

种群扰动对离心机械式玉米高速精量排种器性能的影响

张 萌¹ 李馨宇² 王 磊³ 赖庆辉⁴ 阴艳超¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 南京农业大学工学院, 南京 211800; 4. 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500)

摘要: 为克服传统机械式玉米精量排种器在高速作业过程静态堆积种群导致充种效率低问题, 本文设计一种扰种机构将种群离散化, 增加种子流动性, 提高充种精度和排种器性能。对扰种机构进行理论分析与结构设计, 采用离散元仿真开展扰种齿形状、扰种齿高度及种群高度对排种性能的影响规律研究, 明确各因素影响机理。以扰种齿形状、扰种齿高度、种群高度为试验因素, 以破碎率、合格率、重播率、漏播率为试验指标进行三因素三水平中心组合正交试验, 并对试验数据进行多元回归和响应曲面分析, 得到各因素对指标的影响关系。采用多目标优化方法, 确定最佳参数组合为: 作业速度为 13 km/h、扰种齿形状为 D 型、扰种齿高度为 11.20 mm、种群高度为 66.40 mm, 此时合格率为 94.75%, 重播率 2.71%, 漏播率 2.54%, 破碎率 0.42%, 满足高速条件下玉米精量播种技术要求。

关键词: 玉米; 高速精量排种器; 种群扰动; 离心机械式

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0044-11

OSID:



Effect of Disturbed Seeds on Performance of Centrifugal Mechanical
Maize High-speed Precision Seed Metering Device

ZHANG Meng¹ LI Xinyu² WANG Lei³ LAI Qinghui⁴ YIN Yanchao¹

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China
4. School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming to improve the performance of the mechanical maize precision seed metering device in high-speed operation, a seed-disturbing mechanism was designed to discretize the originally static accumulation of seeds, increase the mobility of seeds, and improve the precision seeding conditions. The theory analysis and structure design of the disturbing mechanism were carried out. The influence of disturbance teeth shape, disturbance teeth height, and seed pile height on the seeding performance was studied by the discrete element simulation analysis method. The influence of each factor was clarified. To verify the theoretical analysis results and obtain the best performance parameters, the shape of seed-disturbing teeth, the height of seed-disturbing teeth, and the height of the seed pile were used as test factors. The breakage rate, qualified rate, multiple rate, and missing rate were used as test indicators to carry out the three-factor and three-level center orthogonal test. The test data were analyzed by multiple regression analysis and response surface analysis using Design-Expert software. The influence relationship of each factor on the index was obtained. A multi-objective optimization method was used to determine the better parameter combination. When the operation speed was 13 km/h, the shape of seed-disturbing teeth was D, the height of seed-disturbing teeth was 11.20 mm, and the seed layer height was 66.40 mm, the qualified rate was 94.75%, the multiple rate was 2.71%, the missing rate was 2.54%, and the breakage rate was 0.42%, which met the technical requirements of precision seeding under the condition of high speed.

Key words: maize; high-speed seed metering device; disturbed seed; centrifugal mechanical

收稿日期: 2025-10-23 修回日期: 2025-11-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(YDZX2025011)和陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-204)

作者简介: 张萌(1990—), 女, 博士生, 主要从事机械设计与智能制造研究, E-mail: zhangmeng_easy@126.com

通信作者: 阴艳超(1977—), 女, 教授, 博士, 主要从事人工智能与智能制造研究, E-mail: yinye@163.com

0 引言

随着玉米生产经营模式规模化发展和密植条件下实现高速精量播种的需求,对播种机工作性能提出了更高的技术要求^[1-2]。精密排种器作为实现高速精量播种技术的核心部件,其排种性能对播种作业质量起到决定性作用^[3-4]。由于机械式精密排种器具备结构简单、配套性好和使用成本低等诸多优点,在我国应用广泛^[5]。但随着作业速度提升,机械式排种器排种精度直线下降,制约其实际应用^[6]。杨晓波^[7]指出受排种器结构限制,目前国内机械式排种器作业速度不超过 8 km/h,播种效率低。李彪等^[8]指出传统机械式排种器在高速作业时易出现漏播、重播率高、适应性差等问题。此外,气力式排种因其作业速度快、伤种率低等优点受到广泛研究,但其结构复杂,加工成本和后期维护成本较高^[9-10]。因此,机械式排种器迫切需要攻克其作业性能受制于高速的难题,对于促进我国高速精量播种技术发展具有重要意义^[11]。

种群流动效率是制约机械式排种器高速作业性能的主要原因,现有研究采用物理扰动、机械振动等方式实现种间力链的破坏,有效提升种群流动性,降低种子充填阻力的影响^[12-14]。而高速作业条件下机械式排种器增设扰种结构难度较大,种子与扰种轮之间剧烈的碰撞易导致种子损伤。针对上述问题,刘彩玲等^[15]提出了一种小麦水平锥面排种盘,内表面设有导种条以提高充种率,并分析了充种区种子层流动特性与排种器结构之间的关系。JIA 等^[16]通过为大豆排种器增加搅种机构,改善大豆种子受到的充填力,提高了排种器充种效果;GAO 等^[17]为了实现高速作业条件下玉米精量排种,设计了离心式排种器并通过种群离散化实现了有效充种。美国 Case IH 公司^[18]在气吸式排种器上设计了一种柔性扰种轮,通过扰种轮与排种轴同步旋转,对充种室内的种子进行适度扰动,打破种子之间的静止状态。瑞典 Vaderstad 公司^[19]生产的气压式排种器将正压压种技术与气流辅助相结合,使种子充分运动,并确保其稳定充入种盘型孔。刘瑞等^[20]通过在排种盘上设置凹槽和扰种台柱将密集的种群离散开,通过台架试验分析种群法向力,结果表明,该排种盘具有较大的扰动强度,更易完成充种。李治民等^[21]设计扰种槽结构以降低充种阻力、增强种群流动性。郭鹏等^[22]提出带有导种槽的排种盘以及辅助吹种型孔的充种结构,以此增强种子填充性能,提高充种效率。综上所述,国内外对于提升排种器内种群流动性研究,大多是在排种盘上设置凸起或凹

槽扰种结构,其在排种盘转动下破坏种群约束力链,提升种群流动性,从而提升排种器充种合格率^[23]。通过离散化种群提高种子流动性可提高排种器性能,其难点在于保证种群充分运动的同时减少种子受到的损伤。

本文在离心机械式玉米高速精量排种器研究基础上增设扰种机构实现种群扰动,并通过理论分析优化其结构参数,以扰种齿形状、扰种齿高度、种群高度为试验因素开展台架试验,得出最优参数组合并进行验证试验,以期提升机械式排种器高速作业性能提供参考。

