doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.021

往复辊式巨菌草精量排种器设计与试验

张建超[1]　孙远泽[1]　郁志宏[1]　李钢铁[2]

(1.内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010011)

摘要:为实现巨菌草种茎有序排种,提升播种效率和精度,防止种芽损伤,设计了一种往复辊式巨菌草精量排种器,由往复式送种机构、辊式排种器机构和导种部件组成。根据西北地区巨菌草种茎的物理特性和种茎埋栽种植农艺要求,对送种装置的送种、排种和出种过程进行理论分析,确定了关键部件结构及参数。采用 EDEM 法对排种器的工作过程进行仿真,分析种茎的受力及运动,确定种茎在送种阶段无损伤;以重充率、堵塞率和株距合格率为试验指标,设计二次回归正交旋转组合仿真试验,确定排种辊最佳结构参数组合为:凹槽深度 16 mm、凹槽宽度 24 mm、表面间距 7 mm;出种口较优结构参数为:侧板倾角 45°、开口宽度 45 mm、开口长度 30 mm;为确定排种器最佳作业参数,以株距合格率和株距变异系数为试验因素,进行二次回归正交旋转组合台架试验。试验结果表明,当排种辊转速为 11.57 r/min、出种口与地面相距高度为 191.56 mm、导种板倾斜角度为 35.77°时,株距合格率达到 96.4%,株距变异系数为 9.98%,排种器工作性能满足巨菌草种植农艺要求。

关键词:巨菌草种茎;排种器;往复辊式;参数优化

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0235-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Reciprocating Roller Precision Seed Stem Metering for Giant Juncao

ZHANG Jianchao[1]　SUN Yuanze[1]　YU Zhihong[1]　LI Gangtie[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*
2. *College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010011, *China*)

Abstract: Aiming to achieve orderly seeding of giant Juncao seed stems, enhance seeding efficiency and accuracy, and prevent damage to seed buds, a reciprocating roller precision seed dispenser for giant Juncao seed was designed. This device consisted of a reciprocating seed feeding mechanism, a roller seed dispensing mechanism, and seed guiding components. Based on the physical characteristics of giant Juncao seed stems in the Northwest region and the agronomic requirements for planting the stems, theoretical analyses were conducted on the processes of seed feeding, dispensing, and output of the device to determine the structures and parameters of key components. The working process of the seed dispenser was simulated by using the EDEM method to analyze the forces and motions acting on the stems, confirming that no damage occurred during the seed feeding phase. Using seed filling rate, clogging rate, and qualified planting distance as experimental indicators, a second-order regression orthogonal rotary combination simulation experiment was designed. The optimal structural parameter combination for the seed dispensing roller was determined to be: groove depth of 16 mm, groove width of 24 mm, and surface spacing of 7 mm. The optimal structural parameters for the seed output port were as follows: side plate inclination angle of 45°, opening width of 45 mm, and opening length of 30 mm. To determine the best operational parameters for the seed dispenser, the qualified planting distance rate and the variation coefficient of planting distance were used as experimental factors in a second-order regression orthogonal rotary combination test. The results showed that when the rotation speed of the seed dispensing roller was 11.57 r/min, the height from the seed discharge port to the ground was 191.56 mm, and the

收稿日期:2025-06-26　修回日期:2025-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52265035、32560833)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2025LHMS03020)

作者简介:张建超(1982—),男,副教授,博士生,主要从事农业装备设计和牧草饲料化利用研究,E-mail:zhangjianchao@imau.edu.cn

通信作者:郁志宏(1966—),女,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:yzhyqyzhyq@126.com

inclination angle was 35.77°, the qualified planting distance rate reached 96.4%, with a variation coefficient of 9.98%. The working performance of the seed dispenser met the agronomic requirements for giant reed planting.

Key words: seed stem of giant Juncao; seed dispenser; reciprocating roller; parameter optimization

0 引言

巨菌草隶属禾本科狼尾草属,为多年生植物。其生长速度快、营养价值高、抗逆性强,在饲料应用、生物质能源开发、改善土壤理化性质等方面也展现出巨大的发展潜力[1]。巨菌草种植作为生产中劳动强度最大的环节之一,其机械化播种技术有待进一步开发。巨菌草茎节扦插种植主要有短茎埋栽、直立扦插和斜向扦插 3 种方式[2],预切种式巨菌草精准埋栽种植是现阶段的研究方向之一,该种植技术具有发芽率高、种植灵活性高的优点,可以通过精准管理土壤水分和肥料,提高作物产量。

目前,我国预切种式巨菌草埋栽种植机尚处于研究阶段,技术尚未成熟;针对巨菌草排种、种植,赵芳伟等[3]采用滑轨机构排种设计了 2CJQ-1 型预切种式巨菌草种植机排种器;郑书河等[4]设计了一种槽型辊式巨菌草排种器;刘浪等[5]进行了巨菌草排种器排种过程动力学仿真分析及试验研究;江苏南通富来威公司研制的 2CZX-3 型悬挂式巨菌草种植机采用整株喂苗实时切断种植;2ZLP-3 型预切式菌草种植机能满足种苗在土中水平栽、斜栽。上述研究可一定程度上实现自动排种,但是针对巨菌草种茎的本征参数研究不全面,排种器结构设计缺少理论支撑,目前的生产工艺成本高,排种精度低,容易造成堵塞、损伤种节。国内外预切种式种茎种植机上的排种装置多采用辊式、输送带式、链传动式机构;苏微等[6]设计了预切种甘蔗勺链式排种器,通过最速降线提高充种性能;钟家勤等[7]设计了一种具有清种补种功能的上提式甘蔗排种器,增加弹性板减小蔗段回流的运动空间和运动行程,实现实时补种;李尚平等[8]设计了一种宿根蔗补种机均匀排种控制系统,研究了辊耙角速度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量、理蔗压板活动角对排种均匀度的影响规律;WANG 等[9]设计了一种耙条链单芽甘蔗排种器,分析耙杆链倾角、穴盘数及其交互作用对充种率的影响。LIU 等[10]分析甘蔗单芽种子物理特性结合田间种植农艺要求,设计了圆盘式甘蔗单芽排种器,研究机器推进速度、圆盘排种槽数和圆盘转速。KHWANTRI 等[11]设计倾斜边缘夹板,缩短到输送带宽度的 1/4,并以左右交替方式对齐,提升了甘蔗种段种植精度;何冯光等[12]建立了木薯种茎充种的动力学模型,设计了外槽轮式单段木薯种茎排种器。刘俊安等[13]设计了一种柔性输送带-胶辊组合式皇竹草种茎排序输送排种装置,重点研究输送带倾斜角和充种胶辊-清种胶辊间距。上述研究可在一定程度上为巨菌草排种器设计提供参考,但是基于巨菌草种茎结构特征和力学特性的排种器设计需要进一步展开研究。

播种效率和精度低、种茎易损是实现巨菌草机械化精确播种的关键问题[14-15]。本文设计一款预切种式巨菌草排种器,采用往复式送种机构和辊式排种机构两级排种,进行巨菌草种茎本征参数研究,运用离散元软件 EDEM 模拟排种器的排种过程,分析排种过程中种茎的运动特性,优化排种器关键部件,实现种茎依次有序、精准排种,为巨菌草机械化精确播种提供参考。

1 排种器结构与工作原理

1.1 巨菌草种茎尺寸确定

材料来自内蒙古农业大学试验田,11 月采集的半年生巨菌草,用于巨菌草种茎的制备。种茎组织结构上主要涵盖了种节、节间以及芽(幼芽)3 个关键部分,其中,种节部位呈现相对突起的形态特征,而幼芽则生于种节之上,种茎的截面形状近似椭圆形,如图 1 所示。



