doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.018

顶针夹持式棉花精量排种器设计与试验

张学军[1,2]　金宇菲[1]　史增录[1,2]　杨海云[1]　王堆金[3]　于永良[3]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052;
3.新疆天诚农机具制造有限公司,铁门关 841007)

摘要:针对棉花精量排种器出现漏播及对不同品种棉种的取种适应性差,更换内部取种装置繁琐等问题,设计了一种顶针夹持式棉花精量排种器,对顶针夹持式主动取种装置结构进行设计;通过芯盘结构的设计,转动调节齿轮转角实现取种型腔空间大小的快速调整,以提高不同品种棉种的有效充种性能。分析确定取种装置关键结构参数。应用 EDEM 构建顶针夹持式排种器的仿真模型,分析挡种板倾角、工作转速对种群平均动能影响,获得其取种性能的变化规律;以挡种板倾角、型腔高度、工作转速为试验因素,以合格率、重播率、漏播率为评价指标进行三因素五水平正交试验。利用 Design-Expert 13.0 软件,分析各因素对合格率、重播率、漏播率的影响,得到各因素最优参数,通过台架试验与田间试验验证其可靠性。试验结果表明,当挡种板倾角分别取 14°、19°,型腔高度取 5.4、4.2 mm,工作转速取 23、28 r/min 时,Ⅰ、Ⅱ类尺寸种子排种性能最优,此时合格率分别为 91.68%、91.45%;重播率为 3.57%、3.03%;漏播率为 4.75%、5.52%;统计得棉花出苗率为 88.62%,满足棉花精量播种的技术要求。

关键词:棉花;排种器;夹持式;取种型腔;EDEM

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0192-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Ejector Pin Clamping-type Cotton Precision Seeding-metering Device

Zhang Xuejun[1,2]　Jin Yufei[1]　Shi Zenglu[1,2]　Yang Haiyun[1]　Wang Duijin[3]　Yu Yongliang[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi* 830052, *China*
3. *Xinjiang Tiancheng Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Tiemenguan* 841007, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that seed leakage and poor adaptability to different cotton seed varieties in cotton precision seeding-metering device, as well as the cumbersome process of replacing internal seed picking devices, an ejector pin clamping-type cotton precision seeding-metering device was designed, and the structure of the pin-clamping active seed picking device was completed; through the design of the core disc structure, the angle of the adjustment gear was rotated to adjust the size of the seed cavity space to accommodate the effective filling of cotton seeds of different sizes. The key structural parameters of the seed collection device were analyzed. EDEM was applied to construct a simulation model of precision seeding-metering device, the effects of the seed deflector plate angle and operating speed on the average kinetic energy of the seed population were analyzed, and the variation law of its seed collection performance was obtained; with the angle of the seed guard plate, cavity height, and operating speed as experimental factors, and qualification rate and re-seeding rate, miss rate as evaluation indicators, three factors and five levels orthogonal simulation experiment was conducted. Design-Expert 13.0 software was used to analyze the impact of various factors on the qualification rate and re-seeding rate, miss rate, the optimal parameters for each factor were obtained, and their reliability was verified through bench tests and field tests. The test results indicated that when the seed plate angle was set to 14° and 19°, and the cavity height was set to 5.4 mm and 4.2 mm, and operating speeds of 23 r/min and 28 r/min, the seeding performance for Class Ⅰ and Class Ⅱ seed sizes was optimal, with qualification rates of 91.68% and 91.45%, miss seed rates of 4.75% and 5.52%, and re-seeding rates of 3.57% and 3.03%, respectively; the cotton emergence rate was statistically determined to be 88.62%. All results met the

收稿日期:2025-08-14　修回日期:2025-09-10

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02003-3)和新疆维吾尔自治区财政扶持农机化发展项目(CF2025-05)

作者简介:张学军(1966—),男,教授,博士,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:tuec@163.com

technical requirements of cotton precision sowing, and the findings could provide reference for the structural design and optimization of precision seeding devices.

Key words: cotton; seed-metering device; clamping-type; seed cavity space; EDEM

0　引言

中国是世界上最大的棉花生产国和棉花进口国，2024 年，新疆棉花种植面积达到 $2.447\ 9\times10^6$ hm^2，占全国总种植面积的 85%，棉花总产量 5.686×10^6 t，占全国棉花总产量的 92.2%，棉花已成为新疆区域经济发展的支柱产业，对促进新疆区域经济发展，带动农民增收致富具有重要意义[1-3]。机械化精量播种是棉花生产的关键环节，直接影响后续的生长发育、产量形成及品质优劣，是决定棉花生产效益的关键，开展棉花主动、精量取种装置设计，提高不同品种棉种适应性，可有效省种降本，提高作业效率，是当前棉花机械化精量播种的重要方向[4-5]。

目前，常见的棉花排种器按工作原理可分为机械式和气吸式[6]。气吸式排种器对种子尺寸要求不高，损伤率低，但其结构复杂、生产成本高[7-9]。机械式排种器结构简单、生产成本低、故障少、易于调节和维护[10-11]。魏松等[12]基于农艺要求，通过调节双吸种盘重叠空间切换吸孔组合，实现粒数可调；罗海峰等[13]针对稻种种群堆积，含水率高等问题，提出一种外凸扰种仿形型孔式排种器，有效减少了种群堆积现象；张学军等[14]通过设计取种开合板凸轮轮廓曲线，利用拐臂与开合板不断啮合从而控制取种开合角大小，进一步有效提高充种率；吴海峰等[15]利用驱动柄以及连杆相互作用，控制取种勺在取种区开启形成取种空间，离开取种区间时取种勺在扭簧作用力下闭合，完成各工作过程；王珏等[16]为了探究棉花勺式排种器排种性能，建立其离散元仿真模型，对棉籽的运动过程进行了仿真分析，验证了采用离散元法分析排种性能的可靠性；徐照耀等[17]为了优化内充种棉花排种器的最优排种性能参数组合，运用 EDEM 软件进行仿真试验，得到排种器最优工作参数组合；王龙等[18]建立棉种离散元模型，在不同转速下对窝眼式棉花穴播器进行仿真试验，得到最优工作转速，提高了排种合格率。上述研究表明，种子尺寸与取种空间的适应性是影响排种器性能重要因素，现有研究仅在预设尺寸的取种空间上进行结构参数优化，造成不同种子的适应性差，更换取种装置繁琐等问题，因此改变取种空间大小，成为提高不同尺寸等级种子充种性能的关键。

基于上述研究，本文设计一种顶针夹持式棉花精量排种器，利用取种弧形板控制取种型腔高度随周期性变化，完成主动取种、强制夹种等工作过程，通过转动排种器外部调节齿轮旋转角度，从而调整齿条工作行程，继而控制取种弧形板在取种区间内的工作半径，最终调整型腔在取种区间内的初始高度，确保适应不同尺寸的种子完成取种过程。依据棉花籽粒三轴尺寸大小对取种装置进行参数化设计，构建主动取种过程力学与动力学模型，应用离散元仿真模型，以挡种板倾角、型腔高度、工作转速为因素，以合格率、重播率及漏播率为评价指标，进行仿真试验和响应面优化方法，确定最优参数，通过台架试验与田间试验验证可靠性。

1　排种器结构与工作原理

1.1　整体结构

如图 1 所示，顶针夹持式棉花精量排种器主要有进种口、挡种板、定盘（旋钮齿轮、钢带）、芯盘（齿条、弧形板）、压盘、取种装置总成（顶针、V 形槽、滚轮、基座、种盒、弹簧、鸭嘴）、动盘、轴等组成。

