

双盘气吸式玉米高速精量排种器设计与试验

陈超^{1,2} 李炳政^{1,2} 黄奕^{1,2} 金榜^{1,2} 张旭³ 王庆杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083;
3. 辽宁省农业机械化研究所, 沈阳 110000)

摘要: 针对气吸式排种器高速作业时存在充种时间不足、充种效果不好和播种均匀性欠佳等问题, 设计了一种双排盘、型孔交错布局的气吸式玉米高速精量排种器, 阐述了排种器的基本结构与工作过程, 对排种器充种过程受力和气室压强进行了理论分析, 确定了排种器的关键结构参数。通过 DEM - CFD 耦合仿真, 探究了排种器在不同真空度水平下的工作能力, 对比分析了扰种凸台对排种盘充种性能参数的影响, 结果表明设计的扰种凸台能有效提升充种性能。以合格指数、漏播指数和重播指数作为评价指标, 开展了工作速度、气室压力的单因素及双因素组合试验。结果表明, 作业速度为 12.14 km/h, 气室压力为 -5.15 kPa 时, 排种合格指数为 95.8%, 重播指数和漏播指数均为 2.1%, 满足玉米高速精量播种要求。

关键词: 玉米; 高速精量排种器; 气吸式; 双盘交错

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)05-0219-11

OSID:



Design and Experiment of Double-disk Pneumatic High-speed Precision Seed-metering Device for Maize

CHEN Chao^{1,2} LI Bingzheng^{1,2} HUANG Yi^{1,2} JIN Bang^{1,2} ZHANG Xu³ WANG Qingjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. Liaoning Institute of Agricultural Mechanization, Shenyang 110000, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient seed-filling time, poor seed-filling effect and unsatisfactory sowing uniformity of pneumatic precision seed meters during high-speed operation, a pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize with double seed metering disks and a staggered hole layout was designed. The basic structure and working process of the seed-metering device were elaborated, a theoretical analysis was conducted on the force acting on seeds during the seed-filling process and the air chamber pressure, and the key structural parameters of the seed-metering disks were determined. Through DEM - CFD coupled simulation, the working performance of the seed-metering device under different vacuum levels was explored, and the influence of seed-disturbing bosses on the seed-filling performance parameters of the seed-metering disks was compared and analyzed. The results showed that the designed seed-disturbing bosses could effectively improve the seed-filling performance. Taking the qualified index, miss-seeding index and multiple-seeding index as evaluation indicators, single-factor and two-factor combination experiments of operating speed and air chamber pressure were carried out. The results indicated that at an operating speed of 12.14 km/h and an air chamber pressure of -5.15 kPa, the seed metering qualified index reached 95.8%, while both the multiple-seeding index and miss-seeding index were 2.1%, which met the requirements of high-speed precision maize sowing. The research can provide ideas for the development of new high-speed precision maize sowing equipment.

Key words: maize; high-speed precision seed-metering; pneumatic; double disc staggered

0 引言

玉米精量机械化播种可以显著提升播种作业的精准度和效率,精量排种器是玉米高速播种机的核心部分,其性能直接决定整机的作业质量。排种器按取种原理的不同可分为机械式和气力式两大类型。其中,气力式排种器可减小种子因机械碰撞造成的损伤,适用性强,可用于高速作业^[1]。

针对气力式排种器高速作业时易出现充种合格率低的问题,许多学者进行了大量研究。杨丽团队设计了双侧协同清种装置,优化了型孔、充种盘等结构,实现了高速作业下播种精度与效率的协同优化^[2-4]。张开兴等^[5]设计了一种变粒径双圆盘气吸式精量排种器,无须更换圆盘便可实现不同粒径种子的精量播种。颜丙新等^[6]设计了排种盘和负压腔室同步旋转的精量排种器,各项指标优于国标要求,能够实现有效排种。史嵩等^[7-8]通过优化导种槽结构参数,并引入压力梯度算法用于 DEM - CFD 仿真优化,在高速作业、振动较强烈的条件下仍能保持稳定高效充种。韩丹丹等^[9-10]设计了一种具有双重清种作用的气吸式排种器,在较高作业速度小株距密植的情况下仍能保持优良的播种单粒性和均匀性。文献^[11-12]利用智能化控制和气流辅助投种,有效改善了播种过程中种子碰撞的问题,精量匀播性能较好。文献^[13-15]设计了双重扰动辅助充种及导种机构,有效提高种盘扰动能力,较少种群堆积现象。文献^[16-17]设计了一种双腔双盘交错同步回转的精量排种器,优化了排种盘等关键参数,能够实现玉米宽窄行品字形密植模式下的高速精量播种。初金星等^[18]设计了一种双腔双盘双种带排种器,通过更换排种盘可实现不同作物密植条件下的高速精量播种。

现有研究在高速精量播种领域取得一定研究成果,但针对高速作业时充种时间不足导致的播种均匀性欠佳的问题,有待进一步研究。鉴于此,本文设计一种双排种盘、型孔交错布局的气吸式玉米精量排种器,在同等作业参数条件下可显著降低排种盘转速,延长玉米种子充种时间,提高充种性能,降低漏播率,同时优化排种器结构参数、分析性能影响因素,为玉米高速精量播种技术的优化升级提供参考。

1 排种器结构与工作原理

双盘气吸式玉米精量排种器主要由左右对称的排种器壳体、清种刀、密封垫、排种盘、气室、传动轴等核心部件构成,如图 1 所示。从整体结构来看,其采用左右对称式布局设计,通过排种盘与气室形成

一个独立的腔体,两侧由排种盘和壳体构成两个充种区,两个规格参数一致的排种盘,以交错预设角度的方式装配于传动轴上,实现同步驱动下的相位差作业。

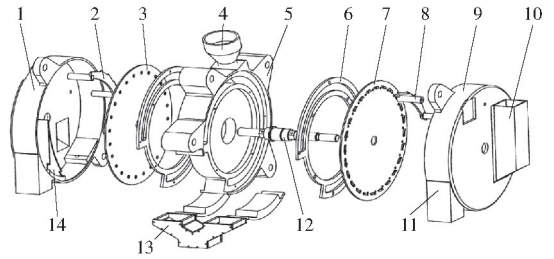


图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Schematic of seed-metering device structure