1 排种器结构与工作原理

离心机械式高速精量排种器结构如图 1 所示,主要由后壳体、排种盘、轴、型孔、护种板、前壳体、种箱等结构构成,其中排种盘上设有均布的扰种齿,前壳体上设有腔室隔板及回种管道,腔室隔板将排种器分成 2 个工作区域,同时处于充种区的腔室隔板上设有网栅孔结构。根据排种器工作过程将排种器按照工作顺序划分为充种区、携种区、清种区和投种区。注:充种区红色颗粒表示穿过网栅孔的待充种子,体外回流管道内红色颗粒表示回流复充种子,蓝色颗粒表示有效充、排的单粒种子。

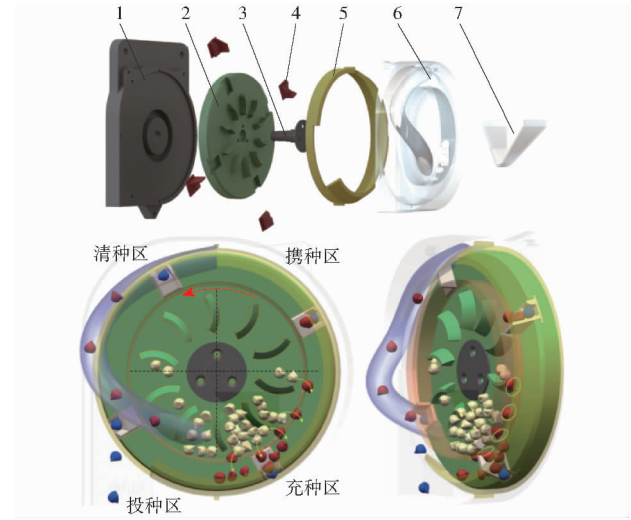


图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of seed metering device

1. 后壳体 2. 排种盘 3. 轴 4. 型孔 5. 护种板 6. 前壳体 7. 种箱

当排种器工作时,玉米种子从种箱进入排种器内腔,排种盘上设置的扰种齿随着排种盘一起转动,排种器内腔种子在扰种齿扰动下进行运动,部分种子通过网栅孔结构进入充种区,在重力和离心力作用下充入型孔并随排种盘转动。清种区护种板高度比充种区和携种区明显小,其高度只能约束单粒种子,当型孔中种子随着排种盘到达清种区时,多余种

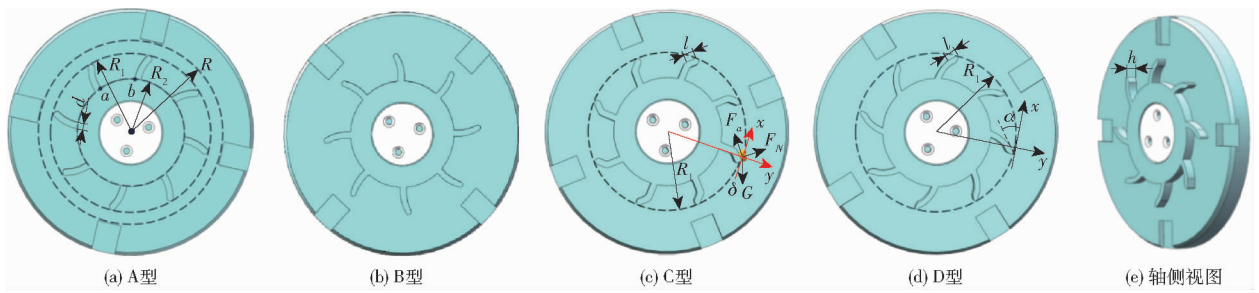


图 4 扰种齿结构

Fig. 4 Shapes of seed-disturbing teeth

外形弧度可取抛物线在 $x \in (-9 \text{ mm}, 9 \text{ mm})$ 范围, 在此范围内抛物线轮廓近似于圆的一部分。根据不同型孔数量, 扰种齿数量可灵活取值, 但同样应使两扰种齿间距离 l_{ab} 大于 13 mm, 以保证种子不会卡在扰种齿之间。

B 型扰种齿结构如图 4b 所示, 其同样为抛物线形扰种齿, 且与 A 型扰种齿旋向相反。通过对 A 型、B 型 2 种扰种齿扰种效果对比, 可得到不同形式的力对种群扰动效果的影响, 为后续选择合适的扰种齿提供支持。

C 型扰种齿结构为带有填充面的直线形扰种齿, 如图 4c 所示。扰种齿齿面由 2 个相交的平面构成, 其中齿尖平面为填充面, 其与齿顶端圆周的切线存在一定的夹角。当玉米种子在填充面上运动时, 会产生径向和切向的力, 使种子向排种器内腔边缘移动, 种子更易进入网栅孔, 该填充面起到清洁、引导种子的作用。该型扰种齿主要结构参数有扰种齿厚度 d 、扰种齿顶端圆半径 R_1 、填充平面与扰种齿顶端圆周切线间夹角 α 以及扰种齿顶端平面长度 L 。扰种齿顶端圆半径 R_1 和厚度 d 取值与 A 型扰种齿结构一致。随着排种盘转动, 该平面能够对种子起到引导填充的作用, 玉米种子在扰种齿末端的受力关系满足

$$\begin{cases} F_x = F_N \sin \alpha - G \cos \delta + f \cos \alpha \\ F_y = F_N \cos \alpha + G \sin \delta - f \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_y ——扰种齿径向合力, N
 F_x ——扰种齿切向合力, N
 F_N ——扰种齿对种子的支持力, N
 G ——种子重力, N
 f ——种子受到的摩擦力, N
 δ ——重力与垂直轴夹角, ($^\circ$)

扰种齿对种子产生一个 $F_N \cos \alpha$ 的径向力, 将种子推向周围^[25-26], 使种子沿着隔板内沿移动, 种子能够更加顺利地进入网栅孔结构, 提高种子充种效率。当 α 取值较小时, 种子受到较大径向力, 此时种子易被推向扰种齿边缘, 但齿尖填充平面的引导作用就会减弱; 当 α 取值较大时, 种子受到较大切

向力, 种子则易贴附在扰种齿上一起运动, 不易进入网栅孔。本文取 α 为 45° , 扰种机构具有引导种子和清洁平面的作用。而扰种齿顶端平面长度 L 应略大于玉米种子尺寸, 故 L 取值为 13 mm。