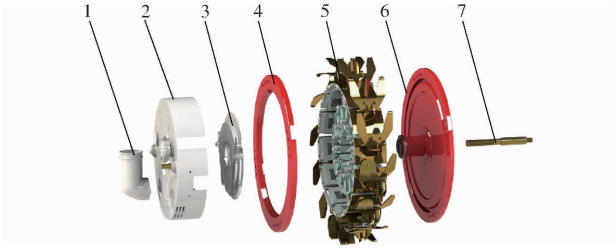


图 1　顶针夹持式棉花精量排种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of ejector pin clamping-type cotton precision seeding-metering device

1. 进种口　2. 定盘　3. 芯盘　4. 压盘　5. 取种装置总成　6. 动盘　7. 轴

各部件通过螺栓等配合组成排种器整体，如图 1 所示，取种装置总成由 14 个单独的取种模块互相嵌入构成，进种口通过螺栓安装至定盘，压盘与动盘通过螺栓固定，种子由进种口进入仓内，芯盘布置在取种装置内圈确保不干涉仓内取种过程。如图 2 所示，顶针与 V 形槽和钢带形成取种型腔，定盘上设有旋钮齿轮，通过转动角度控制齿条位置改变弧形板及滚轮运动半径，控制顶针在取种区间内的提升行程，改变型腔大小，从而进行取种、夹种、送种、投种等过程。顶针在弹簧弹力作用下在钢带缺口处，将种子送入种盒，到达鸭嘴底部，当动鸭嘴接触地面时，动鸭嘴打开，种子落至定嘴扎成型的种穴，

完成播种过程。

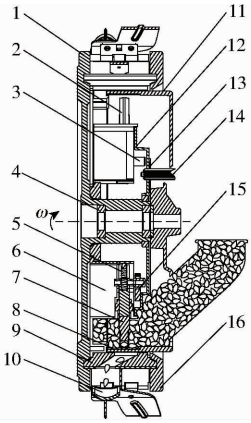


图 2 排种器剖视图

Fig. 2 Cutaway view of seeding-metering device

1. 动盘 2. V 形槽 3. 滚轮 4. 轴承 5. 弹簧 6. 基座 7. 顶针 8. 钢带 9. 偏置种盒 10. 鸭嘴 11. 定盘 12. 芯盘 13. 齿条 14. 齿轮 15. 弧形板 16. 压盘

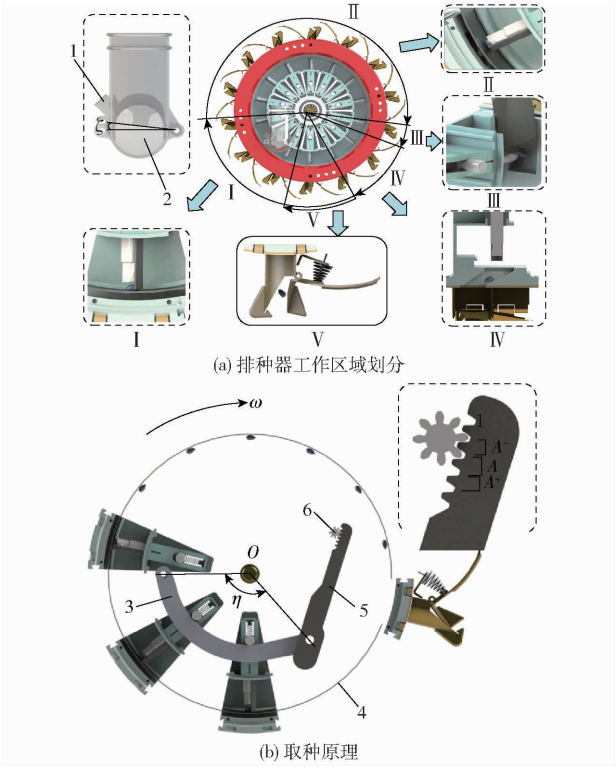
1.2 工作原理

如图 3a 所示,排种器工作区域划分为取种区、夹种区、送种区、储种区、成穴投种区。作业时,籽粒通过种口进入排种器内,籽粒在钢带内部取种区域内形成种群,排种器转动时,取种模块上的滚轮随之运动,当滚轮运动至接触到弧形板时,由于弧形板内边缘高于滚轮初始位置最低点,滚轮被弧形板顶起且沿弧形板内壁运动,使顶针开始提升,且与 V 形槽和钢带形成型腔,籽粒受种群间作用力进入型腔,完成取种;若种子尺寸发生变化时,可以通过调节外部旋钮齿轮控制齿条伸缩长度,如图 3b 所示,从而改变取种弧形板在取种区间的半径变化,进一步控制顶针在取种区间内初始抬起高度,改变取种型腔大小。当滚轮离开取种区间时,顶针在弹簧弹力作用下被推动,型腔开始变小,最终顶针底部夹持住种子,后方被 V 形槽内壁支撑,下方由钢带支撑,此时进入夹种区间,夹持住的种子随取种块运动到送种区,此时钢带出现缺口,在弹簧作用下种子被顶针推送至种盒内,沿种盒内斜槽落入鸭嘴中,待鸭嘴运动至底部接触到土壤时,定嘴依靠排种器整体重力压入土中,形成种穴,动嘴尾部接触土壤并打开,此时籽粒落入种穴中,完成投种作业。

2 取种装置参数设计

2.1 棉花籽粒几何参数

棉花种子几何尺寸参数是取种装置结构设计的重要依据,不同种子的几何尺寸为取种装置的参数设计提供了主要参考。选用新疆地区广泛种植的新陆中 67 号、新陆早 68 号作为测量对象,对其长、宽、厚进行测量,以棉花籽粒质心为原点 O 建立三维坐



(a) 排种器工作区域划分

(b) 取种原理

图 3 排种器工作原理图

Fig. 3 Working principle diagrams of seed-metering device

Ⅰ. 取种区 Ⅱ. 夹种区 Ⅲ. 送种区 Ⅳ. 储种区 Ⅴ. 成穴投种区 1. 挡种板 2. 种口 3. 取种弧形板 4. 钢带 5. 调节齿条 6. 调节齿轮

标系[19-20],Z 轴正方向籽粒外轮廓长半轴部分为长外缘,负方向短半轴为短外缘,如图 4 所示,测量结果如表 1 所示。

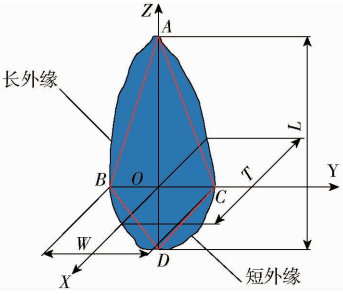


图 4 棉花种子尺寸特征示意图

Fig. 4 Schematic of cotton seed characteristic size

表 1 棉花种子几何参数

Tab. 1 Cotton seed geometrical parameters mm

品种	几何参数	最大值	最小值	平均值
新陆中 67 号	长 L	9.84	9.10	9.46
	宽 W	5.47	4.82	5.20
	厚 T	5.28	4.93	5.16
新陆早 68 号	长 L	11.56	9.32	10.31
	宽 W	4.67	4.44	4.56
	厚 T	4.32	3.62	3.92