1. 左壳体 2. 左清种刀 3. 左排种盘 4. 气嘴 5. 气室 6. 密封垫 7. 右排种盘 8. 右清种刀 9. 右壳体 10. 进种口 11. 落种口 12. 传动轴 13. 导种管接头 14. 挡种板

排种器在工作时可以将其工作区域分为充种区 I、清种区 II、携种区 III 以及投种区 IV,如图 2 所示。在排种器启动作业前,玉米种子会在充种区内完成堆积,并形成特定的堆积高度。当排种器进入工作状态时,电机驱动排种盘以设定转速进行旋转,充种区内的玉米种子在自身重力、种群挤压压力、扰种凸台的机械扰动以及气流负压的共同作用下,被吸附于排种盘的型孔上,并随排种盘的旋转实现同步移动。当种子随排种盘进入清种区 II 时,清种刀会对型孔上吸附的多余种子进行剔除,被剔除的种子将重新回落至充种区 I,参与下一次充种循环。经过清种环节后,种子随排种盘进入携种区 III,并在此区域内继续随排种盘保持旋转状态。当种子进入投种区 IV 时,型孔所处位置的负压消失,种子在自身重力及离心力作用下脱离型孔,随后经导种管精准落入预设种沟,至此单次排种过程完成。该排种器的双排种盘错位安装使得型孔交错,在排种作业过程中,左右两侧排种盘能够实现有序交错排种,这种

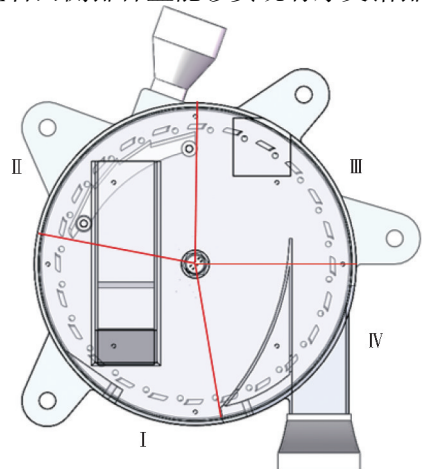


图 2 排种器工作区域示意图

Fig. 2 Seed-metering device working area diagram

设计可有效延长充种时间,进而显著提升充种效果。

2 关键部件设计与受力分析

2.1 排种盘设计

排种盘是实现精量排种的核心部件^[19],本文重点对排种盘的直径、型孔形状、扰种凸台结构进行设计。

2.1.1 排种盘直径

直径是排种盘最基础的尺寸参数。为探究气吸式排种器的排种盘尺寸与型孔充种时间之间的关系,建立运动学关系式,即

$$\begin{cases} V_1 = 2\pi rn_p \\ t = \frac{60\theta}{2\pi n_p} \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_1 ——型孔中心处线速度, m/s

r ——型孔中心所在圆半径, mm

n_p ——排种盘转速, r/s

t ——充种时间, s

θ ——充种角, rad

由式(1)可知,充种时间与充种角 θ 和转速 n_p 有关。根据《农业机械设计手册》^[20] 和实际作业要求,型孔中心线速度 $V_1 \leq 0.35$ m/s,经计算,确定型孔中心所在圆周半径 r 为 105 mm。为避免种子与外壳存在磕碰,型孔所在圆中心线与排种盘边缘距离一般为 15 ~ 20 mm,考虑到双盘气吸排种器的结构需要和平衡充种时间,确定排种盘直径 D 为 240 mm。考虑排种盘实际作业要求,确定排种盘厚度为 3 mm,材料为 6061 铝合金。

2.1.2 排种盘型孔设计

型孔是排种盘的关键结构,直接决定了播种的精度、稳定性和效率^[21]。常见的型孔有直孔、台阶孔和锥形孔 3 种类型,排种器工作时玉米种子的吸附姿态以侧卧为主^[22],锥形型孔入口直径缓慢变大,更有利于种子吸附,确定型孔为锥形孔,结构如图 3 所示。型孔直径 d 通常为玉米种子平均宽度的 0.64 ~ 0.66 倍。

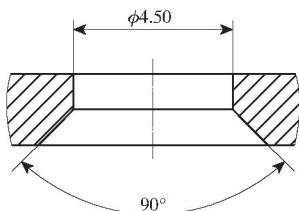


图3 锥形孔结构示意图

Fig.3 Schematic of conical hole structure

选用“郑单958”玉米种子,分级清选多次测量得到三轴平均尺寸为 10.1 mm × 5.7 mm × 4.2 mm,

本文取型孔直径 d 为 4.5 mm。

型孔数量也是排种盘的重要参数之一。型孔数 Z 与作业速度关系式为

$$Z = \frac{1\,000\pi r V_2}{1.8LV_1} \quad (2)$$

式中 V_2 ——播种机作业速度, km/h

L ——株距,取 250 mm

考虑作业要求,播种机作业速度 $V_2 \geq 12$ km/h,经计算,型孔数量 $Z \geq 36$ 。查阅文献得知,大多数单盘排种器的型孔数量为 26 个^[23],为了降低排种盘转速,增加充种时间,减小漏播风险,设置每个排种盘的型孔数量为 24,即 $Z = 48$ 。

由于排种器依靠左右排种盘的型孔交错分布来实现交替排种,在确定型孔数量之后,交错角 φ 计算公式为

$$\varphi = \frac{360}{Z} \quad (3)$$

经计算,交错角 φ 为 7.5°。

2.1.3 扰种凸台结构设计

在作业过程中,种子通过吸附作用定位于型孔表面,并需克服种群挤压应力随排种盘同步运动。为降低种群挤压载荷、提升充种效能,需在排种盘结构中增设扰种凸台机构。凸台通过对充种区域种子进行周期性扰动,促使种子在种群内部发生动态位置调整,使充种区内种子空间分布趋于均化,可有效弱化种子间的相互作用力,避免因局部种子堆积形成的充种阻塞问题,从而显著提高充种成功率。

为保证种子重心有效吸附于型孔中心,同时保证种子外周边缘能够与凸台相接触,因此设计凸台半径 $r_0 = 5.5$ mm。玉米种子最大长度为 14 mm^[24],为实现对最长玉米种子的可靠托持,相邻两个凸台之间的间距设定为 15 mm。结合玉米种子尺寸,设计凸台总高度为 2.5 mm。每个型孔旁边设置一个扰种凸台,结构如图 4 所示。