图 1 巨菌草种茎

Fig. 1 Giant Juncao seed stems

随机选取具有代表性的 100 根样本,使用游标卡尺测量可知种茎长度为 130 ~ 150 mm,种节截面椭圆的长轴长度为 16 ~ 22 mm,短轴长度为 14 ~ 20 mm。

1.2 整体结构与工作原理

图 2 所示辊式排种器主要由送种区、预排种区、排种区 3 部分构成。在送种区,电机驱动中心式曲

柄滑块机构，借助往复运动特性将内种箱中种茎有序排列，精准地逐个落入下种箱的预排种槽内；种茎受重力作用进入排种辊凹槽并随排种辊转动，地轮驱动双辊交错排种，交替将种茎送入导种板，最后经导种板引导进入种沟，实现精准播种作业。

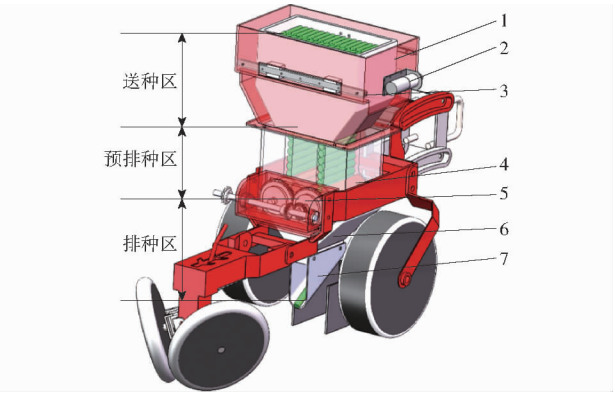


图 2　两级辊式排种器结构图

Fig. 2　Two-stage roller seed planter structural diagram

1. 内种箱　2. 电机　3. 往复运动机构　4. 排种辊　5. 传动系统　6. 排种箱　7. 导种板

影响有序、精量排种的往复式送种机构、下种箱结构、排种辊和出种机构的结构及参数是巨菌草精量排种器设计的关键。

2　关键结构参数设计

2.1　往复式送种机构

往复式送种机构主要由曲柄滑块机构、种箱以及驱动电机构成，借助曲柄连杆机构的往复运动特性，将内种箱中已被有序排列的特定数量种茎，精准地逐个落入下种箱的预排种槽内，以此达成精量送种的目标。结构示意图如图 3 所示。

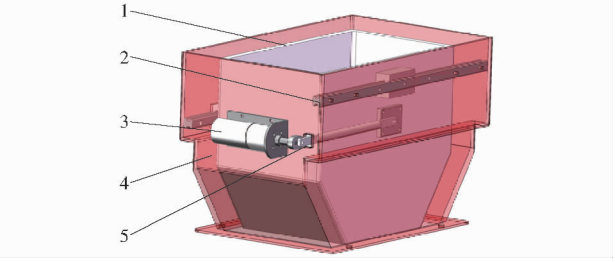


图 3　往复式送种机构结构示意图

Fig. 3　Schematic of reciprocating seed-delivery mechanism

1. 内种箱　2. 滑块滑轨机构　3. 电机　4. 外壳　5. 曲柄滑块机构

2.1.1　送种机构种箱设计

为了满足机械化种植要求，内种箱至少容纳 150 根种茎[16]，每根种茎的最大直径设为 22 mm，长度为 150 mm，为保证种茎有充足的存放空间，但又不能因往复运动而乱序，种箱的内侧宽度比巨菌草种茎长度略大，且内种箱厚度为 10 mm，下部分设有倾角以便于种茎滑落，故内种箱长度为 320 mm，宽度为 180 mm，高度为 250 mm，且表面打孔以便于与滑块连接。采用双轴心内置滚珠直线导轨，分别安装于内种箱的两侧。

2.1.2　曲柄滑块机构设计

中心式曲柄滑块机构用于直线运动[17]。考虑到排种器的结构参数，以及种茎无需进行过快的运动，因此曲柄长度设为 20 mm，连杆长度设为 252 mm，通过固定滑块与内种箱连接，使其运动更加平稳。如图 4 所示，在 1 s 内往复机构有一个运动周期，位移为 20 mm，最大加速度为 413 mm/s^2。

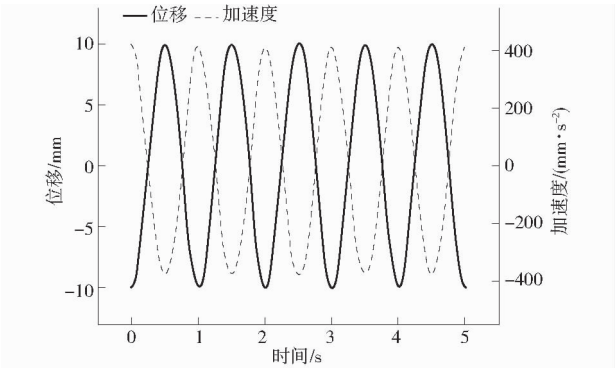


图 4　曲柄滑块机构运动曲线

Fig. 4　Crank-slider mechanism motion curves

2.2　排种机构

辊式排种机构可以将均匀排列于下种箱缓冲区的种茎，逐个且均匀地排入种沟中[18]。如图 5 所示辊式排种机构，主要由下种箱、排种辊、出种口、导种板、传动系统组成。

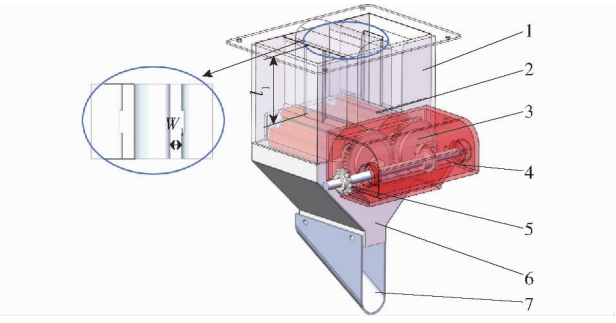


图 5　辊式排种机构结构图

Fig. 5　Structure diagram of roller seed metering mechanism

1. 下种箱　2. 排种辊　3. 传动系统　4. 传动外壳　5. 动力输入链轮　6. 出种口　7. 导种板

2.2.1　下种箱结构设计

下种箱位于送种机构与排种辊之间，其作用是实现种茎从送种机构到排种辊的过渡。为防止缓冲区种茎因排空而导致漏种现象，同时优化排种器的空间利用效率，需对下种箱的结构尺寸进行设计。

忽略种茎下落至排种辊凹槽的时间以及送种机构的补种过程，排空缓冲区中种茎所需时间为

$$t_1 = N_0 t_0 \tag{1}$$

其中

$$N_0 = \frac{l_1 - d_0}{d_0 \sqrt{1 - \left(\frac{W_1 - d_0}{d_0}\right)^2}} \tag{2}$$

式中 N_0——预排种槽种茎个数

t_0——种茎排出的时间间隔,s

t_1——排空预排种区中种茎所需要的时间,s

l_1——预排种槽深度,mm

d_0——种茎直径,mm

W_1——预排种槽宽度,mm

为了保证充分补种,需满足

$$t_1 \geqslant t_2 \tag{3}$$

式中 t_2——补种时间,s

联立式(1)、(3),求得缓冲区的深度应满足

$$l_1 \geqslant \frac{t_2 \sqrt{1 - \left(\frac{W_1 - d_0}{d_0}\right)^2}}{t_0} + d_0 \tag{4}$$