2.2 取种装置结构设计

取种装置是棉花精量排种器的主要部件,取种

装置之间由连接块连接且周向排列，其各组成部件如图 5 所示。

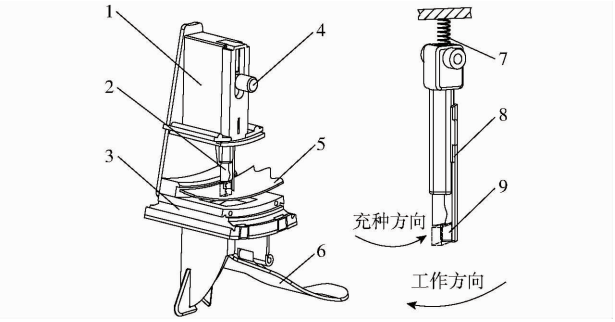


图 5　取种装置结构示意图

Fig. 5　Schematic of seed picking device structure

1. 基座　2. 顶针　3. 种盒　4. 滚轮　5. 钢带　6. 鸭嘴　7. 弹簧　8. V 形槽　9. 型腔

2.3　取种芯盘设计

2.3.1　齿轮齿条设计

取种芯盘是排种器完成各工作过程的关键部件，包括旋钮齿轮、齿条与取种弧形板，齿轮齿条啮合的工作行程对型腔大小的变化规律具有重要作用，根据内部安装尺寸选择模数 m 为 1.25 mm、压力角 α' 为 20°、齿数 z 为 8 的小齿轮，保证啮合条件，选择同模数、压力角的齿条，如图 6 所示。

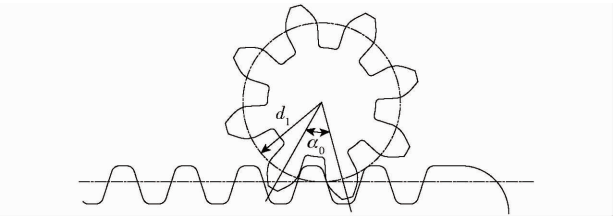


图 6　啮合示意图

Fig. 6　Meshing schematic

当齿轮齿条啮合进行传动时，齿条的工作行程为啮合区间内齿轮分度圆上转过的弧长 S，即

$$\begin{cases} S = \pi d_1 \dfrac{\alpha_0}{2\pi} \\ d_1 = mz \end{cases} \tag{1}$$

其中，d_1 为齿轮分度圆直径，mm，α_0 为齿轮啮合角度，取 45°，代入计算得 $S = 3.92$ mm。

2.3.2　取种弧形板设计

弧形板的轮廓设计直接影响着各工作过程的区域划分及型腔空间大小，取种型腔的高度取决于取种装置是否在弧形板的工作区间内，当取种装置运动至取种区间内，此时滚轮公转半径变小，继而顶针被抬起，型腔高度增加，以滚轮运动轨迹为研究对象，根据凸轮反转法对弧形板进行设计，考虑到排种器实际工作状况，减少对籽粒造成的损伤，选择低速、轻载的余弦加速度推程运动，对取种区后端的推程段和开始的回程段即弧形板工作行程进行设计，建立其运动方程，对应的相位角曲线如图 7 所示，其中，h' 为取种区间型腔高度、h'' 为夹种区间型腔高度、δ 为送种区间型腔高度，运动方程为

$$\begin{cases} S_t = \dfrac{h_g}{2} - \dfrac{h_g}{2}\cos\dfrac{\pi\Phi}{\varphi_t} \\ S_h = \dfrac{h_g}{2} + \dfrac{h_g}{2}\cos\dfrac{\pi\Phi}{\varphi_h} \end{cases} \tag{2}$$

式中　S_t——推程位移，mm

S_h——回程位移，mm

h_g——滚轮近休止角行程，mm

Φ——相位角，(°)

φ_t——推程运动角，(°)

φ_h——回程运动角，(°)

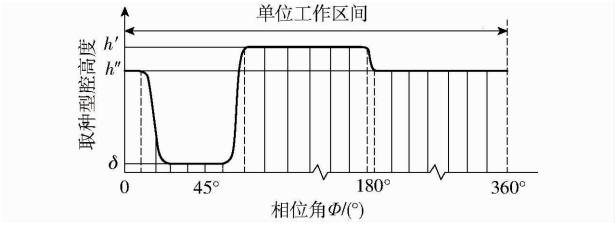


图 7　相位关系

Fig. 7　Phase relationship diagram

如图 8 所示，取种基座上的滚轮工作至取种区间$\overset{\frown}{AB}$时，滚轮外缘沿着弧形板内壁滚动，由于弧形板半径较小，使滚轮在径向方向上进行伸缩，进而顶针抬起，型腔高度增加。取种区间的范围主要由弧形板进行控制，根据取种范围设定弧形板角度，即凸轮近休止角 φ_s、弧形板角度 η 为 120°、送种角度 θ_t 为 15°、取种区间结束段推程运动角 φ_t 为 10°、回程运动角 φ_h 为 10°。

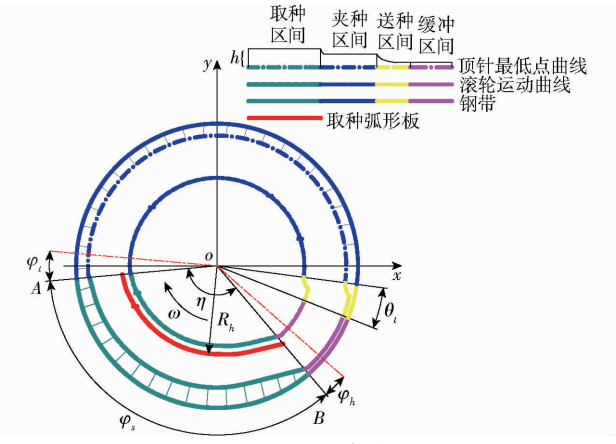


图 8　运动轮廓曲线

Fig. 8　Motion profile curves

根据齿轮齿条啮合工作行程，调节弧形板初始半径 R_h，改变取种区间内型腔高度，对不同形状大小籽粒调整，初始半径 R_h 过大时，容易导致型腔内出现双籽粒；过小时籽粒难以进入型腔，造成漏播，由前文对齿轮齿条进行设计分析，以排种器中心竖

直方向上型腔提升高度为研究对象，探究与各啮合状态下的规律。

图 9 中点 A 为弧形板安装点也为各啮合状态下的旋转中心，点 B 为弧形板与齿条铰接点，点 C 为弧形板在取种区间竖直方向上的最低点，把点 A、B、C 组成的密闭图形视为三角形 ABC，相邻齿轮齿条啮合状态下的弧形板三点位置组成三角形 $A'B'C'$。