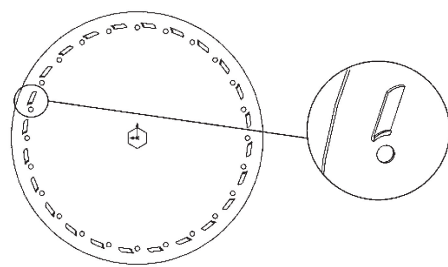


图4 凸台结构图

Fig.4 Schematic of notched platforms

2.2 充种过程受力分析

忽略机器振动等其他外界因素,分析理想情况下充种过程种子的受力情况,示意图如图 5 所示。充种后种子被吸附在型孔上随排种盘一起转动,种

子主要受到离心力 J 、重力 G 、种子和排种盘之间的摩擦力 F_f 、支持力 F_N 、负压吸力 F_0 等作用。

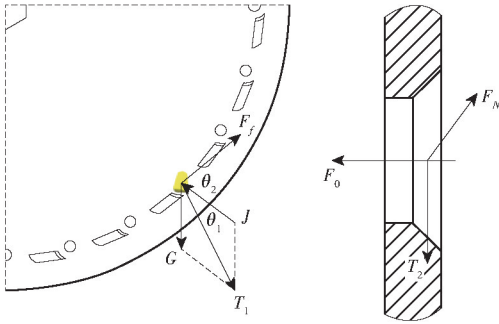


图5 充种区种子受力图

Fig. 5 Force diagram of seeds in charging area

为了保证种子能够克服种群阻力的干扰,气室提供的负压吸力应能使吸附在型孔上的种子稳定地离开充种区^[25],因此充种后种子需要满足条件

$$\begin{cases} F_0 \frac{d}{2} = T_2 C \\ P_0 = \frac{F_0}{S_0} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$$

式中 T_2 —— J 、 G 、 F_f 的合力, N

P_0 ——理想临界压强, kPa

S_0 ——型孔截面积, mm^2

C ——种子重心到排种盘的距离, mm

结合式(4),得出理想临界压强为

$$P_0 = \frac{8T_2 C}{\pi d^3} \quad (5)$$

通过余弦定理来求出合力 T_1 和 T_2 , 即

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\theta_1} \\ T_2 = \sqrt{T_1^2 + F_f^2 + 2T_1 F_f \cos\theta_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_1 —— J 和 G 的合力

θ_1 —— J 和 G 的夹角

θ_2 —— T_1 和 F_f 的夹角

将式(6)代入式(5)中,得到

$$P_0 = \frac{8C \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\theta_1 + F_f^2 + 2F_f \cos\theta_2} \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\theta_1}}{\pi d^3} \quad (7)$$

考虑机器振动、天气和土壤环境等外界条件,引入吸种可靠性系数 a_1 、工作可靠性系数 a_2 和环境可靠性系数 a_3 来对公式(7)进行修正,得到修正后的实际临界压强 P_0^* 为

$$P_0^* = \frac{8C a_1 a_2 a_3 \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\theta_1 + F_f^2 + 2F_f \cos\theta_2} \sqrt{G^2 + J^2 + 2GJ\cos\theta_1}}{\pi d^3} \quad (8)$$

在满足临界条件 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2 = 1$ 时,得到最大临界压强为

$$P_{0\max}^* = \frac{8CGa_1 a_2 a_3 \left(1 + \frac{\omega}{g} + \lambda\right)}{\pi d^3} \quad (9)$$

式中 λ ——种子摩擦阻力综合系数

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

ω ——排种盘角速度

由式(9)可知,型孔所需最大临界压强与种子的物理特性、排种盘转速、型孔直径等因素有关。为确保田间高速作业时玉米种子能够稳定吸附在型孔上而不脱落,气室所需负压应大于所求的最大临界压强。压强越大则种子吸附越牢固,充种效果更好,但负压过大也会导致“多粒吸附”,且难以被清种刀清除,导致排种精度下降。考虑到本设计为双盘排种器,型孔较多,对气流的损失和需求更大,因此取气室负压为 $4 \sim 6 \text{ kPa}$ 。

3 双盘排种器仿真试验分析

为探究双盘排种器参数、作业参数对排种器性能的影响,利用 DEM - CFD 对排种器开展仿真试验。

3.1 双盘排种器仿真试验模型

选取“郑单 958”马齿形玉米种子为样本,建立玉米种子仿真模型,如图 6 所示,图中分别为玉米种子实物、玉米种子三维模型以及玉米种子离散元模型,忽略种子的形变、破损等情况。

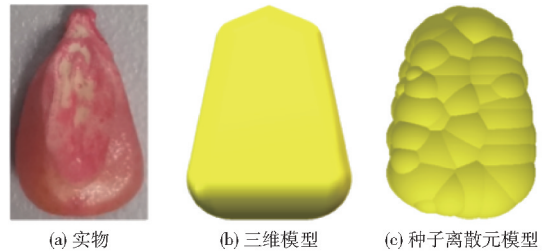


图6 玉米种子仿真模型

Fig. 6 Maize seed simulation models

由于排种器模型较为复杂,且部分结构对流动场并无影响,将三维模型简化为气室、密封垫、排种盘和外壳,在 SpaceClaim 中抽取流体域模型,并将流体域模型导入 Fluent Meshing 进行网格划分,生成的体网格模型如图 7 所示,网格尺寸为 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$,总网格数为 86 万,质量因子达 0.8 以上。

3.2 基于 CFD 的双盘排种器流体仿真分析

双盘气吸式玉米精量排种器依靠风机提供的吸力来吸附玉米种子,真空度水平直接影响种子吸附效能。为探究不同真空度条件下排种器内部流场的分布特征和变化规律,在转速为 20 r/min 的条

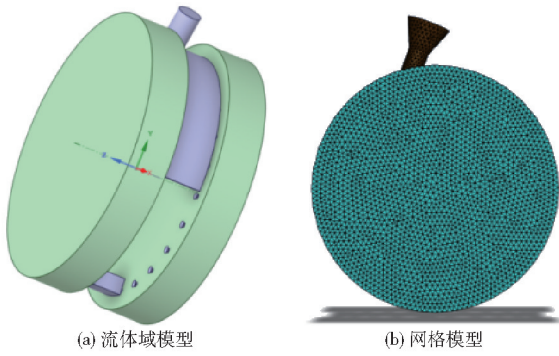


图 7 排种器仿真模型

Fig. 7 Seed-metering device simulation models

件下,选取 -3、-4、-5、-6 kPa 4 个气室压力进行仿真试验,利用 CFD-Post 后处理软件对流场数据进行可视化处理,获取气室中间面压力云图、负压最大处型孔截面压力云图及速度云图,如图 8 所示。