设定预排种槽宽度为 25 mm,种茎直径为 20 mm,通过数学模型建立种茎排出时间间隔与补种时间的函数关系,如图 6 可知,缓冲区深度与种茎排出时间间隔呈负相关,与储种箱预排种槽补种时间呈正相关。当种茎排出间隔过短或补种时间过长时,缓冲区深度的变化显著性高。种茎排出时间间隔与种植机播种速度紧密相关,依据疏植和密植的不同要求,以最短时间间隔作为设计标准。即当种茎排出时间间隔 t_0 在 0.1 ~ 1.5 s、t_2 在 0.1 ~ 1.5 s 时,缓冲区长度最大值为 68.05 mm。因此,下种箱预排种槽的长度应大于 68.05 mm。

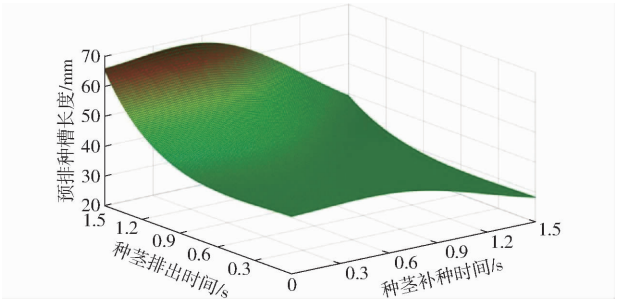


图 6 预排种槽长度变化曲线

Fig. 6 Variation curve of pre-seed slot length

前期调查发现种节大都分布于种茎的(0.35 ~ 0.65)L_0之间(L_0为所测量的种茎长度)。种节较大时会与内壁产生摩擦,为避免种茎堵塞和种芽损伤,在左右侧隔板的中间部分设计了 5 mm × 48 mm 缺口,具体细节如图 5 所示。

2.2.2 排种辊结构设计及参数分析

采用双辊式交错排种以防止因排种辊转速过快而导致种茎漏充,种辊的中心距设定为 102 mm,其中一个排种辊的凹槽一列与下种箱槽口正对齐,另一个排种辊的凹槽与槽口垂直,双辊采用交替排列。每个排种辊设计 4 个 U 型凹槽,种茎落入 U 型槽后均匀排出,从而实现有序、精量排种。排种辊(图 7)结构设计需满足

$$\begin{cases} l_2 > l_{\max} \\ W_2 = 2r_2 \geqslant 1.1 d_{\max} \\ D_0 = R - r_1 + r_2 \geqslant 0.5 d_{\max} \\ l_2 > W_2 > D_0 \end{cases} \tag{5}$$

式中 $l_{\max}$——种茎长度最大值,mm

$d_{\max}$——种茎直径最大值,mm

l_2——排种辊长度,mm

r_1——U 型槽圆心定位圆半径,mm

r_2——U 型槽圆半径,mm

D_0——U 型槽深度,mm

R——排种辊半径,mm

W_2——U 型槽宽度,mm

基于巨菌草种茎尺寸,排种辊 l_2 为 160 mm,W_2 为 24 ~ 28 mm、D_0 为 16 ~ 20 mm,R 为 48 mm。在凹槽内加设适当厚度的黏附弹性垫料,以自适应种茎直径,同时保护种芽[19]。

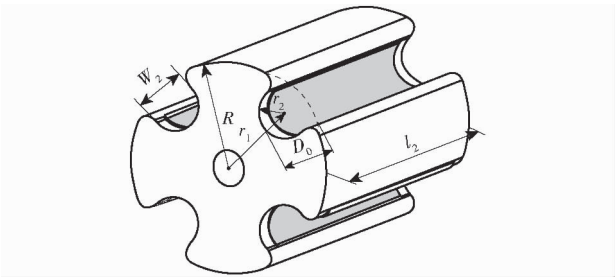


图 7 排种辊结构简图

Fig. 7 Structure schematic of seed dispensing roller

2.3 出种机构设计

种茎跟随排种辊旋转至一定角度后,种茎与凹槽脱离,掉落到出种口的内壁上。在不考虑摩擦以及能量损失的情况下,种茎离开凹槽的初始速度 v_0 可视为与排种辊线速度相同,即

$$v_0 = 2\pi n_0 R \tag{6}$$

式中 n_0——排种辊转速

如图 8 所示,种茎在下落过程中与内壁发生碰撞,由于出种口的质量远大于单根种茎的质量,根据动量守恒定律有

$$m_1 v_{i0} = m_1 v_i + m_2 v_2 \quad (i = 1,2,3) \tag{7}$$

式中 m_1、m_2——种茎和出种口内壁质量,$m_2 > m_1$

v_{i0}——第 i 次碰撞前种茎速度

v_i——种茎碰撞后速度

v_2——碰撞后出种口内壁速度

由图 9 所示碰撞模型及式(7),可得到每次碰撞后的种茎速度为

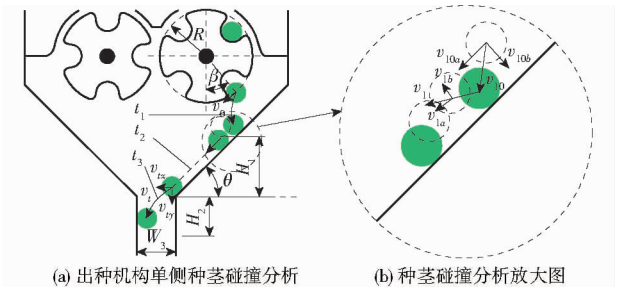


图 8　单侧排种碰撞运动分析

Fig. 8　Analysis of onilateral seed-row impact motion

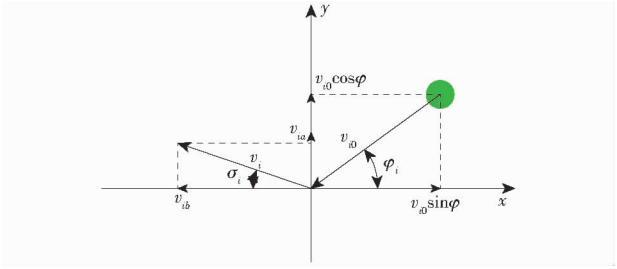


图 9　种茎碰撞速度矢量图

Fig. 9　Velocity vector diagram of seed-stem collision

$$\begin{cases} v_{ia} = v_{i0}\cos\varphi_i \\ v_{ib} = -ev_{i0}\sin\varphi_i \\ \arctan\dfrac{ev_{i0}\sin\varphi_i}{v_{i0}\cos\varphi_i} = \sigma_i \end{cases} \tag{8}$$

式中　v_{ia}——碰撞后平行内壁方向的速度

v_{ib}——碰撞后垂直内壁方向的速度

φ_i——第 i 次碰撞前运动方向与内壁的夹角

σ_i——第 i 次碰撞后运动方向与内壁的夹角

e——碰撞恢复系数

如图 9 所示，将碰撞前的速度分解为水平速度 v_{10x} 和竖直速度 v_{10y}，即

$$\begin{cases} v_{10x} = v_0\cos\beta \\ v_{10y} = v_0\sin\beta + gt_3 \end{cases} \tag{9}$$

式中　β——种茎与凹槽分离角

t_3——种茎离开凹槽到与内壁碰撞前的时间，s

将 v_{10x}、v_{10y} 分解到垂直于内壁和平行于内壁方向的速度，即

$$\begin{cases} v_{10y}\cos\theta - v_{10x}\sin\theta = v_{10a} \\ v_{10x}\cos\theta + v_{10y}\sin\theta = v_{10b} \end{cases} \tag{10}$$

式中　θ——出种口侧板倾角

结合式(9)、(10)计算出碰撞后的 v_{1a} 和 v_{1b}，分解到水平和竖直的方向上，得到碰撞后的分速度 v_{1x} 和 v_{1y} 为

$$\begin{cases} v_{1y} = v_{1b}\sin\theta - v_{1a}\cos\theta \\ v_{1x} = v_{1a}\sin\theta + v_{1b}\cos\theta \end{cases} \tag{11}$$