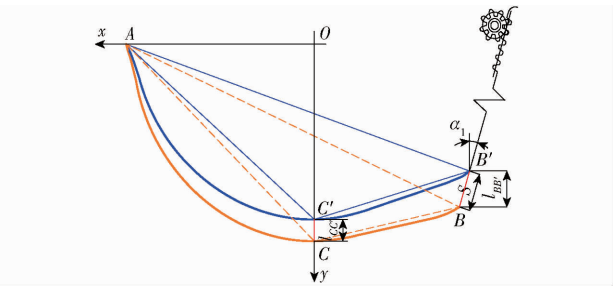


图 9 取种弧形板运动简图

Fig. 9 Kinematic diagram of seed-filling arc plate

已知 BB' 在行程方向的位移 S，且与竖直方向夹角 α_1 为 15°，BB' 在竖直方向的位移 Δy_B 为 $l_{BB'}$，CC' 在竖直方向的位移 Δy_C 为 $l_{CC'}$，设旋转中心 A 为原点，点 B 的坐标为 (b_x, b_y)，点 C 的坐标为 (c_x, c_y)，依据三角形坐标旋转公式，得到旋转后点 B' 的纵坐标 $y_{B'}$，点 C' 的纵坐标 $y_{C'}$，分析可知，其关系为

$$\begin{cases} \Delta y_B = S\cos\alpha_1 \\ y_{B'} = b_x\sin\theta_h + b_y\cos\theta_h \\ y_{C'} = c_x\sin\theta_h + c_y\cos\theta_h \\ \Delta y_B = y_{B'} - y_B = b_x\sin\theta_h + b_y\cos\theta_h - b_y \\ \Delta y_C = y_{C'} - y_C = c_x\sin\theta_h + c_y\cos\theta_h - c_y \end{cases} \tag{3}$$

式中 Δy_B——点 B 的纵坐标差值，mm

Δy_C——点 C 的纵坐标差值，mm

θ_h——三角形 ABC 旋转角度，(°)

对各参数进行赋值代入计算，得出旋转角度 θ_h 为 1.2°，Δy_C 为 1.5 mm，即相邻啮合状态下型腔高度差值 Δh 为 1.5 mm。为保证顶针处于最低端时不干涉钢带，设置型腔初始高度即送种区间型腔高度 δ 为 1 mm，所以不同啮合状态下型腔高度分别为 2.5、4.0、5.5、7.0、8.5 mm，根据前期测量的棉种尺寸，型腔高度可调整为 4.0、5.5、7.0 mm。

2.4 取种顶针参数设计

取种顶针结构参数直接影响排种器的取种性能，顶针底部端面呈凹型弧状时，且轮廓形似于籽粒外轮廓时，才能更好地与棉花籽粒相契合，提升取充种性能，其结构尺寸设计如图 10 所示。

如图 10c 所示，顶针底部与 V 形槽内壁呈似纺锤形，由于籽粒通常以横卧或者侧卧[21]的姿态充种进入型腔，棉花籽粒长外缘紧贴 V 形槽内壁(纺锤形短边)，或者近似重合于侧视图 10c 中 x 轴(纺锤形长对角线)，故顶针底部 x 轴方向长度 L_1 应满足[22]

$$L_{\min} < L_1 < L_{\min} + \frac{1}{3}W_{\min} \tag{4}$$

式中 $L_{\min}$——籽粒长度最小值，mm

$W_{\min}$——籽粒宽度最小值，mm

根据表 1 参数，设定 L_1 为 10.2 mm。

为了避免籽粒以竖卧姿态(即籽粒长轴垂直于侧视图 10c 中的 x 轴)充入型腔，此时籽粒与 V 形槽内壁不接触，导致持种过程不稳定，继而出现漏播情况，针对上述情况将顶针底端设计成凹形弧状：一是可以调整籽粒充入时的角度，保证单籽粒充分进入型腔内；二是更好地与籽粒外轮廓相契合，增加夹种稳定性，故顶针底部 y 轴方向宽度 L_2 应满足

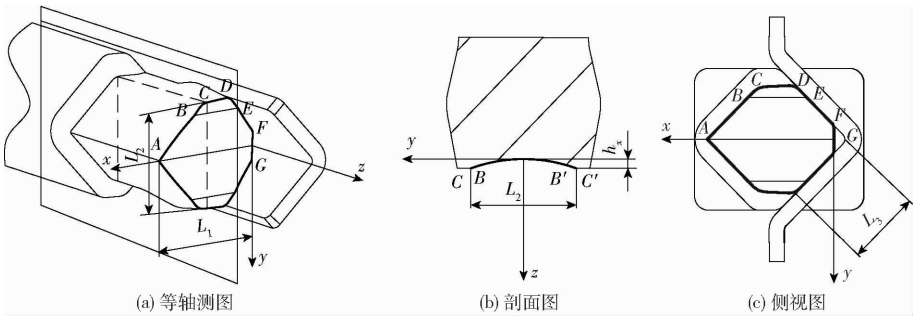
$$W_{\max} < L_2 < L_{\min} \tag{5}$$

式中，$W_{\max}$ 为籽粒宽度最大值，根据表 1 数据，设 L_2 为 8.25 mm。

底部 $\overset{\frown}{BB'}$ 对应的弦高即为 h_x，弦高 h_x 的大小影响与籽粒契合的相关性，$\overset{\frown}{BB'}$ 的长度应根据籽粒横切面近似椭圆形的周长进行计算，椭圆长短半轴为籽粒的宽度和厚度，且 $\overset{\frown}{BB'}$ 的弦高 h_x 应满足[23]

$$\begin{cases} l_{BB'} = T_{\min}\left(\dfrac{1}{2}\pi - 1\right) + W_{\min} \\ \dfrac{1}{2}(W_{\min} - T_{\min}) < h_x < \dfrac{2}{3}(W_{\min} - T_{\min}) \end{cases} \tag{6}$$

式中 $T_{\min}$——籽粒厚度最小值，mm



(a) 等轴测图 (b) 剖面图 (c) 侧视图

图 10 顶针-V 形槽结构示意图

Fig. 10 Schematics of ejector pin and V-groove

根据表 1 数据，$l_{BB'}$设为 6.5 mm，h_x设为 0.55 mm。

V 形槽内壁作为取种型腔的后端面，当籽粒进入取种区间时，内壁承受籽粒所受的周向力，为了保证充种合格率，故 V 形槽内壁长度 L_3应满足

$$W_{\max} < L_3 < \frac{2}{3}L_{\min} \tag{7}$$

根据表 1 参数，设定 L_3为 5.75 mm。

为了降低取种过程对籽粒的损伤，对顶针边缘进行圆角过渡处理，以提高排种器作业性能。

3　排种器取种过程仿真分析

基于 EDEM 离散元法对顶针夹持式精量排种器取种过程进行仿真分析，研究排种器关键工作参数对取种性能的影响规律，为确定排种器适合的工作参数范围提供依据。

3.1　棉花籽粒离散元模型

基于上述种子三轴测量结果，对两品种的棉花籽粒进行三维建模，新陆中 67 号棉籽相比于新陆早 68 号棉籽长度尺寸较小，呈椭球形，尾部较为饱满，记为Ⅰ类，新陆早 68 号长轴尺寸较大，但尾部呈扁形，记为Ⅱ类[24]。根据测量尺寸绘制三维模型，转化为 EDEM 通用的.igs 格式，并导入 EDEM 中进行颗粒填充，得到籽粒的离散元模型，如表 2 所示。

表 2　棉花籽粒离散元模型

Tab.2　Discrete element model of cotton seed

种类	Physical	3D模型	DEM模型
Ⅰ类			
Ⅱ类			

3.2　排种器仿真模型

对顶针夹持式棉花精量排种器的三维模型进行简化，确保导入在 EDEM 中不影响仿真结果，在种口上方的种管内壁中心设置籽粒颗粒工厂，籽粒生成数量充满排种器内腔，直至种管内壁开始堆积时停止，如图 11 所示。根据籽粒与排种器各部件材料属性，对其进行各参数设置[25]，如表 3 所示。