分析图 8 可知,不同进气口压力下排种器内部流场呈现显著差异:当进气口压力为 -3 kPa 时,因负压强度不足,气流在气室内部发生剧烈衰减,当压力迅速降至 -1 kPa 以下,充种区气压接近 0 Pa;此时型孔处负压值偏低,且两侧压降梯度过大,型孔中心气流速度仅约 25 m/s,无法满足高质量充种的基本要求。随着进气口压力绝对值的增大,气室中间

面负压、型孔处负压及型孔中心气流速度均呈递增趋势:在 -4 kPa 工况下,仅进气口附近局部区域负压达 -2 kPa 左右,整个负压腔及型孔压力处于 -1.2 kPa 以下,型孔中心气流速度低于 30 m/s;在 -5 kPa 工况下,负压大于等于 -2 kPa 的区域显著扩展并覆盖部分清种区与携种区,型孔局部区域负压突破 -2 kPa,中心气流速度提升至 35 m/s 左右;在 -6 kPa 工况下,负压大于等于 -2 kPa 的区域进一步扩展至全部清种区及携种区,型孔超半数区域负压达 -1.5 kPa 以上,中心气流速度升至 40 m/s 左右,排种器内部流场压力与流速均处于较高水平。

基于上述流场特征分析,可得出以下结论:真空度是影响排种器内部负压分布的关键因素,负压呈现“进气口近区高于远区”的空间分布特征;气室及型孔处负压、型孔中心气流速度均随真空度的增大而显著提升。

为更直观地揭示真空度对排种器内部流场的影响规律,对所有型孔处压力及气流流速进行仿真。对型孔进行系统化编号处理。由于左右排种盘对称布置,仅型孔交错一定角度,在排种过程中性能一样,可选取单侧排种盘的型孔作为研究对象,按功能区域划分为 1~5 号(充种区)、6~13 号(清种区)、14~19 号(携种区)及 20~24 号(投种区),具体编

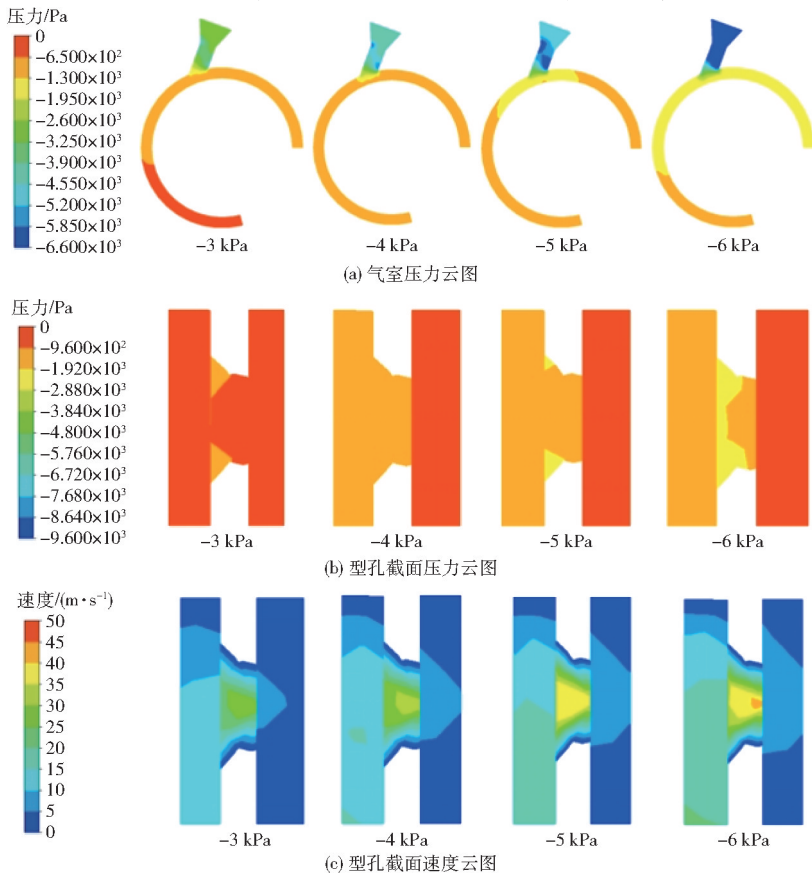


图 8 仿真结果云图

Fig. 8 Simulation result cloud maps

号方案如图9所示。

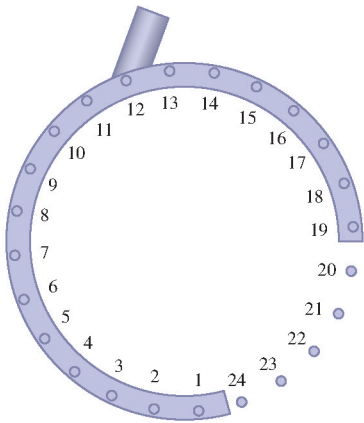


图9 型孔编号示意图

Fig. 9 Schematic of hole numbering

通过后处理软件提取不同真空度工况下各编号型孔的压力与气流流速数据,统计结果分别如图10、11所示。

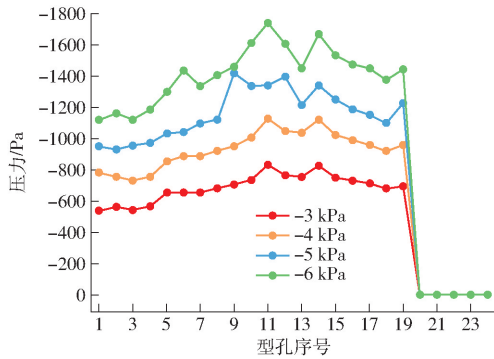


图10 不同气室压力下型孔压力变化曲线

Fig. 10 Pressure variation curves of metering hole under different air chamber pressures