D 型扰种齿结构为带填充面的抛物线形扰种齿, 在 A 型扰种齿结构基础上, 设计与 C 型扰种齿相同的填充面结构, 如图 4d 所示, 扰种齿顶端圆半径 R_1 同样取为 56 mm, 填充平面与扰种齿顶端圆周切线间夹角 α 取 45° 。对比 A 型、D 型 2 种扰种齿扰种效果, 可得到填充面对种群扰动效果和种子通过网栅孔能力的影响。

随着排种盘转动, 若扰种齿与网栅孔之间的间隙过小, 扰种齿就会携带大量种子运动, 导致没有足够数量的种子进入到网栅孔中, 同时玉米种子易进入空隙造成卡顿, 对种子造成较大损伤。若两者之间间隙过大, 则扰种齿对种子的扰动效果将被削弱。扰种齿高度 h 由后续试验确定, 如图 4e 所示。

2.2 扰种齿形状对种子运动的影响

借助 EDEM 2022 软件对排种器工作过程进行仿真, 在排种器种箱顶部设置颗粒工厂, 生成玉米种子, 代替定量供种装置。排种器转速设为 270 r/min, 对应排种器工作速度为 13 km/h, 同时为保证排种器内腔种子数量稳定, 颗粒工厂种子生成速率与排种器排种速率保持一致, 每秒生成 18 颗, 生成的种子类型包括马齿形、棱形、类球形和扁圆形, 不同种子所占比例分别为 65.6%、13.2%、5.9% 和 15.3%, 确保仿真中种子模型形状与实际情况一致^[27]。为了检测排出种子数量, 在投种处设置数据监测器, 如图 5 所示。仿真总时长设置为 15 s, 由于前期排种器内腔种子数量较少, 从第 3 秒开始对仿真结果进行分析。通过 EDEM 可得到所选种子运动轨迹并统计其受力情况, 进而评估不同扰种齿结构对种群扰动的影响。

根据种子在排种器内的运动特点, 仿真时需对种子和排种器材料属性进行设置。选用 8000 树脂作为加工材料, 故仿真试验中排种器特征参数与树脂材料保持一致, 以保证试验结果可靠性。此外玉

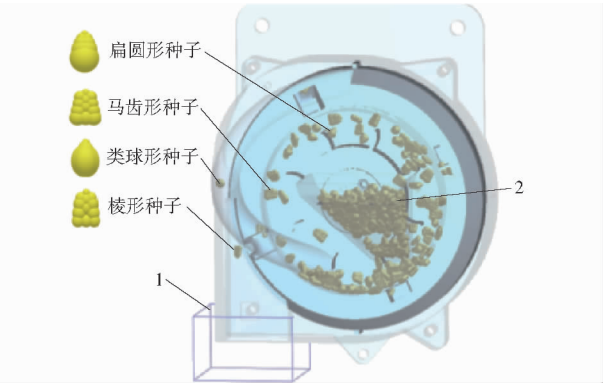


图 5 玉米排种器仿真模型

Fig.5 Simulation model of maize seed metering device
1. 数据监视器 2. 颗粒工厂

米种子间及种子与排种器间无黏附作用,仿真采用 Hertz - Mindlin(no slip) 接触模型,结合文献[28]确定玉米种子和排种器物理和力学特性参数如表 2 所示,以保证仿真试验结果与分析 and 实际情况一致。

在其他条件相同时,随机选取 10 粒从种箱进入排种器内腔的种子,记录并观察其运动轨迹与受力

表 2 玉米种子和排种器物理与力学特性参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of maize seeds and seed metering device

参数	数值
种子泊松比	0.40
种子剪切模量/Pa	1.37×10^8
种子密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 197.00
树脂泊松比	0.50
树脂剪切模量/Pa	1.77×10^8
树脂密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 180.00
种子-种子碰撞恢复系数	0.18
种子-装置碰撞恢复系数	0.62
种子-种子静摩擦因数	0.43
种子-装置静摩擦因数	0.46
种子-种子动摩擦因数	0.08
种子-装置动摩擦因数	0.09

情况,其运动轨迹如图 6 所示。由于种子刚进入扰种区时未接触扰种齿,所以取种子在 3 ~ 8 s 内的受力情况进一步分析,4 种不同扰种情况下种子受力情况如表 3 所示。

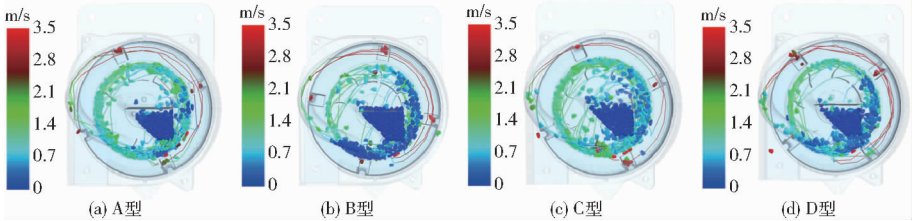


图 6 不同形状扰种齿作用下种子运动轨迹

Fig.6 Seed motion trajectory under action of seed-disturbing teeth with different shapes

表 3 不同形状扰种齿作用下种子受力情况

Tab.3 Seed force characteristics under action of seed-disturbing teeth with different shapes

扰种齿	平均值	最大值	N
A 型	6.92	16.06	
B 型	8.16	21.51	
C 型	12.42	25.96	
D 型	7.67	17.33	

由图 6 和表 3 可知,A 型扰种齿虽能够较稳定地扰动排种器内腔种子,但大多数种子只是沿着隔板壁进行圆周运动,通过网栅孔进入充种区的种子数量较少;但种子在 5 s 内受到的力最小,平均值约 6.92 N。B 型扰种齿易将种子铲起并使其随扰种齿转动,导致种子运动轨迹混乱,种子难以通过网栅孔,并且部分种子掉落在回种管道口附近,导致回流的种子在管道口的速度变慢,易造成堵塞。C 型扰种齿能使种子较顺利地进入网栅孔,但种子在充种区的轨迹较曲折,说明种子与扰种齿间的碰撞频繁,且种子在运动过程最大受力为 25.96 N,易导致种子产生裂纹。D 型扰种齿扰动效果较为稳定,此扰

种齿能够使种子沿着隔板壁进行圆周运动,且落点位于网栅孔左侧,同时齿上的填充面能保证种子顺利、稳定地进入网栅孔,有利于充种,同时种子在运动中的最大受力适中。因此对 B、C 和 D 型扰种齿结构进行进一步试验。