由于籽粒经泡沫酸脱绒与包衣剂处理，其接触碰撞时表面无明显粘附现象，故采用经典 Hertz－Mindlin 接触模型作为籽粒之间、籽粒与排种器之间的接触模型[26]。对籽粒-籽粒、籽粒-取种装置、籽粒-钢带之间的各个接触参数进行设定，如表 4 所示。

3.3　仿真结果分析

根据排种器工作原理，设置仿真过程中计算区域内的网格大小为最小半径的 5 倍，固定步长，数据存储间隔为 0.01 s，仿真总时长为 10 s。

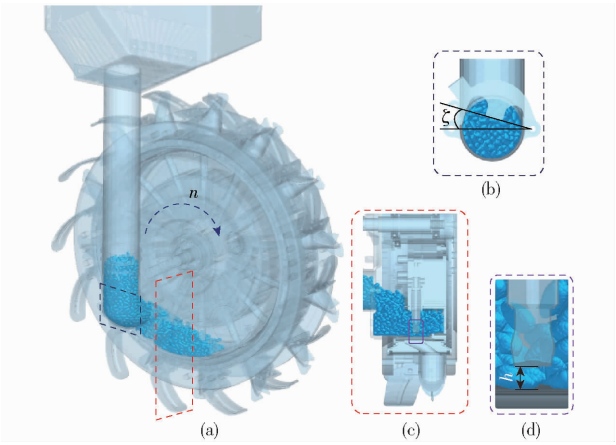


图 11　EDEM 仿真模型

Fig. 11　EDEM simulation models

表 3　仿真模型物理特性参数

Tab.3　Physical characteristics of simulation model

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
棉花籽粒	0.25	1.9×10^6	640
取种装置	0.3	1.39×10^6	1 300
钢带	0.3	7×10^7	7 800

表 4　仿真模型材料接触参数

Tab.4　Material contact parameters of simulation model

项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
籽粒-籽粒	0.3	0.56	0.15
籽粒-取种装置	0.6	0.38	0.1
籽粒-钢带	0.52	0.5	0.3

3.3.1　种群动能

种群扰动可以降低籽粒之间内摩擦阻力，扰动性提高时，种群在取种区间增加碰撞，使籽粒在自身重力、压力及扰动力等其他作用力下更容易进入取种型腔[27－28]，种群的平均动能以及棉种的运动速度代表其离散程度和扰动强度，故选择排种器内腔种群的平均动能与速度矢量作为评价指标，探求挡种板倾角 ζ 取 0°、15°、30°与排种器转速 n 取 18、24、30 r/min 下的种群平均动能曲线与运动速度矢量图。

图 12a 为排种器内部种群平均动能分布，蓝色棉种为静止层棉种，绿色棉种为扰动层棉种，红色棉种为工作区域棉种。由图 12a 可知种群平均动能随各工作区间递增，当内部棉种数量一定时，处于取种区间非扰动区域的棉种不参与取种过程，种群平均动能较低。图 12b 为种群俯视图，当排种器转动时，接触到取种装置的棉种，平均动能沿排种器径向方向，由工作区域带动扰动区域，向两侧逐渐递增，处于图 12c 中Ⅰ、Ⅱ状态的棉种具有相对稳定的速度与回转半径，继而使平均动能增大，且趋于稳定，当棉种处于Ⅲ、Ⅳ状态时，此时棉种回转半径达到最大使平均动能进一步增大。

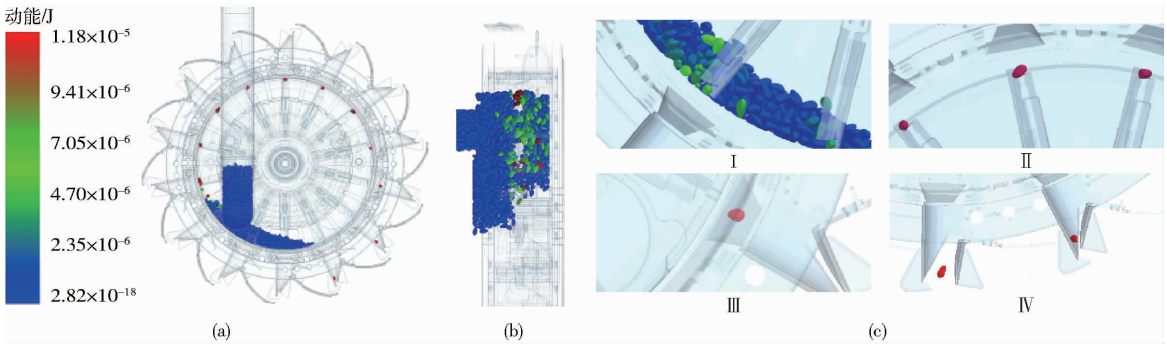


图 12 种群动能分布图及排种器仿真过程

Fig. 12 Diagrams of seed population kinetic energy and simulation process of seed-metering device

由图 13 可知,种群平均动能随时间呈现波动型变化,整体在 $2.0\times10^{-7}\sim1.4\times10^{-6}$ J 范围内,当挡种板倾角一定时,随着排种器转速增加,种群平均动能整体呈现增大趋势,种群的流动性越好,有利于改善充种效果;当转速增大时,平均动能曲线波动范围更显著,峰值间隔时间减少,扰种频率增加[29]。随着挡种板倾角的增加,波动幅度及峰值随之减少,原因是内部的种子数量变多,种群间作用力及摩擦力等增大,扰动幅度降低,但由于进种量增加,种群平均动能整体呈增加趋势。

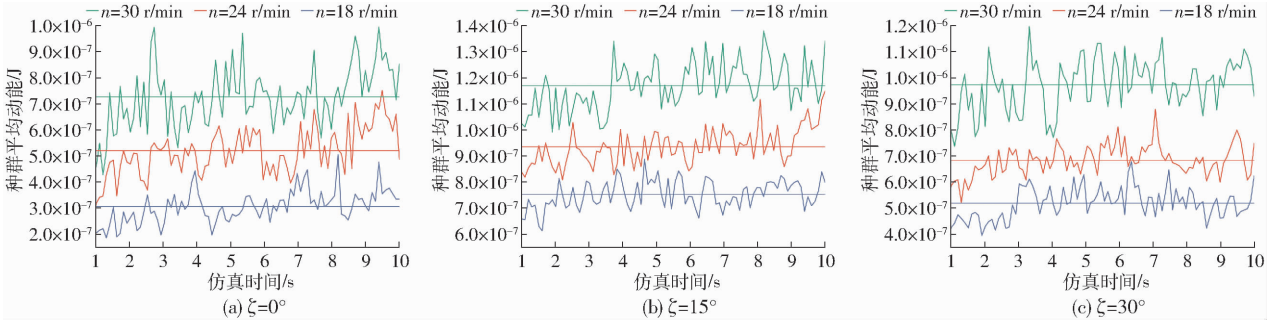


图 13 不同条件下种群平均动能随时间的变化曲线

Fig. 13 Curves of average kinetic energy of seed population changing over time under different conditions

图 14 为扰动过程速度矢量图,随着排种器转速的增加,扰动区域棉种的速度也增加,位于取种装置运动方向周围的种群速度大于周围种群速度,产生了一定的速度差,使得种群具有一定的流动性;当取种装置离开种群时,附近种群速度增加,未能成功充种的棉种回落至种群。当排种器转速较小时,棉种的填充速度大于取种装置的转速,充种效果较好,同时,在双籽粒充入型腔后的夹种过程中,难以破坏平衡,造成重播现象;当排种器速度较大时,棉种的填充速度小于取种装置的转速,易出现漏播现象。综上所述,选择合适的参数,对于提高排种器作业质量具有重要影响。