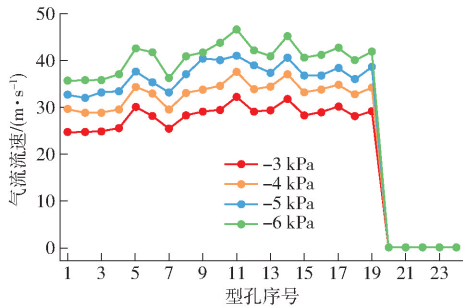


图11 不同气室压力下型孔气流流速变化曲线

Fig. 11 Flow velocity variation curves of metering hole under different air chamber pressures

分析图10、11可知,各型孔的压力及气流流速均随真空度的增大而呈现递增趋势,在空间分布上总体表现为“中间大、两头小”,体现了负压能量传递存在显著的空间衰减效应。该结果与前述流场图分析结论吻合,进一步验证了真空度仅对排种器内部流场的压力及气流流速幅值产生影响,而不会改变压力场与流速场的基本分布规律。

3.3 基于DEM-CFD的双盘排种器耦合仿真分析

在进行DEM-CFD耦合仿真时,需分别对Fluent软件和EDEM软件设置参数。EDEM仿真中与种子接触的壳体、排种盘的材料均为6061铝合金,相关参数如表1所示。为模拟实际充种状态,在两侧进种口各设置一个颗粒工厂用于生成玉米种子,每侧充种区生成300粒玉米种子。以左侧排种盘为例,耦合仿真过程如图12所示,结果表明设计的排种器可以有效地完成充种、清种、携种及投种流程,验证了该结构设计的可行性。

表1 耦合仿真参数

Tab. 1 Coupled simulation parameters

项目	参数	数值
玉米种子	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.42×10^8
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1210
排种器	泊松比	0.33
	剪切模量/Pa	2.6×10^{10}
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
玉米-玉米	碰撞恢复系数	0.202
	静摩擦因数	0.334
	动摩擦因数	0.065
玉米-排种器	碰撞恢复系数	0.88
	静摩擦因数	0.49
	动摩擦因数	0.012

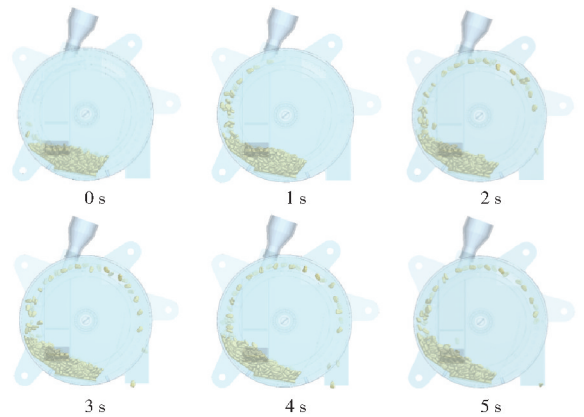


图12 耦合仿真过程图

Fig. 12 Diagram of coupled simulation process

3.4 扰种凸台仿真试验对比分析

扰种凸台可以增大种群的流动性和离散程度,减小种群内部的摩擦力,从而提高充种率。为探究凸台对充种性能的影响,设计对比试验:设置排种盘转速为20 r/min,采集充种区域内的玉米种子平均动能和平均速度,其变化曲线如图13所示。

分析图13可知,有凸台的排种盘对应的种子平均动能及平均速度整体更高,且数值波动更为平稳。这一现象表明在凸台的扰动下充种区的玉米种子运动加剧,无序性和流动性增大,从而对充种效果起到

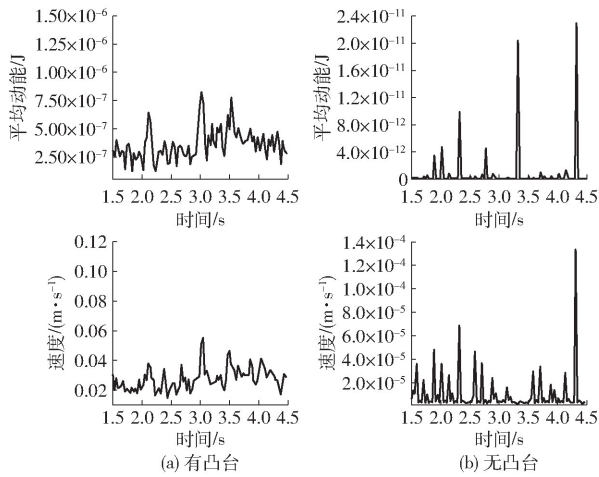


图13 种子平均动能和速度变化曲线

Fig. 13 Variation curves of average kinetic energy and velocity of seeds

了积极促进作用。进一步验证了扰种凸台的结构设计合理,能够有效增大种群的离散程度,改善充种效果。

4 双盘排种器台架试验

4.1 试验条件

为探究双盘气吸式玉米精量排种器的最优排种性能,在辽宁省农业机械化研究所使用 JPS - 12 计算机视觉排种器试验台开展了台架试验。试验装置如图 14 所示,配备有风机、高速摄像机、种床带、控制柜、变频器等,可实时采集种子位置、种距、作业速度、漏播、重播等信息,种距测量精度为 ±2 mm,种床带速度为 1.5 ~ 16 km/h。在台架试验中,使用“郑单 958”玉米种子,选定 8、10、12、14、16 km/h 5 个作业速度,设置 -4.0、-4.5、-5.0、-5.5、-6.0 kPa 5 个气室压力,粒距为 25 cm,每组试验采集 300 粒种子进行统计,共进行 5 组试验,每组试验重复 3 次取平均值,以合格指数、漏播指数和重播指数作为评价指标,分别进行工作速度和气室压力的单因素试验和双因素组合试验。



图14 排种器台架试验台

Fig. 14 Seed-metering device bench test bench

4.2 试验结果分析

4.2.1 作业速度单因素试验

单盘气吸式玉米排种器的作业速度一般在 10 km/h 以下,本文所设计的双盘气吸式玉米精量排种器可适用于高速作业,试验选取作业速度范围

为 8 ~ 16 km/h,气室压力为 -5 kPa,作业速度单因素试验结果如表 2 所示。

表 2 作业速度单因素试验结果

Tab. 2 Results of single-factor test on operation

作业速度/ (km·h ⁻¹)	合格指数	重播指数	漏播指数
8	90.8	8.1	1.1
10	93.6	5.1	1.3
12	95.5	2.3	2.2
14	94.0	2.5	3.5
16	91.7	2.9	5.4