2.3 扰种齿高度对种子运动的影响

扰种齿高度 h 同样对排种性能有着重要影响。当扰种齿高度过低时,种群无法打破力链,不能对种群起到很好的扰动作用;当扰种齿高度过高时,排种器内腔种子全部被扰种齿带动起来并随着排种盘做圆周运动,导致种子到达网栅孔区时还在随着排种盘运动,无法顺利通过网栅孔结构进行充种,造成漏播。针对扰种齿高度为 9、10、11、12、13 mm 的情况,进行仿真试验,探究其对种群扰动规律。在其他条件相同时,随机选取 10 粒排种器内腔种子,记录并观察其运动轨迹,仿真结果如图 7 所示,对种子在 3 ~ 8 s 内的受力情况进一步分析,5 种不同条件下种子受力情况如表 4 所示。

由图 7 和表 4 可知,在相同工作条件下,当扰种齿高度较低,网栅孔附近的种子无法被充分扰动起

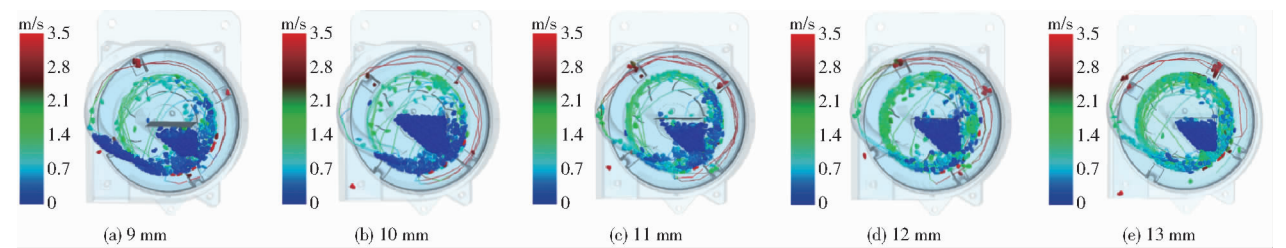


图 7 不同扰种齿高度作用下种子运动轨迹

Fig. 7 Seed motion trajectory under action of seed-disturbing teeth at different heights

表 4 不同扰种齿高度作用下种子受力情况
Tab. 4 Seed force characteristics under action of seed-disturbing teeth with different heights

扰种齿高度/mm	平均值/N	最大值/N
9	4. 62	10. 13
10	7. 59	13. 31
11	9. 69	16. 98
12	10. 11	17. 86
13	12. 42	35. 21

来,种子堆积在网栅孔和回种管道入口附近,导致进入充种区的种子数较少且易导致回种管道堵塞;当种子到达排种器最高处时,较多种子会掉落下来,导致种群分布混乱。当扰种齿高度为 10 mm 及以上时,扰种齿能够将网栅孔附近的种子充分扰动,回种管道中的种子不会出现堵塞现象。当扰种齿高度为 11、12 mm 时,对种子扰动效果较好,扰种齿能够及时清理堆积在网栅孔和回种管道入口附近的种子,使种子进行圆周运动,进入网栅孔种子数量适中且稳定。只有当较多的种子同时到达排种器上方时,会有少量种子掉落下来,此时种子受到的最大作用力小于 20 N。当扰种齿高度为 13 mm 时,种子受到的最大力达到 35. 21 N,易对种子造成机械损伤,甚至导致种子碎裂,影响排种器性能。由于种子受到挤压,在排种器内腔运动轨迹变得无规则,导致通过网栅孔种子数量不稳定。因此保证设计的扰种齿对种子有较好的扰动效果的同时,尽可能使种子不受到损伤,以扰种齿高度为 10、11、12 mm 的排种器进行后续研究。

2. 4 种群高度对排种器性能的影响

种箱安装高度决定排种器内腔种群高度,其对种子的受力及运动情况也有重要的影响,适当的种

群高度需保证种子顺利进入排种器内腔,同时不能影响回种管道工作效果。为了探究种群高度对排种器工作性能的影响,如图 8 所示,取种箱底部到投种口的垂直高度为种群高度 H ,分别对种群高度为 45、55、65、75、85 mm 的排种器进行仿真试验,分析不同排种器内腔种子的扰动情况。在其他条件相同时,随机选取 10 粒排种器内腔的种子,记录并观察其运动轨迹与受力情况,其运动轨迹如图 9 所示,取种子在 3 ~ 8 s 内的受力情况进一步分析。不同情况下种子受力和运动情况如表 5 所示。

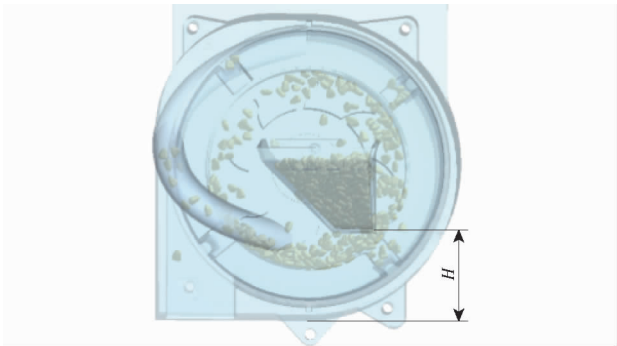


图 8 种群高度示意图

Fig. 8 Schematic of seed pile height

由图 9 和表 5 可知,在相同工作条件下,排种器内腔种子平均受力和运动速度随着种群高度增加而减小,即随着种群高度增加,排种器内腔种子数量也在增加。当种群高度为 45 mm 时,种子受力和速度均最大,但排种器内腔种子数量较少,通过网栅孔种子数量随机性较大,易导致重播和漏播情况出现;当种群高度大于 55 mm 时,种子受力情况适中,最大受力均未超过 20 N,且通过网栅孔种子数量比较稳定,有利于提高排种器工作稳定性。种群高度为 65 mm 时,进入网栅孔玉米种子数量比较适中,而种

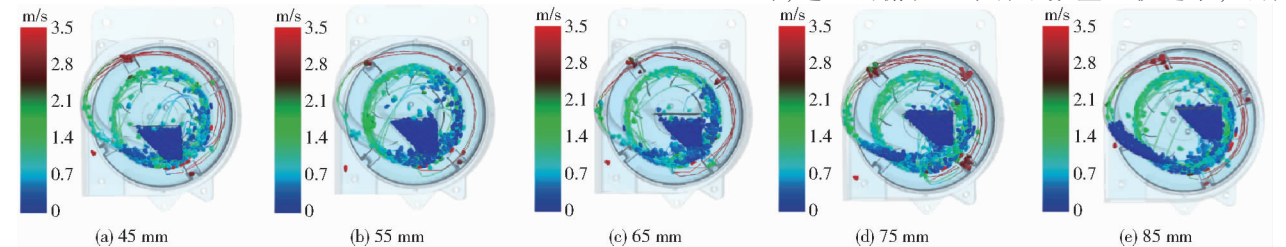


图 9 不同种群高度下种子运动轨迹

Fig. 9 Seed motion trajectory at different seed pile heights

表 5 不同种群高度作用下种子受力情况

Tab.5 Seed force characteristics under action of different seed pile heights

种群高度/mm	平均值/N	最大值/N
45	10.92	21.06
55	9.16	18.51
65	9.69	16.98
75	7.57	16.49
85	4.68	14.53