由式(11)可知种茎在碰撞后仍具有垂直于内壁向上的速度，如图 10 所示，将继续如此往复碰撞，

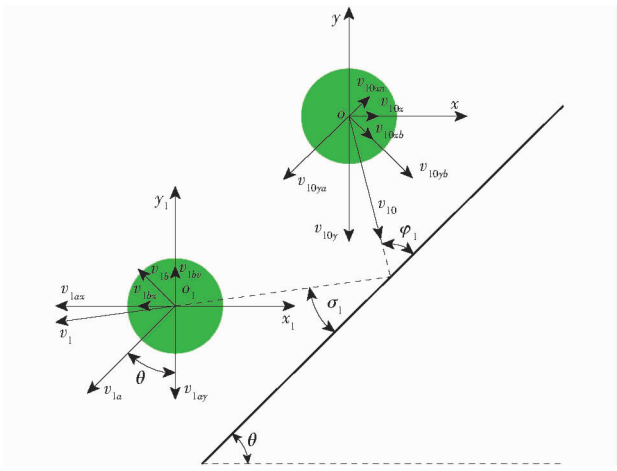


图 10　右侧种茎碰撞速度矢量图

Fig. 10　Velocity vectors for right-side stem impact

直到沿内壁垂直方向的速度为零。由于碰撞前种茎的加速运动时间较短，故可认为碰撞前的初始速度 $v_{10} = v_0$，即得到第一次碰撞后的速度为

$$\begin{cases} v_{1a} = 2\pi nR\cos\varphi_1 \\ v_{1b} = -2e\pi nR\sin\varphi_1 \end{cases} \tag{12}$$

式中　n——排种辊转速，r/min

建立种茎沿内壁下滑的位移 H_1 和速度 v_t 方程，即

$$H_1 = v_{1a}t_4\sin\theta + \frac{1}{2}gt_4^2 \tag{13}$$

$$v_t = v_{1a} + gt_4\sin\theta \tag{14}$$

式中　t_4——种茎沿内壁下滑时间

当种茎运动到出种口底部开口处，会脱离内壁做斜抛运动，其斜抛运动的水平 s 和竖直位移 H_2 方程为

$$\begin{cases} s = v_t t_5\cos\theta \\ H_2 = v_t t_5\sin\theta + \dfrac{1}{2}gt_5^2 \end{cases} \tag{15}$$

式中　t_5——种茎在出种口底部运动时间

由式(15)可知，种茎的速度和位移与内壁倾角以及运动时间相关。如图 11 所示，种茎在底部出口的运动还受种茎斜抛水平位移 s 和宽度 W_3 的影响，当 $s \geqslant W_3$ 时种茎会发生碰撞运动，影响经由导种板的排出效果。综合考虑，初步设置出种口侧板倾角 θ 为 30°～50°、出种口宽度 W_3 为 25～45 mm、出种口长度 H_2 为 30～70 mm。

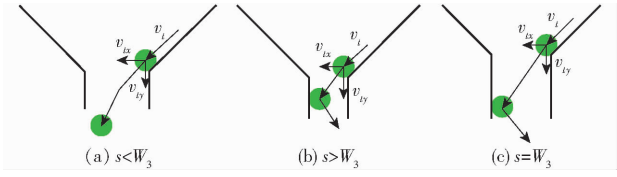


图 11　不同结构参数下种茎运动情况

Fig. 11　Seed stem motion under different structural parameters

种茎经出种口落入种沟时，因双辊排种旋转方向相反，致使种茎下落速度方向存在差异，进而导致种茎在种沟中呈现左右交替的分布，因此在出种口下方设计具有斜度的导种板，导种板倾斜角度需大于种茎的静摩擦角，初步设定导种板倾角为 30°～38°。

3 排种过程仿真分析

本文采用 EDEM 仿真软件建立排种器的仿真模型（图 12）。颗粒采用 Hertz – Mindlin with Bonding 接触力学模型，相关离散元仿真参数参考文献[20 – 21]及测量确定，如表 1 所示。将排种器 Solidworks 模型转为 STL 格式文件后导入 EDEM。对排种辊施加绕轴线顺时针转动，转速设 17.5 r/min，仿真时间步长为 25%，选取小种茎（16 mm）、中种茎（19 mm）和大种茎（22 mm），从颗粒工厂随机下落，仿真时间为 18 s。

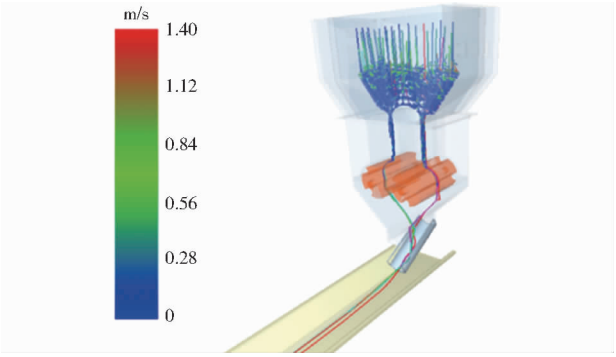


图 12 EDEM 仿真模型

Fig. 12 EDEM model

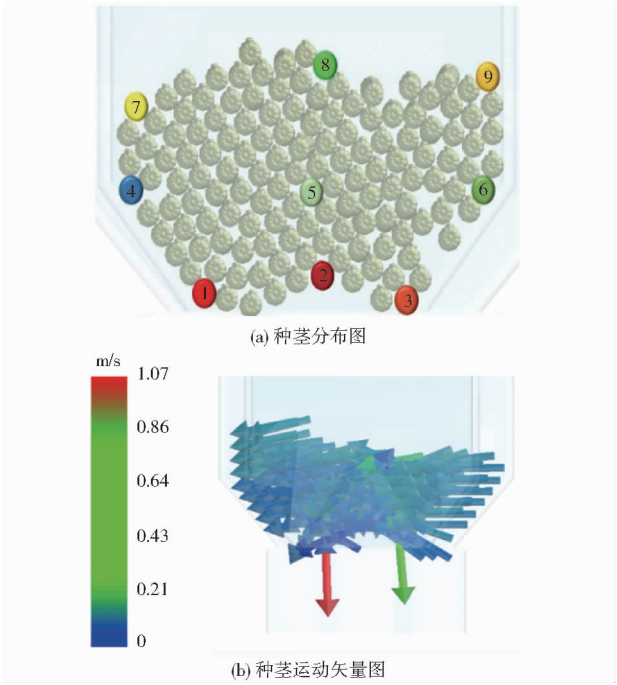
表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
种茎泊松比	0.4
钢板泊松比	0.3
种茎茎秆剪切模量/MPa	380
钢板剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
种茎密度/(kg·m^{-3})	1 064
钢板密度/(kg·m^{-3})	7 850
种茎间静摩擦因数	0.25
种茎间滚动摩擦因数	0.42
种茎间碰撞恢复系数	0.4
种茎与钢板静摩擦因数	0.52
种茎与钢板滚动摩擦因数	0.45
种茎与钢板碰撞恢复系数	0.5

在排种过程中，巨菌草种茎会受到下种箱内壁、其他种茎的压力、摩擦力等作用，作用力会导致种茎转动、无序排种等，因此，需要对排种过程进行动力学分析。

标记巨菌草种茎，随机在种箱内上层、中层和下层各选取 3 个种茎作为分析对象，编号依次为 1～9。从送种开始的第 1 秒起，对单个种茎受力情况进行分析，如图 13 所示。