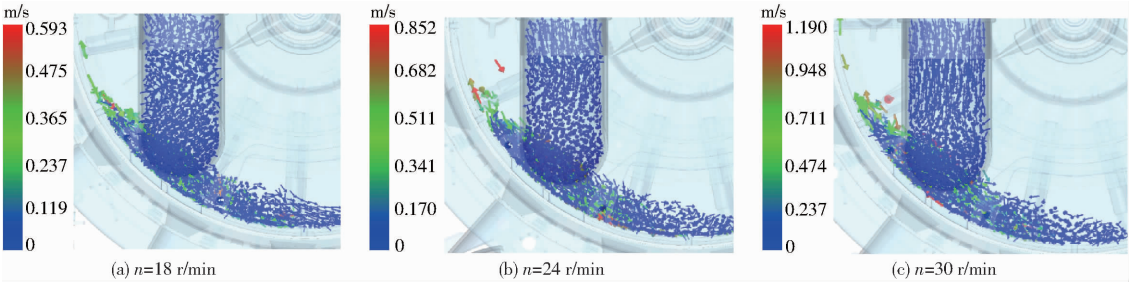


图 14 扰种过程速度矢量图

Fig. 14 Velocity vector diagrams of seed disturbance process

3.3.2 取种性能

型腔大小是能否顺利完成取种过程的关键,当顶针抬起高度较大时,可能导致双籽粒充入型腔的情况,造成重播,如图 15b 所示;当顶针抬起高度较小时,籽粒无法进入型腔,造成漏播,由图 15d 所示;分析顶针提升高度即型腔高度对取种性能的影响,型腔高度 h 分别取 4.0、5.5、7.0 mm,记为条件 A^-、A、A^+,分析实际作业过程中的工作指标,根据取种模块大小及运动状态在离散元软件后处理模块建立监测区域 Grid Bin Group,如图 15a 中边框区域内,

统计经过区域内的籽粒累积数量至仿真结束，导出数据并绘制折线图进行分析，如图 16 所示。

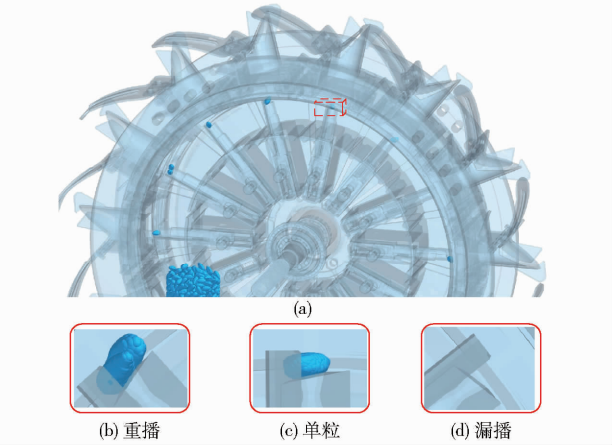


图 15　籽粒取种状态及监测区域

Fig. 15　Status of seed-filling and monitoring area

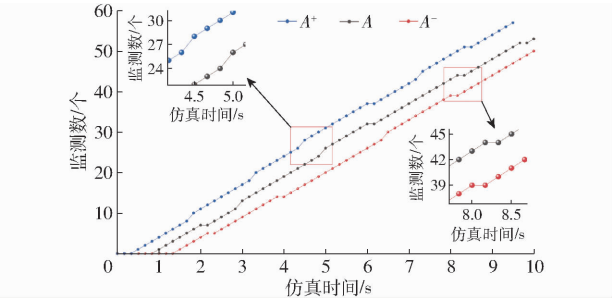


图 16　取种性能曲线

Fig. 16　Seeding performance curves

由于排种器做匀速周转运动，性能曲线整体呈线性上升趋势，图 16 中 4.5、5.0 s 仿真时间出现上升趋势，即型腔内出现双籽粒，导致重播；而 8.0、8.3 s 仿真时间出现水平趋势，即统计量没有发生变化，视为漏播；A^+ 条件下，型腔高度偏大，双籽粒充种可能性增大，图 16 中曲线也可看出陡变点出现次数较多，水平点较少；A 条件下，型腔高度居中，曲线变化趋势相对较为平稳；A^- 条件下，型腔高度偏小，籽粒充入型腔的概率降低，曲线出现水平趋势较多。综上所述，性能曲线呈现取种性能整体稳定趋势，选择不同条件下的型腔高度，对排种器的合格率、重播率及漏播率具有重要影响。

4　仿真试验

4.1　试验设计

结合前期工作，参考国家标准 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》和行业标准 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》，以挡种板倾角 x_1、型腔高度 x_2、工作转速 x_3 作为试验因素，选取合格率 A_1、重播率 D_1、漏播率 M_1 作为评价指标，分别对Ⅰ、Ⅱ类尺寸的籽粒进行三因素五水平正交试验，试验因素编码如表 5 所示，各指标计算公式为

$$A_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \tag{8}$$

$$D_1 = \frac{n_2}{N} \times 100\% \tag{9}$$

$$M_1 = \frac{n_0}{N} \times 100\% \tag{10}$$

式中　n_1——合格穴数，一穴为 1 粒的总穴数

n_2——重播穴数，一穴为 2 粒及以上的总穴数

n_0——漏播穴数，一穴为 0 粒的总穴数

N——总测定穴数

表 5　试验因素编码

Tab. 5　Test factors and coding

编码	因素		
	挡种板倾角 x_1/(°)	型腔高度 x_2/mm	工作转速 x_3/(r·min^{-1})
-1.682	-5	3.6	15
-1	0	4.0	18
0	15	5.5	24
1	30	7.0	30
1.682	35	7.4	33

在仿真试验过程中，通过改变模型旋转运动副速度对排种器工作转速进行调节，如图 11 所示通过在三维建模软件中改变挡种板配合角度来控制仿真过程中挡种板倾角，如图 11b 所示；通过顶针提升高度，来控制仿真过程中型腔高度，如图 11d 所示。

4.2　仿真试验结果分析

开展三因素五水平正交试验，将试验结果导入到 Design-Expert 13.0 中，结果如表 6 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

由表 6 可知，各组试验合格率均大于 85%，为进一步探究各水平因素对试验指标的影响，对上述试验结果进行回归拟合，建立以合格率、重播率、漏播率与挡种板倾角、型腔高度及工作转速的二次回归模型，并对模型进行方差分析，结果如表 7 所示。

由表 7 可知，合格率 A_1、重播率 D_1、漏播率 M_1 的回归模型均为极显著（$P<0.01$），失拟检验均不显著（$P>0.05$），对于合格率 A_1 回归方程，X_1、X_2、X_3、X_2X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对 A_1 的影响极显著，X_1X_2 对 A_1 的影响显著；对于重播率 D_1 回归方程，X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对 D_1 的影响极显著；对于漏播率 M_1 的回归方程，X_1、X_2、X_3、X_2X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对 M_1 的影响极显著，X_1X_2 对 M_1 的影响显著。