数据显示,合格指数随作业速度的增加呈现出先升后降的变化趋势,重播指数整体下降,漏播指数逐渐增加。尽管合格率在小于 14 km/h 速度区间内总体提高,但在 8 ~ 10 km/h 条件下,仍存在较为突出的重播问题。其原因可能是该速度阶段内,型孔在充种区的停留时间较长,且种群整体流动性不足,易导致多粒吸附,造成重播。作业速度为 12 km/h 时充种时间适中,吸附过程稳定,有效降低重播率,合格率亦达到最高,表明此速度条件下吸附效率与稳定性达到了较为理想的平衡状态。当速度提高至 14 km/h 到 16 km/h 时,合格指数开始下降,重播指数略有回升,漏播指数则明显增加。这可能是由于充种时间缩短,部分型孔吸附不充分,出现漏播。同时,单个型孔可能同时吸附多粒种子,进而使重播率上升,进一步影响合格率。综合分析,作业速度在 10 ~ 14 km/h 范围内,排种器性能相对稳定。其中,作业速度为 12 km/h 表现最佳,能在保持较高合格率的同时,有效抑制重播与漏播。

对作业速度单因素试验结果进行方差分析,结果如表 3 所示。结果表明,作业速度对合格指数、重播指数和漏播指数均存在显著影响 ($P < 0.001$),说明作业速度对排种器的工作性能有较大影响,作业速度 12 km/h 左右,排种器性能最优。

表 3 作业速度单因素试验结果方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of one-factor test results of operation speed

评价指标	差异源	自由度	平方和	均方	F	P
合格指数	组间	4	34.92	8.73	29.1	<0.001
	组内	10	2.96	0.296		
	总计	14	37.88			
重播指数	组间	4	66.51	16.63	108.64	<0.001
	组内	10	1.53	0.153		
	总计	14	68.04			
漏播指数	组间	4	31.14	7.785	20.76	<0.001
	组内	10	3.75	0.375		
	总计	14	34.89			

4.2.2 气室压力单因素试验

将作业速度设置为最优速度 12 km/h, 进行气室压力单因素试验, 结果如表 4 所示。表 4 数据显示, 随着气室压力的增大, 合格指数呈现出先增大后减小的趋势, 气室压力为 -5 kPa 时, 合格指数达到峰值, 为 95.5%。随着气室压力的增大, 重播指数呈上升趋势, 其中压力在 -4.0 ~ -5.0 kPa 时, 重播指数平稳, 但当压力绝对值大于 5.0 kPa 时, 重播指数急剧增大。低压条件下型孔的气流吸力较小, 被吸附在型孔边缘处的玉米种子会在种群间的挤压力、自身重力和清种刀挤压力下掉落, 而高压条件下, 气流吸力大, 容易形成多粒吸附, 从而造成重播指数明显上升。

表 4 气室压力单因素试验结果

Tab.4 Results of single factor test of air chamber

pressure		%	
气室压力/kPa	合格指数	重播指数	漏播指数
-4.0	90.5	2.2	7.3
-4.5	93.7	2.0	4.3
-5.0	95.5	2.2	2.3
-5.5	94.3	4.2	1.5
-6.0	92.2	6.7	1.1

对气室压力单因素试验结果进行方差分析, 如表 5 所示。结果表明, 气室压力对合格指数、重播指数和漏播指数有显著影响, 说明气室压力对排种器的工作性能有较大影响, -5.0 kPa 时排种器排种效果最优。

表 5 气室压力单因素试验结果方差分析

Tab.5 Analysis of variance of one-factor test results of air chamber pressure

评价指标	差异源	自由度	平方和	均方	F	P
合格指数	组间	4	34.51	8.628	12.45	<0.001
	组内	10	6.93	0.693		
	总计	14	41.44			
重播指数	组间	4	18.24	4.56	6.78	0.007
	组内	10	6.72	0.672		
	总计	14	24.96			
漏播指数	组间	4	62.13	15.53	21.09	<0.001
	组内	10	7.08	0.708		
	总计	14	69.21			

4.2.3 二次旋转正交回归组合试验

为确定作业速度和气室压力的交互作用对排种器工作性能的影响, 探究排种器的最佳工作参数组合, 以单因素试验为基础, 开展二次旋转正交回归组合试验, 试验因素编码如表 6 所示。作业速度和气室压力分别有 5 个水平, 试验总共 13 组, 每组重复 3 次取平均值, 每次测定 300 粒玉米种子。

表 6 正交试验因素编码

Tab.6 Orthogonal test factor codes

编码	因素	
	作业速度/(km·h ⁻¹)	气室压力/kPa
-1.414	9.172	-4.293
-1	10	-4.5
0	12	-5.0
1	14	-5.5
1.414	14.828	-5.707

13 组试验结果如表 7 所示, X_1 、 X_2 为作业速度和气室压力编码值。对合格指数、重播指数及漏播指数的试验结果进行方差分析, 结果如表 8 所示, 并得到合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 及漏播指数 Y_3 的回归方程

$$\begin{cases} Y_1 = 95.23 + 0.3756X_1 - 0.3108X_2 + 0.09X_1X_2 - \\ \quad 1.88X_1^2 - 2.33X_2^2 \\ Y_2 = 2.17 - 0.2538X_1 - 0.1523X_2 + 1.2X_1X_2 + \\ \quad 1.01X_1^2 + 2.91X_2^2 \\ Y_3 = 2.60 - 0.1218X_1 + 0.4631X_2 - 1.29X_1X_2 + \\ \quad 0.8735X_1^2 - 0.5790X_2^2 \end{cases} \quad (10)$$

表 7 正交试验结果

Tab.7 Orthogonal test results

序号	因素		Y_1	Y_2	Y_3
	X_1	X_2			
1	0	1.414	90.2	8.0	1.8
2	0	0	95.5	2.4	2.1
3	0	0	95.3	2.1	2.6
4	1.414	0	91.9	3.7	4.4
5	-1.414	0	90.9	4.8	4.3
6	-1	-1	91.2	7.5	1.3
7	1	-1	91.8	5.0	3.2
8	0	0	94.7	2.2	3.1
9	1	1	91.2	6.8	2.0
10	0	0	95.1	2.1	2.8
11	0	-1.414	90.7	8.2	1.1
12	-1	1	90.2	4.7	5.1
13	0	0	95.7	2.1	2.2