(a) 种茎分布图

(b) 种茎运动矢量图

图 13 送种机构仿真过程

Fig. 13 Simulation of seed-sowing mechanism

由于所选种茎在种层中分布各异，种茎排出时间也有所不同。图 14 为所选种茎的速度变化曲线。在下种层，种茎 1、2、3 在种箱开始运动后完成送种。种茎 3 因处于种箱出口位置，在送种起始便迅速落入种茎缓冲区，其速度变化时间短且变化迅速。种茎 1 和种茎 2 在种箱运动过程中被送至种茎缓冲区，在下落前，种茎的主要运动是随种箱运动。由图 14a 可知，在下落前种茎的总体速度受 X 轴方向的运动影响较大，而在下落时，总体速度受 Z 轴运动影响较大。种茎在 Z 轴方向仅受重力作用，因此在 Z 方向的速度沿 Z 轴负方向逐渐增大，当落入种茎缓冲区后速度变为零。对于位于中间种层的种茎 4、5 和 6，种茎 6 完成了落种工作，其速度曲线与种茎 1 和 2 基本相似，只是送种时间较长。而种茎 4、5 以及上种层的种茎 7、8、9 均未被送出，因此它们整体的运动速度曲线基本相同，速度变化范围较小，且与曲柄滑块的速度运动特性较为贴合。

在整个送种过程中，种茎除受自身重力作用外，还受到种茎间以及种箱内板的挤压力。图 15 为所选种茎的受力变化曲线。整体种茎受力呈现相似的变化趋势，这是因为种箱运动具有周期性。在未被送出的种茎中，上种层种茎受力小于中种层种茎受力。而在被送出的种茎中，所受挤压力的最大值为

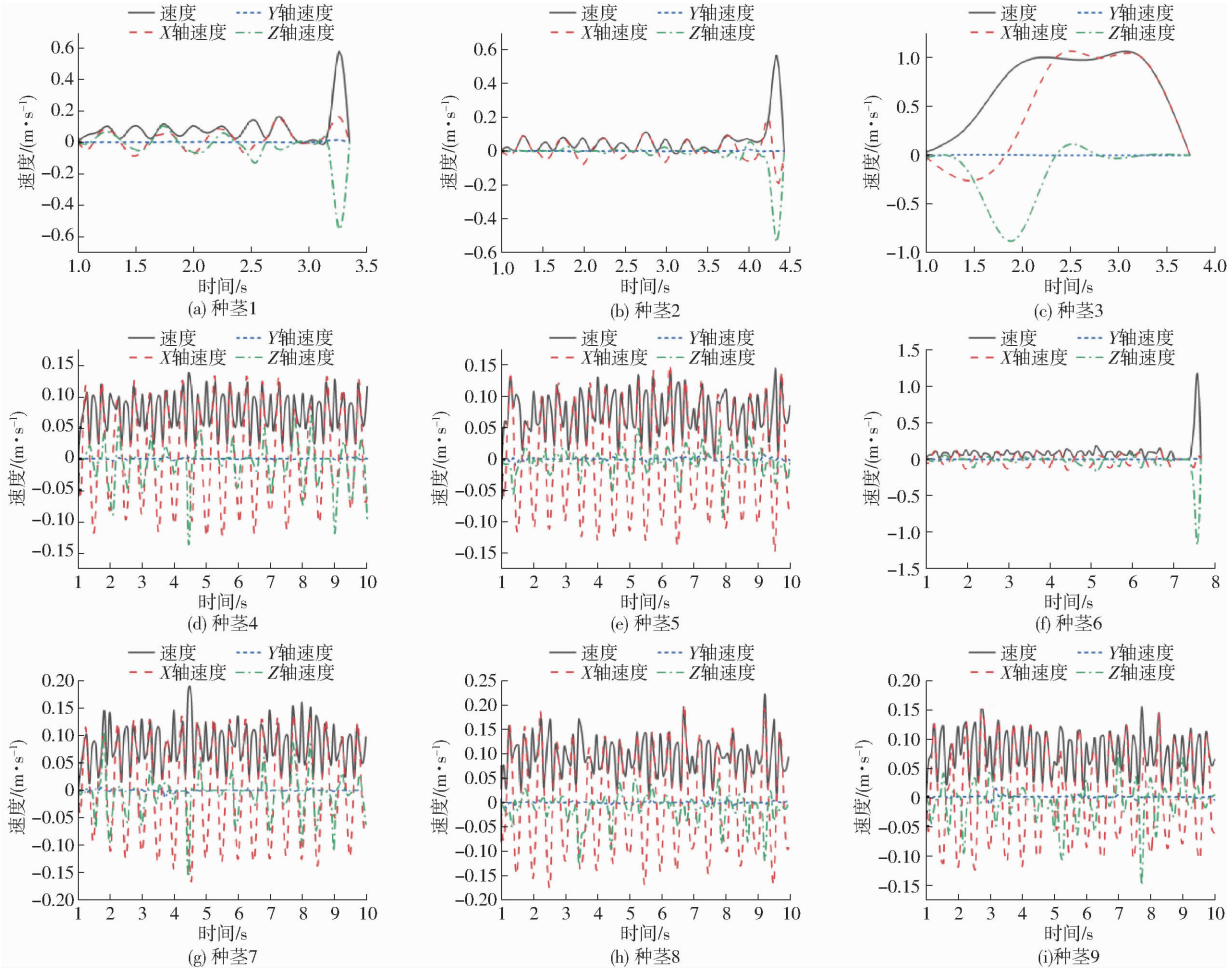


图 14　目标种茎速度曲线

Fig. 14　Target seed stem velocity curves

38.7 N,远小于种茎表皮破损的临界力。由此可以说明,种茎在送种阶段无损伤。

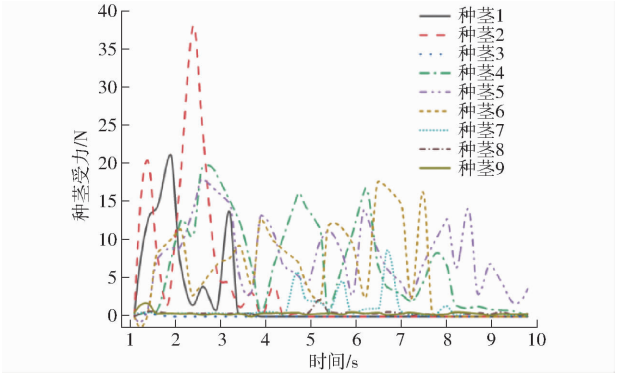


图 15　送种种茎受力变化曲线

Fig. 15　Curves of various stem load variations

排种过程需要有一定的巨菌草茎秆容量,其结构差异会影响排种空间,且种茎直径差异较大时,会出现重充和堵塞问题,进而影响排种效果。因此,依据巨菌草种茎尺寸参数,选择排种辊凹槽深度(16、18、20 mm)、宽度(24、26、28 mm)以及预排种槽与排种辊表面的间距(5、7、9 mm)作为单因素变量,种茎重充率和堵塞率作为试验指标进行仿真试验。选取小种茎(16 mm)、中种茎(19 mm)和大种茎(22 mm),从颗粒工厂随机下落,分析其对排种器的影响,结果如表 2 所示。