群高度为 75 mm 时,排种器内腔种子数量增多,通过网栅孔种子数量较多,种群易在回种管道的出口处堆积,导致回流种子在回种管道中的速度减小。而当种群高度为 85 mm 时,回种管道出口处的种子不能被及时清理,回种管道出现了堵塞现象。因此以种群高度为 55、65、75 mm 的排种器进行后续研究。

3 台架试验

3.1 试验材料与装置

以自主研发的高速精量排种器为试验目标,试验种子为未经过清选与分级的郑单 958 玉米种子(千粒质量 290.20 g,含水率 10.36%)。由于 JPS-12 型试验台最大速度为 12 km/h,不能满足该排种器最大工作速度 13 km/h 的要求。为此以试验台架和高速摄像(千眼狼,M230)配合数据采集系统开展排种器性能试验,验证播种质量,如图 10 所示。

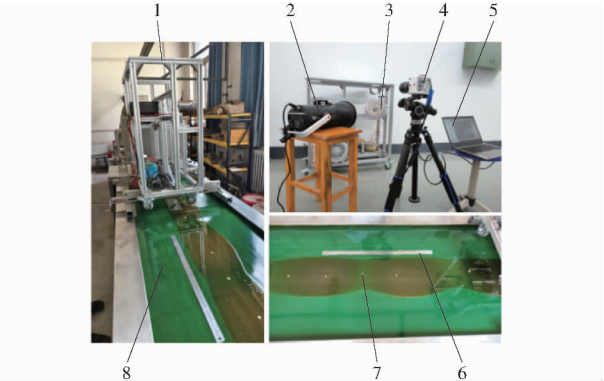


图 10 台架试验

Fig.10 Bench experiment

1. 台架 2. 补光灯 3. 排种器 4. 高速摄影机 5. 计算机
6. 钢尺 7. 种子 8. JPS-12 型试验台

图 11a 为高速摄影记录的排种器排出种子轨迹,通过摄像记录的视频回放可观测排种器内腔种子运动情况,如图 11b 所示。从图 11b 可以看到,排种器内腔种子随排种盘转动时,部分种子随排种盘转动呈短暂悬浮、贴壁滚动的状态(图中红圈标注区域)。

3.2 试验指标

根据玉米精量播种农艺要求设定试验中播种粒

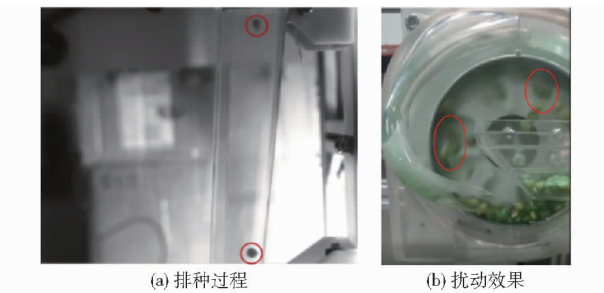


图 11 试验效果

Fig.11 Experimental effect

距为 200 mm,依据 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》,运用数据采集系统分别对试验指标破碎率 S 、合格率 H 、重播率 M 、漏播率 N 进行统计,以 251 粒稳定排出种子为 1 组试验,每组试验重复 3 次,以各指标平均值作为试验结果。

3.3 试验方案

单因素仿真试验结果表明,排种器扰种齿形状、扰种齿高度、种群高度均能影响排种器内腔种群的运动效果。在作业速度为 13 km/h 条件下,以扰种齿形状 x_1 、扰种齿高度 x_2 、种群高度 x_3 开展三因素三水平中心组合正交试验。试验因素编码如表 6 所示,试验方案与结果见表 7, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 6 试验因素编码

Tab.6 Experimental factors coding

编码	因素		
	x_1	x_2 /mm	x_3 /mm
-1	B	10	55
0	D	11	65
1	C	12	75

表 7 试验方案与结果

Tab.7 Experimental design and results

序号	因素			S /%	H /%	M /%	N /%
	X_1	X_2	X_3				
1	-1	-1	0	0.68	83.40	3.75	12.85
2	1	-1	0	0.78	83.64	4.66	11.70
3	-1	1	0	0.75	84.60	7.04	8.36
4	1	1	0	0.81	88.60	4.63	6.76
5	-1	0	-1	0.63	87.61	7.60	4.79
6	1	0	-1	0.83	88.76	5.99	5.25
7	-1	0	1	0.74	84.31	8.36	7.33
8	1	0	1	0.56	89.35	6.38	4.26
9	0	-1	-1	0.73	83.61	7.96	8.43
10	0	1	-1	0.82	86.70	6.48	6.82
11	0	-1	1	0.62	82.51	4.87	12.62
12	0	1	1	0.76	84.73	11.56	3.70
13	0	0	0	0.41	93.67	3.52	2.81
14	0	0	0	0.43	94.04	2.66	3.30
15	0	0	0	0.46	94.44	2.85	2.72
16	0	0	0	0.42	93.52	2.89	3.58
17	0	0	0	0.46	94.66	2.77	2.57

3.4 试验结果分析

3.4.1 回归模型建立与显著性分析

方差分析结果如表 8 所示,各评价指标 P 均小

于 0.01,试验效果极显著,表明回归方程拟合程度非常高;同时失拟项 P 大于 0.05,表明建立的回归方程可信度高。剔除不显著因素后,建立显著项影

表 8 回归方程方差分析结果
Tab.8 Variance analysis of regressions equation

方差来源	S		H		M		N	
	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	13.40	<0.000 1 **	159.36	<0.000 1 **	48.27	<0.000 1 **	161.79	<0.000 1 **
X_1	4.23	0.078 6	62.49	<0.000 1 **	14.65	0.006 5 **	27.26	0.001 2 **
X_2	14.23	0.007 0 **	75.52	<0.000 1 **	40.49	<0.000 4 **	397.79	<0.000 1 **
X_3	14.23	0.007 0 **	19.14	0.003 3 **	5.59	0.050 0	6.60	0.0371 *
X_1X_2	0.42	0.538 4	16.20	0.005 0 **	12.35	0.009 8 **	0.39	0.554 1
X_1X_3	37.74	0.000 5 **	17.33	0.004 2 **	0.15	0.706 9	23.64	0.001 8 **
X_2X_3	0.66	0.445 5	0.87	0.383 4	75.25	<0.000 1 **	101.65	<0.000 1 **
X_1^2	84.14	<0.000 1 **	166.84	<0.000 1 **	9.95	0.016 1 *	157.92	<0.000 1 **
X_2^2	143.83	<0.000 1 **	708.47	<0.000 1 **	35.01	0.000 6 **	710.25	<0.000 1 **
X_3^2	58.98	0.000 1 **	252.19	<0.000 1 **	222.20	<0.000 1 **	1.22	0.305 1
失拟项	2.88	0.166 8	0.83	0.544 2	0.29	0.897 3	0.33	0.803 5

