement based on high-speed camera technology[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022,53(5):1–4. (in Chinese)
- [19] 王伟伟,宋岚洲,石文兵,等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):53–63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(3):53–63. (in Chinese)
- [20] 张学军,程金鹏,史增录,等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):38–50.
ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing-clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(4):38–50. (in Chinese)
- [21] 任定林,刘涛,夏守浩,等. 玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):73–89.
REN Dinglin, LIU Tao, XIA Shouhao, et al. Design and seed filling performance test of cavity plate combination hole type seeding plate for corn and soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):73–89. (in Chinese)
- [22] 李渤海,张东明,李衣菲,等. 谷子谷穗建模与仿真试验研究[J]. 农机化研究,2022,44(3):153–158.
LI Bohai, ZHANG Dongming, LI Yifei, et al. Modeling of millet ear and experimental study on simulated threshing separation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(3):153–158. (in Chinese)
- [23] 李衣菲,衣淑娟,孙志江,等. 窝眼式谷子穴播排种器充种性能研究[J]. 农机化研究,2021,43(11):57–63.
LI Yifei, YI Shujuan, SUN Zhijiang, et al. Study on the filling performance of the seed-filling device of socket-roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(11):57–63. (in Chinese)
- [24] 尹文庆,赵璐,李骅,等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):68–76,136.
YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):68–76,136. (in Chinese)
- [25] 夏希林. 图像滤波去噪及边缘检测技术研究与实验分析[D]. 长春:吉林大学,2022.
XIA Xilin. Research and experimental analysis of image filtering denoising and edge detection technology[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
- [26] 周剑平. 基于 MATLAB 的圆度评定方法[J]. 计量与测试技术,2005(2):5–7.
ZHOU Jianping. The method of roundness assessment based on MATLAB[J]. Metrology & Measurement Technique,2005(2):5–7. (in Chinese)
- [27] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008.