剔除回归模型中的不显著项，得出挡种板倾角、型腔高度和工作转速对合格率 A_1、重播率 D_1、漏播

表 6 Ⅰ类棉种试验结果

Tab. 6 Experiment results of class Ⅰ cotton seeds

试验序号	因素			合格率	重播率	漏播率
	X_1	X_2	X_3	A_1/%	D_1/%	M_1/%
1	-1	-1	-1	87.42	3.45	9.13
2	1	-1	-1	87.92	3.63	8.45
3	-1	1	-1	88.48	3.57	7.95
4	1	1	-1	90.25	4.58	5.17
5	-1	-1	1	89.25	3.82	6.93
6	1	-1	1	89.88	3.97	6.15
7	-1	1	1	88.08	4.15	7.77
8	1	1	1	90.19	4.12	5.69
9	-1.682	0	0	90.02	3.71	6.27
10	1.682	0	0	91.36	4.24	4.40
11	0	-1.682	0	87.01	3.58	9.41
12	0	1.682	0	88.19	4.02	7.79
13	0	0	-1.682	88.03	3.51	8.46
14	0	0	1.682	88.62	4.16	7.22
15	0	0	0	92.58	3.43	3.99
16	0	0	0	92.38	3.21	4.41
17	0	0	0	93.54	3.55	2.91
18	0	0	0	92.87	3.18	3.95
19	0	0	0	92.39	3.29	4.32
20	0	0	0	93.01	3.17	3.82
21	0	0	0	93.23	3.36	3.41
22	0	0	0	93.14	3.23	3.63
23	0	0	0	93.07	3.39	3.54

率 M_1 的回归方程为

$$A_1 = 92.91 + 0.53X_1 + 0.33X_2 + 0.32X_3 + 0.34X_1X_2 - 0.53X_2X_3 - 0.72X_1^2 - 1.81X_2^2 - 1.56X_3^2 \quad (11)$$

$$D_1 = 3.31 + 0.12X_1 + 0.13X_2 + 0.17X_3 + 0.22X_1^2 + 0.16X_2^2 + 0.17X_3^2 \quad (12)$$

$$M_1 = 3.78 - 0.69X_1 - 0.50X_2 - 0.46X_3 - 0.43X_1X_2 + 0.60X_2X_3 + 0.49X_1^2 + 1.64X_2^2 + 1.37X_3^2 \quad (13)$$

4.3 响应面分析

利用 Design-Expert 13.0 对试验结果数据进行分析,通过分析各项系数,确定各因素对合格率 A_1、重播率 D_1、漏播率 M_1 的影响,各交互作用的响应面如图 17 所示。

由图 17a 可知,当工作转速一定时,随着型腔高度的增大,取种合格率先增大后减小,原因是型腔高度过小时,不满足充入型腔的最小极限尺寸,导致漏播,型腔过大时,则会增大双籽粒充入的几率,造成重播;当型腔高度一定时,随着排种器工作转速的增大,取种合格率先增大后减小,由于转速过低时,种群动能较低,扰动程度低,籽粒在充入型腔方向的速度较小,未能进入型腔,导致漏播,当工作转速较高时,虽然种群扰动性增大,但取种装置经过种群的时间缩短,单位时间内,籽粒在种群作用力下未能充入型腔,造成漏播。

表 7 方差分析

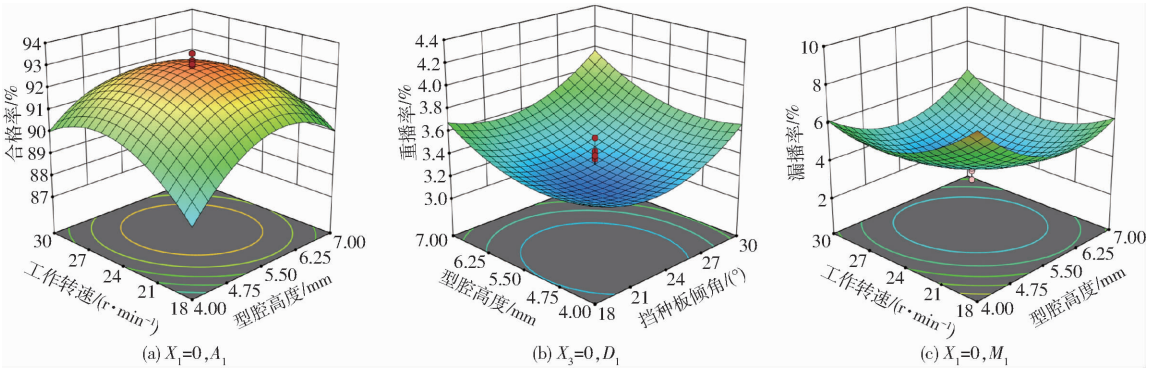
Tab. 7 Analysis of variance

来源	合格率 A_1				重播率 D_1				漏播率 M_1			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	107.99	9	81.03	<0.000 1 **	2.58	9	19.67	<0.000 1 **	92.84	9	56.03	<0.000 1 **
X_1	3.86	1	26.09	0.000 2 **	0.212	1	14.56	0.002 1 **	6.56	1	35.63	<0.000 1 **
X_2	1.49	1	10.08	0.007 3 **	0.234 6	1	16.11	0.001 5 **	3.39	1	18.42	0.000 9 **
X_3	1.37	1	9.24	0.009 5 **	0.429 9	1	29.53	0.000 1 **	2.86	1	15.51	0.001 7 **
X_1X_2	0.945 3	1	6.38	0.025 3 *	0.002 8	1	0.193 2	0.667 5	1.45	1	7.85	0.015 *
X_1X_3	0.027 6	1	0.186 5	0.672 9	0.040 6	1	2.79	0.118 8	0.045	1	0.244 4	0.629 3
X_2X_3	2.26	1	15.25	0.001 8 **	0.001	1	0.069 5	0.796 1	2.93	1	15.91	0.001 5 **
X_1^2	8.28	1	55.94	<0.000 1 **	0.789 5	1	54.22	<0.000 1 **	3.75	1	20.4	0.000 6 **
X_2^2	52.31	1	353.3	<0.000 1 **	0.412	1	28.3	0.000 1 **	42.76	1	232.28	<0.000 1 **
X_3^2	38.58	1	260.53	<0.000 1 **	0.477 8	1	32.81	<0.000 1 **	29.9	1	162.42	<0.000 1 **
残差	1.92	13			0.189 3	13			2.39	13		
失拟	0.675 3	5	0.864 7	0.543 5	0.055 1	5	0.657 6	0.665 5	0.656 4	5	0.604 7	0.699 5
误差	1.25	8			0.134 2	8			1.74	8		
总和	109.91	22			2.77	22			95.23	22		

注:* 表示差异显著($0.01 \leqslant P < 0.05$);** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

由图 17b 可知,型腔高度一定时,随着挡种板倾角的增加,重播率先减小后增大,由于挡种板倾角增大,进入取种室内的籽粒数量变多,种群间作用力增大,当取种型腔内充入单籽粒时,第 2 个籽粒被挤压至型腔的概率增大,导致重播率增大。

由图 17c 可知,当工作转速一定时,随着型腔高度的增加漏播率先减少后增加,因为当型腔高度较小时,不满足取种条件,造成漏播,当型腔高度增加时,容易出现双籽粒同时卡位,造成重播现象。