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

响规律二次回归方程为

$$\begin{cases} S=0.44+0.04X_2-0.04X_3+0.1X_1X_3+0.14X_1^2+ \\ \quad 0.18X_2^2+0.12X_3^2 \\ H=94.06+1.31X_1+1.44X_2-0.72X_3+0.94X_1X_2+ \\ \quad 0.97X_1X_3-2.94X_1^2-6.06X_2^2-3.62X_3^2 \\ M=2.94-0.64X_1+1.06X_2-0.83X_1X_2+2.04X_2X_3+ \\ \quad 0.72X_1^2+1.36X_2^2+3.42X_3^2 \\ N=3.00-0.67X_1-2.50X_2+0.33X_3-0.88X_1X_3- \\ \quad 1.83X_2X_3+2.22X_1^2+4.70X_2^2 \end{cases}$$

(4)

3.4.2 交互因素显著项对性能指标影响

扰种齿形状、扰种齿高度及种群高度 3 个试验因素对破碎率的影响规律如图 12 所示。当扰种齿高度为零水平时,扰种齿形状不变的条件下,破碎率随着种群高度增大呈先下降后上升趋势。当种群高度过低时,种间相互挤压力小,难以有效通过网栅孔结构进入到充种区,频繁碰撞增加机械损伤风险。当种群高度不变时,反向的渐开线形扰种齿对种群的搅动作用过强,齿尖部位易损伤到种子,同时扰种齿会携带起种子一起运动,种子难以进入网栅孔。随着种子在排种器内腔运动时间增加,种子破碎概率增大,而带填充面的直线形扰种齿结构不能与玉米种子形状进行拟合,在扰动过程中与种子的碰撞激烈,造成伤种。带填充面的渐开线形扰种齿能够更好地与种子形状拟合,能更好地扰动种子且破碎率较低。

图 13~15 为各因素对合格率、重播率和漏播率

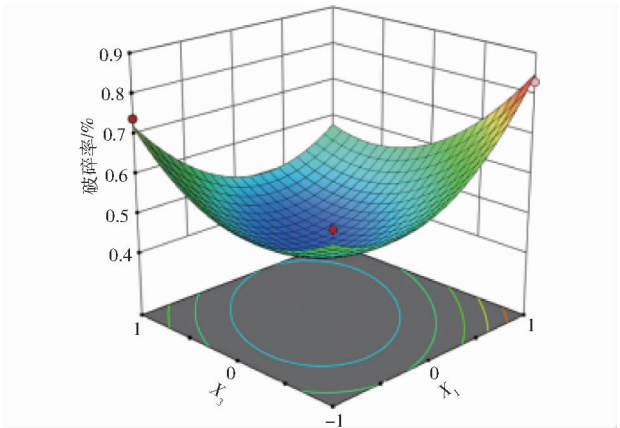


图 12 各因素交互作用对破碎率影响的响应曲面
($X_2=0$)

Fig.12 Response surface of influence of factor interaction on breakage rate

的影响规律。由图 13a、14a 可知,在种群高度为零水平、扰种齿形状不变时,随着扰种齿高度增大,合格率呈先升后降趋势,重播率呈先降后上升趋势。当扰种齿高度过低时,扰种齿无法将种子之间紧紧压覆形成的力链打破,进入网栅孔种子数量不稳定,导致合格率较低。随着扰种齿高度增加,种子能够稳定、顺利地进入充种区,合格率随之升高。当扰种齿高度过大时,种子与壳体挤压,种子在排种器内腔运动变得混乱,进入网栅孔种子数量不稳定,重播现象增多,合格率变低。在扰种齿高度不变情况下,使用 D 型扰种齿排种器合格率较高。B 型扰种齿易将种子铲起并使其随其转动,导致种子受力不均,轨迹混乱,充种困难;C 型扰种齿虽然能使部分种子较顺利地进入网栅孔,但同样由于排种器内腔种子的轨迹

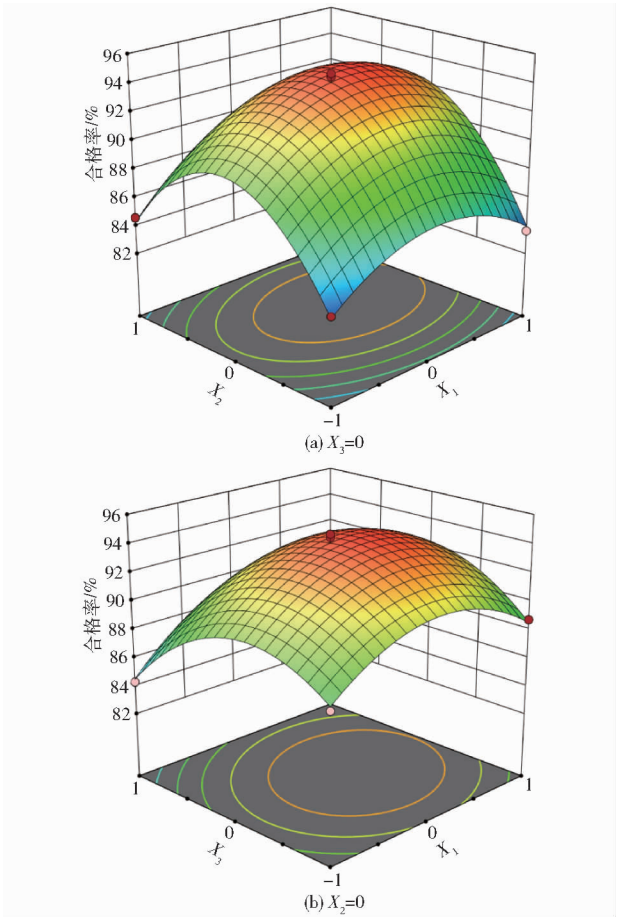


图 13 各因素交互作用对合格率影响的响应曲面
Fig. 13 Response surface of influence of factor interaction on qualified rate