表 2　排种辊正交试验结果

Tab. 2　Orthogonal test result for seed roller

序号	排种辊凹槽深度	排种辊凹槽宽度	表面间距	空列	重充率/%	堵塞率/%
1	16	24	5	1	2.50	2.05
2	16	26	7	2	5.12	2.16
3	16	28	9	3	14.14	5.63
4	18	24	7	3	14.43	5.21
5	18	26	9	1	31.46	14.43
6	18	28	5	2	32.58	4.52
7	20	24	9	2	21.58	10.35
8	20	26	5	3	28.54	2.35
9	20	28	7	1	20.46	2.64
重充率	k_1	0.073	0.128	0.212	0.181	
	k_2	0.262	0.217	0.133	0.198	
	k_3	0.235	0.224	0.224	0.190	
	R	0.189	0.096	0.091	0.016	
堵塞率	k_1	0.033	0.059	0.030	0.064	
	k_2	0.081	0.063	0.033	0.057	
	k_3	0.051	0.043	0.101	0.044	
	R	0.048	0.021	0.072	0.020	

置信水平方差分析显示排种辊凹槽深度对排种重充率的影响极显著,表面间距对排种堵塞率具有显著影响,通过进一步极差分析以及综合考量,选取排种辊凹槽深度为 16 mm、宽度为 24 mm、表面间距为 7 mm。

参考文献[22-23],设定土壤密度为 1 710 kg/m^3,弹性模量为 6.6 MPa,泊松比为 0.3,构建种沟模型,并将其视为环境体。将巨菌草种茎颗粒与种沟之间的静摩擦因数和动摩擦因数设为 1,碰撞恢复系数设置为 0.001。排种器前进速度设定为 1.4 m/s,与之对应的排种辊转速为 17.5 r/min,种茎动态生成 150 根,由颗粒工厂缓慢下落,以此模拟放种过程。图 16 所示为巨菌草种茎群体运动仿真图。从图中可以清晰地观察到,种茎在放种和落种时速度达到最大值。而在排种器运行的其他阶段,种茎速度均趋于稳定。在持续 16 s 的排种工作过程中,共计落种茎 28 根,平均每秒排种 1.75 根。

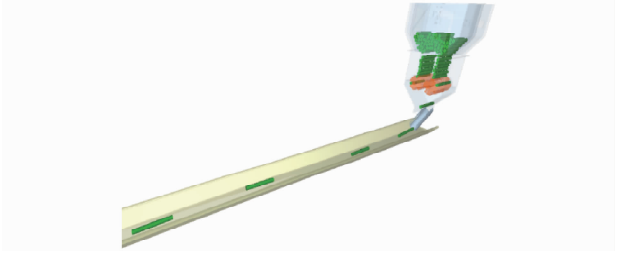


图 16 排种器工作仿真

Fig. 16 Simulation of seed dispenser operation

选取图 13a 中的 1 号种茎作为研究对象,其位移曲线如图 17 所示。

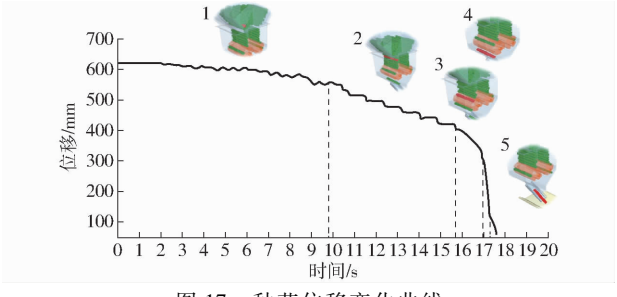


图 17 种茎位移变化曲线

Fig. 17 Displacement curve of a single seed stem

从阶段 1~3,种茎随着排种槽产生位移,从第 4 阶段开始从排种辊凹槽脱落,与出种口内壁发生碰撞,受到出种口内壁的约束以及重力和摩擦力的共同作用,种茎位移曲线的斜率发生变化,第 5 阶段由出种口滑落到导种板落入种沟中。因此,依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,并结合巨菌草种植特点,将株距合格率作为试验指标,出种机构的出种口侧板倾角 A(30°、40°、50°)、出种口开口宽度 B(25、35、45 mm)以及长度 C(30、50、70 mm)作为因素,构建关于不同结构参数对排种性能影响的回归方程

$$Y_1 = 92.78 + 1.91A + 0.837\,5B - 0.15C + 1.15AB - 1.43AC - 0.025BC - 2.37A^2 - 1.17B^2 + 1.61C^2 \quad (16)$$

结果显示:试验因素 A、AC、A^2、C^2 对回归方程的影响极显著($p \leqslant 0.01$),试验因素 B、AB、B^2 对回归方程的影响较显著($0.01 < p < 0.05$)。

通过对上述排种过程分析和巨菌草种茎排种器最佳结构参数组合求解得出:出种口侧板倾角为 45.1°、宽度为 44.5 mm、长度为 30.65 mm 时株距合格率最优,为 95.84%;基于生产和排种性能,最终确定出种口侧板倾角为 45°,宽度为 45 mm,长度为 30 mm。

4 台架性能试验

4.1 试验台搭建

依据计算和仿真结果加工排种器台架,如图 18 所示。

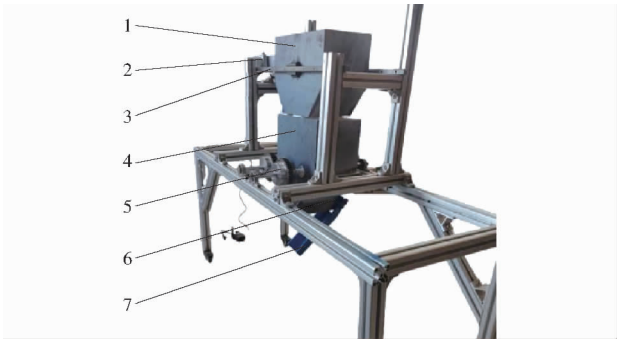


图 18 排种器台架

Fig. 18 Seed dispenser platform

1. 上种箱 2. 曲柄连杆机构 3. 滑动机构 4. 下种箱 5. 齿轮传动组 6. 出种口 7. 导种板

4.2 材料与方法

试验材料选自内蒙古农业大学东园区栽植的成熟期巨菌草,选择生长茁壮通直的巨菌草制备种茎,去除其根部和表面叶片,按照规定的尺寸和要求进行裁剪,并将裁剪后的种茎按照直径大小分为大、中、小 3 类。

将排种辊电机转速设置为 17.5 r/min,输送带转速设置为 1.4 m/s[24-25]。以株距合格率 Y_1 和株距变异系数 Y_2 作为排种器排种性能的评价指标,排种辊转速、出种口与种沟高度以及导种板倾角作为试验变量开展响应面试验。具体的因素编码如表 3 所示。

株距合格区间设定为 400~800 mm,在此区间内的种茎视为株距合格,株距合格率是指合格种茎数量与排种种茎总数的百分比,即

$$Y_1 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (17)$$

表 3　正交试验因素编码

Tab. 3　Orthogonal experiment factors codes

编码	因素		
	排种辊转速/($r \cdot min^{-1}$)	相距高度/mm	导种板倾角/(°)
-1	10.0	150	32
0	12.5	200	34
1	15.0	250	36

式中　N_1——总排出种茎数量

N_2——间距合格种茎数量

株距变异系数体现作物种植的均匀性，变异系数数值越大，意味着株距离散程度大均匀性差；反之，则说明株距均匀，种植作物整齐划一。

4.3　试验结果

17 组试验方案及结果如表 4 所示，包括 5 组零点估计误差试验，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Experimental design and results

序号	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	-1	-1	0	94.4	12.22
2	1	-1	0	89.2	14.42
3	-1	1	0	91.3	11.58
4	1	1	0	87.8	15.91
5	-1	0	-1	93.7	10.83
6	1	0	-1	90.4	13.81
7	-1	0	1	96.4	9.82
8	1	0	1	92.3	12.22
9	0	-1	-1	93.9	11.22
10	0	1	-1	88.6	14.82
11	0	-1	1	94.6	10.24
12	0	1	1	95.5	12.02
13	0	0	0	94.9	11.08
14	0	0	0	94.4	11.25
15	0	0	0	95.5	10.08
16	0	0	0	93.8	11.35
17	0	0	0	94.9	10.76