为更直观地展示作业速度与气室压力对排种性能的交互作用, 基于试验数据构建双因素交互作用响应面, 结果如图 15 所示。图 15 中反映了作业速度与气室压力在不同组合条件下对合格指数、重播指数及漏播指数的综合影响规律。从合格指数的响应曲面图可见, 该指标在作业速度为 10 ~ 14 km/h、气室压力为 -5 ~ -5.5 kPa 范围内表现较高, 整体呈现“中间高、边缘低”的分布特征。随着气室压力由 -4 kPa 逐渐增大至 -5 kPa, 合格指数显著上升, 表明适度提升负压有助于提高种子吸附稳定性。然

表8 合格指数、重播指数、漏播指数回归方程方差分析

Tab.8 Analysis of variance of regression equation of qualified index, miss-seeding index and multiple-seeding index

方差来源	合格指数 Y_1					重播指数 Y_2					漏播指数 Y_3				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	57.27	5	11.45	113.02	<0.0001**	68.08	5	13.62	250.19	<0.0001**	17.17	5	3.43	20.4	0.0005**
X_1	1.18	1	1.13	11.14	0.0125*	0.5154	1	0.5154	9.47	0.0179*	0.1187	1	0.1187	0.7052	0.4288
X_2	0.7726	1	0.7726	7.62	0.028*	0.1857	1	0.1857	3.41	0.1072	1.72	1	1.72	10.19	0.0152*
X_1X_2	0.0324	1	0.0324	0.3197	0.5894	5.74	1	5.74	105.4	<0.0001**	6.63	1	6.63	39.39	0.0004**
X_1^2	24.58	1	24.58	242.57	<0.0001**	7.04	1	7.04	129.43	<0.0001**	5.31	1	5.31	31.54	0.0008**
X_2^2	37.76	1	37.76	372.61	<0.0001**	58.86	1	58.86	1081.56	<0.0001**	2.33	1	2.33	13.86	0.0074**
残差	0.7093	7	0.1013			0.3809	7	0.0544			1.18	7	0.1683		
失拟	0.1437	3	0.0479	0.3386	0.7998	0.3015	3	0.1005	5.06	0.0756	0.5089	3	0.1696	1.01	0.4742
误差	0.5657	4	0.1414			0.0794	4	0.0199			0.6693	4	0.1673		
总和	57.98	12				68.46	12				18.35	12			

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

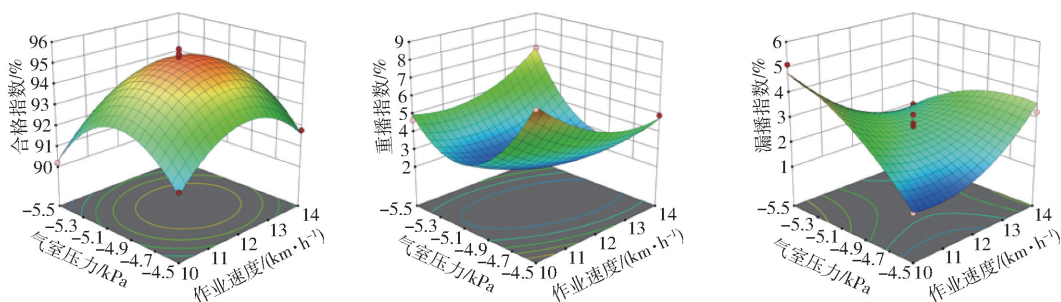


图15 双因素交互作用响应面

Fig.15 Response surface for two-factor interaction

而,当负压进一步增大,合格指数趋于平缓甚至下降,过强吸力导致种子重播概率增加。此外,作业速度对合格指数的影响更为敏感,当速度超过 12 km/h 时,合格率明显下降,表明高速运行易引发漏播或排种不均等问题。重播指数随气室压力的升高而增大,在较高负压条件下,型孔更易吸附多粒种子,导致重播现象加剧。作业速度在一定程度上对该现象具有缓解作用,但当速度过高时,吸附时间缩短,反而增加漏播风险。漏播指数与作业速度呈正相关,随速度增加而呈上升的趋势,尤其在超过 12 km/h 时漏播率提高明显。同时,当气室压力不足时,吸附能力不足也会使漏播指数升高,说明为保证吸附可靠性,气压需维持在一定水平以上。为了得到作业速度和气室压力大的最优组合,以合格指数最大、重播指数和漏播指数最小为优化目标,建立最优工作参数优化方程,即

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.414 \leq X_1 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_2 \leq 1.414 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

经计算得到排种性能最优的作业参数组合:作业速度为 12.14 km/h、气室压力为 -5.15 kPa,此时合格指数为 95.8%,重播指数和漏播指数均为

2.1%。对优化结果进行试验验证,偏差均在 0.2% 以内。结果表明,该排种器在优化参数条件下能够实现较高的排种精度,满足玉米高速精量播种的作业要求。

5 结论

(1) 针对气吸式排种器高速作业时充种时间不足导致的充种效果不好和播种均匀性欠佳等问题,设计了一种双排种盘、型孔交错布局的气吸式玉米精量排种器,阐述了排种器的基本结构与工作过程,确定了排种器的关键结构参数,对排种器充种过程进行了理论分析。

(2) 探究了排种器在不同真空度水平下排种器各型孔压力及气流流场分布规律,结果表明,真空度越大,内部流场的压力和流速越大,但真空度不影响流场分布规律,确定了进气口压力为 -4 ~ -6 kPa。对比分析了扰种凸台对种子的扰动和托持作用,结果表明,凸台能够显著提高充种性能。

(3) 以作业速度和气室压力为影响因素,以合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标,进行了单因素试验和二次旋转正交回归组合试验。通过响应面优化方法,确定了最优作业参数组合为:作业速度 12.14 km/h,气室压力 -5.15 kPa,此时合格指数为 95.8%,重播指数和漏播指数均为 2.1%。