较混乱,进入充种区种子数量不足,导致播种成功率不如带填充面的渐开线形扰种齿。

由图 13b、15a 可知,在扰种齿高度为零水平、扰种齿形状不变的情况下,随着种群高度增大,合格率呈先升后降趋势,漏播率表现出不同的变化趋势:随着种群高度增大,在 3 种扰种齿扰动下的漏播率均相对稳定,B 型扰种齿的漏播率略呈单调上升趋势,C 型扰种齿的漏播率略呈单调下降趋势,而 D 型扰种齿的漏播率基本恒定。当种群高度过低时,排种器内腔的玉米种子数量较少,种子难在排种器内腔均匀分布,进入网栅孔的种子数量波动大,导致合格率下降;当种群高度过高时,扰种齿难以充分破坏种群间的力链,合格率下降。

由图 14b、15b 可知,在扰种齿形状为零水平、扰种齿高度不变的情况下,随着种群高度增大,重播率呈先降后升趋势,漏播率随种群高度增加,表现出不同的变化趋势:当扰种齿高度较小时漏播率呈现单调上升趋势,当扰种齿高度较大时漏播率单调下降趋势。随着种群高度增大,当扰种齿高度较小时,种子更易堆积在网栅孔附近,难以进入充种区,因此更易发生漏播现象;当扰种齿高度较大时,种群高度

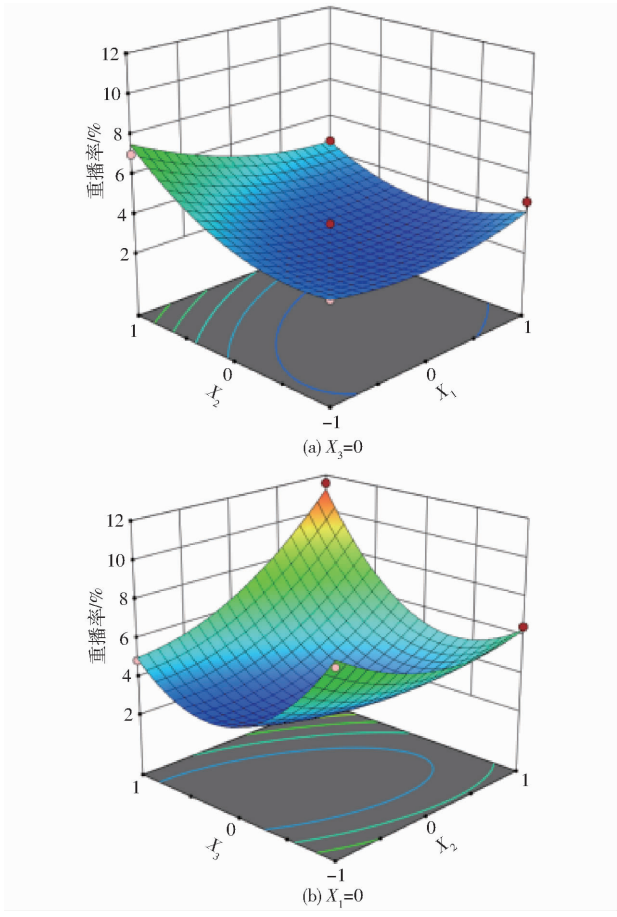


图 14 各因素交互作用对重播率影响的响应曲面
Fig. 14 Response surface of influence of factor interaction on multiple rate

的增加有利于扰种过程中充足的种子进入充种区,漏播现象随之减少。在种群高度不变的情况下,扰种齿高度过大或者过小,均会导致进入网栅孔种子数量不稳定,导致重播和漏播现象发生的概率变大。

3.5 参数优化与验证试验

为获得排种器最优工作参数组合,利用 Design-Expert 软件对回归模型优化求解,即

$$\begin{cases} \min S(X_1, X_2, X_3) \\ \max H(X_1, X_2, X_3) \\ \min M(X_1, X_2, X_3) \\ \min N(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} X_1 \in (B, C, D) \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

在作业速度为 13 km/h 情况下,扰种齿形状为 D 型、扰种齿高度为 11.20 mm、种群高度为 66.40 mm 时排种性能达到最优,此时种子破碎率为 0.41%,合格率为 94.81%,重播率为 2.65%,漏播率为 2.54%,与优化预期结果基本一致,且均达到排种要

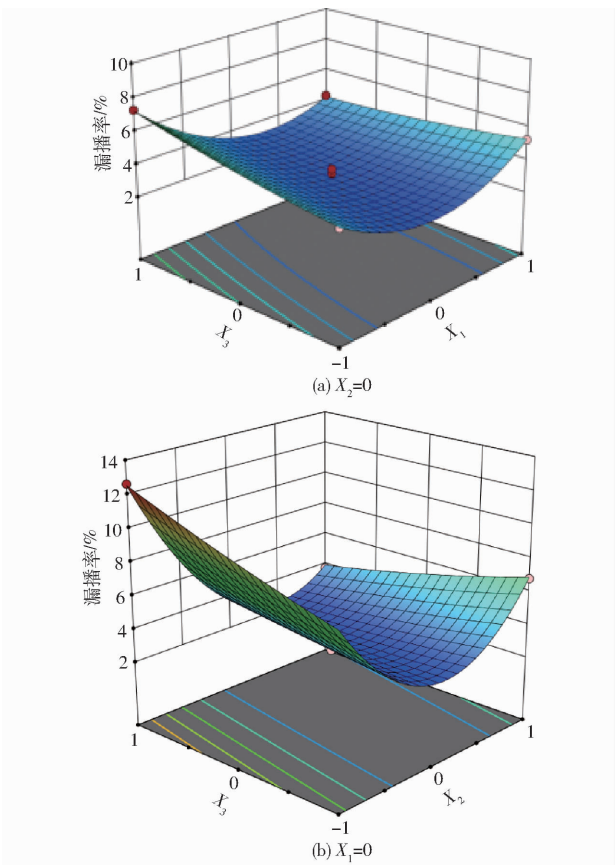


图 15 各因素交互作用对漏播率影响的响应曲面
Fig. 15 Response surface of influence of factor interaction on missing rate

求。为了验证优化结果准确性,在相同条件下重复进行 3 次验证试验取平均值,可得破碎率为 0.42%,合格率为 94.75%,重播率为 2.71%,漏播率为 2.54%,与优化预测结果基本一致。

3.6 性能对比试验

基于上述试验结果,以合格率、重播率和漏播率为评价指标,将本文排种器与原排种器作业性能进行对比:优化前,合格率为 91.54%,重播率为 5.67%,漏播率为 2.79%;优化后,合格率提升至 94.75%,较优化前提高 3.21 个百分点,表现出性能的改善;同时,重播率显著下降至 2.71%,较优化前降低 2.96 个百分点,漏播率则略有下降,从 2.79% 降至 2.54%,降低 0.25 个百分点。试验结果表明采用扰种齿可提高排种器工作性能。