使用 Design-Expert 数据分析软件进行株距合格率和株距变异系数方差分析，结果如表 5 和表 6 所示。

株距合格率 Y_1 为响应函数，各因素编码值为自变量的多项式回归方程为

$$Y_1 = 94.7 - 2.01X_1 - 1.11X_2 + 1.52X_3 + 0.425X_1X_2 - 0.2X_1X_3 + 1.55X_2X_3 - 1.99X_1^2 - 2.04X_2^2 + 0.487\,5X_3^2 \quad (18)$$

结果显示，株距合格率回归模型的 P 值小于 0.05，表明该模型具有显著的统计学意义。在试验因子中，X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_2X_3 对株距合格率的影响极为显著；此外，失拟项的 P 值大于 0.05，说明模型的拟合度良好。

表 5　株距合格率方差分析

Tab. 5　Variance analysis of qualified plant spacing rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	107.70	9	11.97	28.32	0.000 1
X_1	32.40	1	32.40	76.69	<0.000 1
X_2	9.90	1	9.90	23.43	0.001 9
X_3	18.60	1	18.60	44.04	0.000 3
X_1X_2	0.722 5	1	0.722 5	1.71	0.232 3
X_1X_3	0.160 0	1	0.160 0	0.38	0.557 8
X_2X_3	9.61	1	9.61	22.75	0.002 0
X_1^2	16.63	1	16.63	39.37	0.000 4
X_2^2	17.48	1	17.48	41.37	0.000 4
X_3^2	1.00	1	1.00	2.37	0.167 7
残差	2.96	7	0.422 5		
失拟项	1.34	3	0.445 8	1.10	0.446 0
误差	1.62	4	0.405 0		
总和	110.66	16			

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

表 6　株距变异系数方差分析

Tab. 6　ANOVA on coefficient of variation of plant spacing

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	45.57	9	5.06	8.96	0.004 3
X_1	17.73	1	17.73	31.39	0.000 8
X_2	4.85	1	4.85	8.59	0.022 0
X_3	5.09	1	5.09	9.01	0.019 9
X_1X_2	1.13	1	1.13	2.01	0.199 4
X_1X_3	0.084 1	1	0.084 1	0.15	0.711 1
X_2X_3	0.828 1	1	0.828 1	1.47	0.265 3
X_1^2	5.20	1	5.20	9.21	0.019 0
X_2^2	9.69	1	9.69	17.15	0.004 3
X_3^2	0.503 3	1	0.503 3	0.89	0.376 6
残差	3.95	7	0.564 8		
失拟项	2.90	3	0.968 2	3.69	0.119 7
误差	1.05	4	0.262 3		
总和	49.52	16			

株距变异系数 Y_2 为响应函数，各因素编码值为自变量的多项式回归方程为

$$Y_2 = 10.9 + 1.49X_1 + 0.778\,8X_2 - 0.797\,5X_3 + 0.532\,5X_1X_2 - 0.145X_1X_3 - 0.455X_2X_3 + 1.11X_1^2 + 1.52X_2^2 - 0.345\,7X_3^2 \quad (19)$$

结果表明：株距合格率回归模型的 P 值小于 0.05，模型具有显著意义。在试验因子中，X_1、X_2^2 对株距合格率的影响极显著；同时，X_2、X_3、X_1^2 对株距合格率的影响也较显著。此外，失拟项的 P 值大于 0.05，说明模型的拟合度良好，能够有效反映各因子对株距合格率的影响。

4.4　参数优化

为了获得排种器的最佳工作参数，对工作参数进行优化，综合考虑试验因素，目标函数和约束条

件[26-27]为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ 0 < Y_1 < 100\% \\ 0 < Y_2 < 100\% \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

求解可得到最佳工作参数组合为:排种辊转速 11.57 r/min、相距高度 191.56 mm、倾斜角度 35.77°,排种性能较为理想。

基于优化后的最优工作参数组合,本次试验将排种辊转速设定为 11.6 r/min,排种部件与播种面的相距高度设为 191 mm,排种装置的倾角设置为 36°。在保持其他试验条件恒定不变的情况下,开展了 5 次重复试验,结果如图 19 所示。

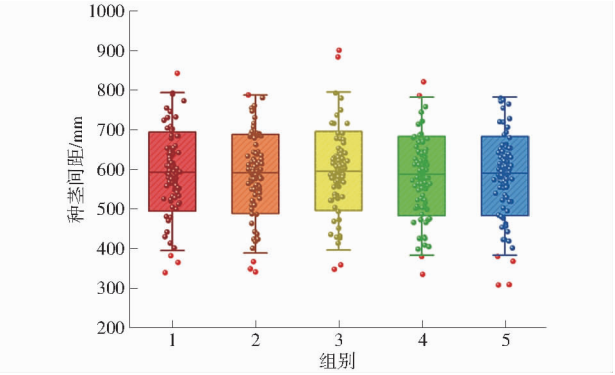


图 19 株距分布图

Fig. 19 Plant spacing distribution map

可以清晰地观察到,多数株距集中分布在合格区间内,整体呈现出密植的分布特征。对每次试验数据进行计算,并取其平均值,结果显示,株距合格率达到 96.4%,株距变异系数为 9.98%。这两项指标均符合预期的种植要求,表明在该组参数设定下,排种系统能够实现较为精准且稳定播种作业。

5 结论

(1)为解决现有巨菌草排种器排种过程漏播、精准度差的问题,设计了一种往复辊式精量排种器。通过对其排种工作过程进行理论、仿真分析,确定了往复辊式巨菌草精量排种器关键结构参数。

(2)标定了巨菌草茎秆离散元模型参数,采用 EDEM 仿真分析,分析巨菌草种茎的力学、运动学规律,试验得出排种辊结构参数最优组合为:凹槽深度 16 mm、凹槽宽度 24 mm、表面间距 7 mm。并且模拟排种器工作过程,分析种茎位移变化曲线,探究出种口结构参数多因素之间相互影响变化规律,优化求解并调整后确定出种口最优参数组合为:侧板倾角 45°、开口宽度 45 mm、开口长度 30 mm。

(3)验证试验结果表明,排种器工作参数组合为:排种辊转速 11.6 r/min、出种口与地面相距高度 191 mm、导种板倾角 36°,排种性能较为理想;株距合格率达到 96.4%,株距变异系数为 9.98%,所设计的排种器可稳定、精量工作,有利于巨菌草的短茎埋栽种植。

参 考 文 献

[1] 李子森,周童晖,苏德伟,等. 巨菌草对宁夏中度盐碱地土壤酶活性、微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2025,54(1):125-134.
LI Zisen, ZHOU Tonghui, SU Dewei, et al. Effect of *Cenchrus fungiggraminus* on soil enzyme activity, microbial community structure and functional diversity of Ningxia moderate saline-alkali land[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2025, 54(1): 125-134. (in Chinese)

[2] 郑邵秋,张彩虹,王国强. 巨菌草扦插机扦插机构优化设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(6):32-41.
ZHENG Shaoqiu, ZHANG Caihong, WANG Guoqiang. Optimization design and test of cuttings mechanism of *Pennisetum* giganteum transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 32-41. (in Chinese)

[3] 赵芳伟,童向亚,郑书河,等. 2CJQ-1 型预切种式巨菌草种植机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2015,50(5):150-156.
ZHAO Fangwei, TONG Xiangya, ZHENG Shuhe, et al. Design and test of 2CJQ-1 pre-cutting type giant juncao planter[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(5): 150-156. (in Chinese)