参 考 文 献

- [1] 郭文骐, 张文毅, 祁兵, 等. 气力式高速精量排种器研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(3): 31-37.
GUO Wenqi, ZHANG Wenyi, QI Bing, et al. Research status and prospects of pneumatic high speed precision seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(3): 31-37. (in Chinese)
- [2] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 29-39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29-39. (in Chinese)
- [3] 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 the T-shaped hole of centrifugal high-speed maize precisionseed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 50-60. (in Chinese)
- [4] LI C, ZHANG D, YANG L, et al. Research on a centrifugal high-speed precision seed metering device for maize with airflow-assisted seed filling and cleaning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109434.
- [5] 张开兴, 李金凤, 宋正河, 等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52-63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52-63. (in Chinese)
- [6] 颜丙新, 张东兴, 崔涛, 等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 15-23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15-23. (in Chinese)
- [7] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54-66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54-66. (in Chinese)
- [8] 史嵩, 周纪磊, 刘虎, 等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 61-70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61-70. (in Chinese)
- [9] 韩丹丹, 王清, 颜君坤, 等. 气吸式绿豆密植精量排种器的优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 147-157.
HAN Dandan, WANG Qing, YAN Junkun, et al. Optimization and experiment of an air-suction mung bean precision seed-metering device[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(9): 147-157. (in Chinese)
- [10] 韩丹丹, 何彬, 周毅, 等. 气吸式密植精量排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 237-247.
HAN Dandan, HE Bin, ZHOU Yi, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 237-247. (in Chinese)
- [11] 程修沛, 李洪文, 王庆杰, 等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 30-38.
CHENG Xiupai, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 30-38. (in Chinese)
- [12] 王龙宝, 杨翰瑜, 王庆杰, 等. 小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 111-120.
WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of air-assisted linear seeding device for wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 111-120. (in Chinese)
- [13] 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 corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50-59. (in Chinese)
- [14] YAN J, WU G, LIU R, et al. Design and experimentation on a pneumatic corn seed metering sevice with sssisted seed-filling and airflow-guided seed release[J]. Agriculture, 2025, 15(7): 745.
- [15] 刘瑞, 刘云强, 刘忠军, 等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 156-166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 156-166. (in Chinese)
- [16] 戴智博, 衣淑娟, 张涪朋, 等. 玉米窄行密植品字形高速精量播种机的设计与试验[J]. 中国农机装备, 2024(8): 2-6.
DAI Zhibo, YI Shujuan, ZHANG Yupeng, et al. Design and experiment of high speed precision seeder for narrow row and close planting of maize[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2024(8): 2-6. (in Chinese)
- [17] 孙文胜, 衣淑娟, 齐海龙, 等. 双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 168-179.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Design and experiment of twin discs intertwined air-pressure high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 168-179. (in Chinese)

- [18] 初金星,陈维刚,姜明海,等. 双腔双盘双种带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农机化研究, 2022,44(10):108-117. CHU Jinxing, CHEN Weigang, JIANG Minghai, et al. Design and experiment of double cavity, double disc and double seeding rows pneumatic precision seed-metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 108-117. (in Chinese)
- [19] 和贤桃,齐浩君,张东兴,等. 丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):151-163. HE Xiantao, QI Haojun, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of horizontal disc maize precision seed metering device on hilly land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):151-163. (in Chinese)
- [20] 《农业机械设计手册》编委会. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [21] 董建鑫,黄玉祥,沈浩,等. 锥面导流式大豆高速精量排种器设计与试验[J]. 农机化研究, 2022,44(11):37-45. DONG Jianxin, HUANG Yuxiang, SHEN Hao, et al. Design and experiment of cone diversion type soybean high speed precision metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 37-45. (in Chinese)
- [22] 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, 426:1-18
- [23] CAO X, WANG L, LIAO Q, et al. Simulation of the mixing component of a horizontal air-assisted centralised wheat metering device[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243:13-26.
- [24] SU W, ZHU D, HUANG J, et al. Estimation of the vertical leaf area profile of corn (*Zea mays*) plants using terrestrial laser scanning (TLS)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:5-13.
- [25] 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)

~~~~~

(上接第 205 页)

- [13] 崔龙飞,薛新宇,丁素明,等. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(2):82-90. CUI Longfei, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 82-90. (in Chinese)
- [14] 王敏,廖松泉,孙翊,等. 基于压电摩擦阻尼的四参数隔振系统等效建模与频变阻尼特性分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5):192-201. WANG Min, LIAO Songquan, SUN Yi, et al. Equivalent modeling and frequency-dependent damping characteristics analysis of a four-parameter isolator based on friction damping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 192-201. (in Chinese)
- [15] 陆则坚,钱焱焱,潘君拯. 我国水田土壤流变特性研究(第一报)——我国水田土壤的流变模型和流变参数分析[J]. 农业机械学报, 1982,13(2):43-54. LU Zejian, QIAN Yanqiao, PAN Junzheng. Rheological characteristics of paddy-field soils in China(1)—rheological model of paddy-field soils in China and analyses of rheological coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 13(2): 43-54. (in Chinese)
- [16] KONG X, YANG W, LI B, et al. Application of stabilized numerical integration method in acceleration sensor data processing [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 8194-8203.
- [17] 方新磊,郝伟,陈宏. 基于频域滤波的加速度信号处理[J]. 仪表技术与传感器, 2012(4):94-96. FANG Xinlei, HAO Wei, CHEN Hong. Acceleration signal processing based on frequency domain filtering[J]. Instrument Technique and Sensors, 2012(4): 94-96. (in Chinese)
- [18] 程耀东. 机械振动学(线性系统)[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1988.
- [19] 朱思洪,马佳富,袁加奇,等. 水田作业工况的拖拉机振动特性[J]. 农业工程学报, 2016,32(11):31-38. ZHU Sihong, MA Jiafu, YUAN Jiaqi, et al. Vibration characteristics of tractor in condition of paddy operation [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 31-38. (in Chinese)
- [20] 周长城. 汽车平顺性与悬架系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [21] 徐嘉浩,顾久,郑玲玲,等. 四轮路面激励生成工具开发及应用[J]. 汽车工程学报, 2020,10(3):164-169. XU Jiahao, GU Jiu, ZHENG Lingling, et al. Development and application of four-wheel road excitation generation tool[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2020, 10(3): 164-169. (in Chinese)
- [22] 全国拖拉机标准化技术委员会. GB/T 1593—2015 农业轮式拖拉机后置式三点悬挂装置 0, 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N 和 4 类[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [23] 全国拖拉机标准化技术委员会. GB/T 1592.3—2016 农业拖拉机后置动力输出轴 1, 2, 3 和 4 型 第 2 部分:窄轮距拖拉机防护罩尺寸和空隙范[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.