4 结论

(1)为了提高种群流动性,对扰种结构进行了结构设计 with 理论分析,明确了扰种结构对种群的扰动促充原理,对扰种结构的主要参数进行了设计。

(2)采用离散元软件对扰种齿形状、扰种齿高度及种群高度对种群扰动与排种器性能的影响分析。结果表明,扰种齿结构为 B、C、D 型,扰种高度为 10、11、12 mm,种群高度为 55、65、75 mm 时有较好的扰种效果。

(3)搭建试验台架,利用高速摄像对取种和投种过程进行记录分析。结果表明,在作业速度为 13 km/h 情况下,D 型扰种齿、扰种齿高度 11.20 mm、种群高度 66.40 mm 时排种性能达到最优。

(4)对比试验结果表明,优化后排种器较原排种器合格率提高 3.21 个百分点。采用扰种齿可有效提升排种器作业性能,满足高速精量播种要求。

参 考 文 献

[1] KUMAR A, SAINI K S, DASILA H, et al. Sustainable intensification of cropping systems under conservation agriculture practices: impact on yield, productivity and profitability of wheat[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7468.

[2] 陈玉龙. 气吸机械复合式大豆高速精密排种器研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
CHEN Yulong. Research on high speed and precision seed metering device of soybean with pneumatic mechanical compound [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[3] ZHAO P, GAO X, LI J, et al. Investigation of seeding performance of a novel high-speed precision seed metering device based on numerical simulation and high-speed camera[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108563.

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

[5] 张红梅,张晨明,李志杰,等. 基于 EDEM – RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):36 – 46.
ZHANG Hongmei, ZHANG Chenming, LI Zhijie, et al. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding device based on EDEM – RecurDyn coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 34 – 46. (in Chinese)

[6] 唐汉,王紫恒,徐福东,等. 玉米高速精量排种器轮式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):316 – 327.
TANG Han, WANG Ziheng, XU Fudong, et al. Design and test of wheel-type seed guide device for high-speed maize precision seed metering apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 316 – 327. (in Chinese)

[7] 杨晓波. 玉米免耕精量播种机排种器及播种监控系统的使用问题分析[J]. 农机使用与维修,2024(10):81 – 84.

- YANG Xiaobo. Analysis of the usage issues of corn no-till precision seeding machine seed metering device and seeding monitoring system[J]. *Farm Machinery Using & Maintenance*, 2024(10): 81–84. (in Chinese)
- [8] 李彪,史孝杰,伦智民,等. 玉米精密排种器研究进展与展望[J]. *农业装备与车辆工程*, 2025, 63(7): 18–22.
LI Biao, SHI Xiaojie, LUN Zhimin, et al. Research progress and prospects of precision corn seed planters[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2025, 63(7): 18–22. (in Chinese)
- [9] 廖宜涛,谭钰,廖庆喜,等. 主要粮油作物精量播种技术与装备研究进展[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(9): 1–19.
LIAO Yitao, TAN Yu, LIAO Qingxi, et al. Research progress on precision seeding techniques and equipment for major grain and oil crops[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(9): 1–19. (in Chinese)
- [10] 刘刚. 常用精量排种器分析比较[J]. *农业科技与装备*, 2012(9): 27–30.
LIU Gang. Analysis and comparison of common precision seed dispensers[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2012(9): 27–30. (in Chinese)
- [11] LI C, CUI T, ZHANG D, et al. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139083.
- [12] 耿端阳,张明源,何珂,等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 68–76.
GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 68–76. (in Chinese)
- [13] XUE P, XIA X, GAO P, et al. Double-setting seed-metering device for precision planting of soybean at high speeds[J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(1): 187–196.
- [14] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 23–34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(13): 23–34. (in Chinese)
- [15] 刘彩玲,都鑫,张福印,等. 锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 56–65.
LIU Cailing, DU Xin, ZHANG Fuyin, et al. Design and test of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 56–65. (in Chinese)
- [16] JIA H, CHEN Y, ZHAN J, et al. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(2): 76–87.
- [17] GAO X, XIE Guanfu, LI Jiang, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 227: 161–181.
- [18] ENDRERUD H C. Influence of tube conguration on seed delivery to a coulter[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1991, 74(2): 177–184.
- [19] Tempo-high speed planters from Vaderstad [EB/OL]. (2019–08–05). <https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/>.
- [20] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 50–59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of high-speed air-suction seed dispenser with corn disturbance assisted sowing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 50–59. (in Chinese)
- [21] 李治民,安绍毅,杨丽,等. 气压式高速玉米精量排种器充-投种机理分析与结构优化[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(9): 62–72.
LI Zhimin, AN Shaoyi, YANG Li, et al. Analysis and structural optimization of filling and releasing mechanism for pneumatic high-speed precision maize seed-metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(9): 62–72. (in Chinese)
- [22] 郭鹏,郑效帅,王东伟,等. 气力辅助充种式花生精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 64–74.
GUO Peng, ZHENG Xiaoshuai, WANG Dongwei, et al. Design and experiment of precision seed metering device with pneumatic assisted seed-filling for peanut[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 64–74. (in Chinese)
- [23] 戴智博. 玉米品字形密植高速精量播种机气压式排种器设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2025.
DAI Zhibo. Design and testing of a pneumatic planter with high-speed precision sowing for maize in a triangular planting pattern [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [24] 孟华,李晓红,屈哲,等. 自扰动内充种式大豆精量排种器的设计与试验[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(11): 179–184.
MENG Hua, LI Xiaohong, QU Zhe, et al. Design and experiment of self-disturbed internal filling type soybean precision seed metering device[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(11): 179–184. (in Chinese)
- [25] DONG J, ZHANG S, ZHENG Z, et al. Development of a novel perforated type precision metering device for efficient and cleaner production of maize[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 443: 140928.
- [26] LI C, CUI T, ZHANG D, et al. Design shaped hole inserts by simulating and analysing the high-speed filling posture of maize seed particles [J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 232: 29–50.
- [27] 杨丽,李治民,张东兴,等. 离心式高速玉米精量排种器T形槽型孔设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 50–60.
YANG Li, LI Zhimin, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of T-shaped groove hole of centrifugal high-speed maize precision seed rower[J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(7): 50–60. (in Chinese)
- [28] 谢观福. 离心变径气力式玉米高速精量排种系统设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
XIE Guanfu. Design and experiment of centrifugal pneumatic maize high-speed precision seed allowance system [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)