[4] 郑书河,林长山,叶大鹏,等. 巨菌草种茎辊式排种器结构优化及排种动力学仿真与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(21):36-43.
ZHENG Shuhe, LIN Changshan, YE Dapeng, et al. Structural optimization of grooved-roller seed metering device for *Pennisetum* and simulation and experiment of seed metering dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 36-43. (in Chinese)

[5] 刘浪,李鸿,林长山,等. 巨菌草排种器排种过程动力学仿真分析及试验研究[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(3):427-432.
LIU Lang, LI Hong, LIN Changshan, et al. Dynamic simulation analysis and experimental study on seeding process of giant

juncao seed metering device[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2021,50(3):427 – 432. (in Chinese)

[6] 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-cut sugarcane spoon-chain seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):88 – 97. (in Chinese)

[7] 钟家勤,陶利民,李尚平,等. 清种补种上提式甘蔗排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(13):43 – 54.
ZHONG Jiaqin, TAO Limin, LI Shangping, et al. Design and experiments of a seed clearing, reseeding and elevating type seed metering device for sugarcane[J]. Transactions of the CSAE,2023, 39(13): 43 – 54. (in Chinese)

[8] 李尚平,李洋,张彪,等. 宿根蔗补种机均匀排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):124 – 138.
LI Shangping, LI Yang, ZHANG Biao, et al. Design andtest of uniform seeding control system for ratoon sugarcane replanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):124 – 138. (in Chinese)

[9] WANG Meimei, LIU Qingting, OU Yinggang, et. al. Numerical simulation and verification of seed-filling performance of single-bud billet sugarcane seed-metering device based on EDEM[J]. Agriculture,2022,12(7): 983.

[10] LIU X, NIU Z, LI M, et al. Design and experimental research on disc-type seeding device for single-bud sugarcane seeds[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering,2023,16(2):115 – 124.

[11] KHWANTRI S, CHOOCHART C, KHANITA K, et al. Effect of metering device rrangement to discharge consistency of sugarcane billet planter[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food,2018,11(3):139 – 144.

[12] 何冯光,邓干然,崔振德,等. 外槽轮式单段木薯种茎排种器设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(4):6 – 12.
HE Fengguang, DENG Ganran, CUI Zhende, et al. Design and simulation test of single-slot cassava seed stalk seeding device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(4):6 – 12. (in Chinese)

[13] 刘俊安,陈雄飞,刘冲,等. 柔性输送带-胶辊组合式皇竹草预切种茎排种装置设计[J]. 东北农业大学学报,2024,55(8):290 – 300.
LIU Junan, CHEN Xiongfei, LIU Chong, et al. Design of flexible conveyor belt rubber roller combination type pre-cutting seed stem seeding device for *Pennisetum hydridum*[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2024, 55(8): 290 – 300. (in Chinese)

[14] 陈林涛,蓝莹,窦文淼,等. 木薯种茎精密播种过程中机械碰撞损伤有限元分析[J]. 华南农业大学学报,2024,45(3):427 – 436.
CHEN Lintao, LAN Ying, DOU Wenmiao, et al. Finite element analysis of mechanical collision damage during precision seeding of cassava stem[J]. Journal of South China Agricultural University,2024,45(3):427 – 436. (in Chinese)

[15] 刘平义,张旭,杨景睿,等. 多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):20 – 29.
LIU Pingyi, ZHANG Xu, YANG Jingrui, et al. Design andtest of multi-screw rod type precision seed metering device for pelletized cistanche[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 20 – 29. (in Chinese)

[16] 方梁菲,曹成茂,秦宽,等. 导种环槽 U 型孔组合型轮式前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4):21 – 32,51.
FANG Liangfei, CAO Chengmao, QIN Kuan, et al. Design and test of combined wheel-type peucedanum praeruptorum seed metering device with seed guiding ring groove and U-shaped hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):21 – 32,51. (in Chinese)

[17] 尚书旗,常学良,张宁,等. 铺料式排种器试验台设计与验证[J]. 农业机械学报,2025,56(4):186 – 201.
SHANG Shuqi, CHANG Xueliang, ZHANG Ning, et al. Design and verification of test bench for material spreading seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(4):186 – 201. (in Chinese)

[18] 言育谦,刘立晶,刘云强,等. 蔬菜气吸式排种器四级清种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):57 – 65.
YAN Yuqian, LIU Lijing, LIU Yunqiang, et al. Design and test of four-stage seed cleaning mechanism for vegetable air-suction seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1): 57 – 65. (in Chinese)

[19] 张俊,何辉波,邓干然,等. 木薯种茎整理排序装置设计与优化[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(2):40 – 46.
ZHANG Jun, HE Huibo, DENG Ganran, et al. Design andoptimization of cassava stem sorting device[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2021,43(2):40 – 46. (in Chinese)

[20] 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)

[21] HORABIK J, PARAFINIUK P, MOLENDA M. Stress profile in bulk of seeds in a shallow model silo as influenced by mobilisation of particle-particle and particle-wall friction: experiments and DEM simulations[J]. Powder Technology,2018,327:320 – 334.

[22] DENG X, WU W, YOU J, et al. Calibration of the edinburgh elasto-plastic adhesion contact model for modelling clay-moist soil with high moisture content[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,237:110518.

[23] WANG Z, MA F, ZHU Y, et al. Prediction and calibration of black soil modeling parameters based on response surface methodology and machine learning algorithms[J]. Particulate Science and Technology, 2025, 43(4): 534 – 545.
[24] 徐凤英,彭智康,刘庆庭,等. 甘蔗种植机随速播种控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 89 – 94.
XU Fengying, PENG Zhikang, LIU Qingting, et al. Design and test of speed-following seeding control system for sugarcane planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(7): 89 – 94. (in Chinese)
[25] LIU J, CHEN Q, XU H, et al. Inverse design and accurate optimization of layered structured seeding mechanism for sugarcane planters[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2023, 16(6): 107 – 115.
[26] 颜利民,吴涛,蒋德莉,等. 侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 216 – 226.
YAN Limin, WU Tao, JIANG Deli, et al. Design and test of side-throw type cotton stalk crushing and returning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 216 – 226. (in Chinese)
[27] 蒋德莉,颜利民,陈学庚,等. 纵向型钉齿链式地膜捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 267 – 281.
JIANG Deli, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Design and test of longitudinal tooth chain type plastic film collecting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 267 – 281. (in Chinese)

(上接第 130 页)

[25] 罗尧,王慧. 非线性弹簧阻尼减振装置的探究[J]. 物理与工程, 2011, 21(5): 13 – 16.
LUO Yao, WANG Hui. Study of the nonlinear damping spring shock absorbers[J]. Physics and Engineering, 2011, 21(5): 13 – 16. (in Chinese)
[26] 廖平,魏静,张爱强,等. 一种弧齿锥齿轮时变啮合刚度和传动误差半解析计算方法[J]. 机械传动, 2019, 43(12): 50 – 56.
LIAO Ping, WEI Jing, ZHANG Aiqiang, et al. A semi-analytical calculation method for time-varying meshing stiffness and transmission error of spiral bevel gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(12): 50 – 56. (in Chinese)
[27] 李谷雨. 锥齿轮传动系统多状态啮合动力学建模及动态特性研究[D]. 天津:天津工业大学, 2022.
[28] 袁婧. 近世代数观点下高等代数的形式化[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
YUAN Jing. Formalization of advanced algebra in the view of modern algebra[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
[29] ISO 12405-3: Electrically propelled road vehicles-test specification for lithium-ion traction battery packs and systems-part 3: safety performance requirements[S]. 2014.