(a) X_1=0,A_1　(b) X_3=0,D_1　(c) X_1=0,M_1

图 17　各因素交互作用的响应曲面

Fig. 17　Response surfaces of interaction of various factors

4.4　参数优化

为得到顶针夹持式棉花精量排种器取种性能的最佳参数组合，以提高取种合格率、降低重播率与漏播率为目标，对排种器的挡种板倾角、型腔高度及工作转速进行目标优化求解，目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max A_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min D_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min M_1(x_1,x_2,x_3) \\ -5^\circ \leqslant x_1 \leqslant 35^\circ \\ 3.6\ \text{mm} \leqslant x_2 \leqslant 7.4\ \text{mm} \\ 15\ \text{r/min} \leqslant x_3 \leqslant 33\ \text{r/min} \end{cases} \tag{14}$$

求解得出，当挡种板倾角 x_1 为 13.95°，型腔高度 x_2 为 5.40 mm，工作转速 x_3 为 23.06 r/min 时，排种器工作性能最优，此时取种合格率、重播率、漏播率分别为 92.45%、3.31% 和 4.24%。用同样的方法对Ⅱ类尺寸种子进行试验求得 x_1、x_2、x_3 的最优解分别为：18.73°、4.2 mm、27.73 r/min，此时 A_1、D_1、M_1 为 91.37%、4.28% 和 4.35%。

5　验证试验

5.1　台架试验

为了验证仿真及优化后试验成果，试制排种器物理样机，开展台架验证试验。分别选取新陆中 67 号与新陆早 68 号为试验材料，试验设备包括皮尺、游标卡尺、活动扳手、摄像设备（REDMI K60 型，4K/60FPS）、排种器台架试验台等，如图 18 所示。

为保证籽粒落入传送带上间距与田间试验相等，计算传送带线速度与排种器外缘线速度相等，对 4.4 节优化参数分别取整：挡种板倾角为 14.0°、19.0°，型腔高度为 5.4、4.2 mm，工作转速为 23、28 r/min。每组测定 250 穴数据，重复 3 次取平均值。在最优参数的组合下，Ⅰ类尺寸种子的取种合格率为 91.86%、重播率为 3.87%、漏播率 4.27%；Ⅱ类尺寸种子的取种合格率为 92.52%、重播率为

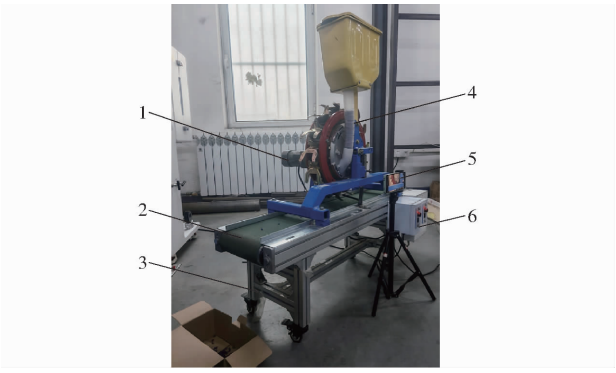


图 18　试验台架

Fig. 18　Test bench

1. 电机　2. 传送带　3. 机架　4. 种管　5. 摄像设备　6. 控制箱

4.12%、漏播率 3.36%，验证了仿真合理性，符合行业要求。

5.2　田间试验

为进一步验证顶针夹持式棉花精量排种器实际作业效果和质量，于 2025 年 4 月在新疆第二师铁门关市进行田间试验，试验前对土地进行耕整地，确保符合棉花播种要求。试验配套动力为东方红 1004 型拖拉机，采用 2MBJ－1/6 型棉花精量播种机，机具作业幅宽为 2.05 m，一膜铺设播种 6 行，将Ⅰ、Ⅱ类种子分别进行试验，如图 19 所示，每行连续统计 250 穴，重复 3 次，当挡种板倾角为 14°，型腔高度为 5.4 mm，工作转速为 23 r/min 时，得到Ⅰ类种子合格率为 91.68%、重播率为 3.57%、漏播率为 4.75%；当挡种板倾角取 19°，型腔高度取 4.2 mm，工作转速取 28 r/min 时，Ⅱ类种子合格率为 91.45%、重播率为 3.03%、漏播率为 5.52%。在此



图 19　田间试验和棉花出苗效果

Fig. 19　Field test and effect of cotton emergence

基础上,以每行为一个区间,连续统计 250 穴,重复 3 次取均值,经统计得棉花出苗率为 88.62%。

6 结论

(1)设计了一种顶针夹持式棉花精量排种器,通过转动排种器外部调节齿轮旋转角度,从而调整齿条工作行程,继而控制取种弧形板在取种区间内的工作半径,最终调整取种区间取种型腔初始高度,克服了因棉种尺寸差异导致的排种器适应性差的问题,分析了其结构及工作原理,对取种装置的关键部件进行参数化设计;建立了取种、夹种及送种过程的动力学模型,得到了影响排种器取种性能的关键因素。

(2)通过 EDEM 建立离散元仿真模型,分析挡种板倾角与工作转速对种群平均动能及速度矢量的影响,以及不同型腔高度对取种性能曲线的变化规律,结果表明,种群动能与速度反映出种群的扰动程度,取种性能曲线的波动与重播率、漏播率密切相关。

(3)以挡种板倾角、型腔高度及工作转速作为试验因素,以合格率、重播率、漏播率为指标,开展三因素五水平正交试验,并进行参数优化,通过台架试验验证其合理性。进一步进行田间试验,当挡种板倾角为 14°,型腔高度为 5.4 mm,工作转速为 23 r/min 时,Ⅰ类籽粒的取种合格率为 91.68%、重播率为 3.57%、漏播率为 4.75%;当挡种板倾角取 19°、型腔高度取 4.2 mm、工作转速取 28 r/min 时,Ⅱ类籽粒的取种合格率为 91.45%、重播率为 3.03%、漏播率为 5.52%。经统计得棉花出苗率为 88.62%,满足棉花精量播种的技术要求。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2024.

[2] 马佳琦,朱欣怡,高金龙,等. 1990—2020 年新疆棉花生产格局动态及影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(5): 864 - 876.
Ma Jiaqi, Zhu Xinyi, Gao Jinlong, et al. Dynamic patterns and influencing factors of cotton production in Xinjiang from 1990 to 2020[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(5): 864 - 876. (in Chinese)

[3] 谭海祥,黄福江. 新疆棉花产业与区域经济发展耦合度及提升路径研究[J]. 南方农业, 2025, 19(5): 126 - 131, 137.
Tan Haixiang, Huang Fujiang. Study on the coupling degree and improvement path between Xinjiang cotton industry and regional economic development[J]. South China Agriculture, 2025, 19(5): 126 - 131, 137. (in Chinese)

[4] 倪向东,徐国杰,王琦,等. 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 58 - 67.
Ni Xiangdong, Xu Guojie, Wang Qi, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder array precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 58 - 67. (in Chinese)

[5] 张春艳,康建明,彭强吉,等. 棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 106 - 116.
Zhang Chunyan, Kang Jianming, Peng Qiangji, et al. Design and test of secondary seed feeding mechanism of air-suction roller dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 106 - 116. (in Chinese)

[6] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73 - 85.
Hu Mengjie, Xia Junfang, Zheng Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73 - 85. (in Chinese)

[7] 陈学庚,卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35 - 38.
Chen Xuegeng, Lu Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35 - 38. (in Chinese)

[8] 卢博,倪向东,李树峰,等. 气吸双滚筒式棉花精量排种器的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(6): 249 - 256, 264.
Lu Bo, Ni Xiangdong, Li Shufeng, et al. Design and testing of an air-absorbing double-drum precision cotton seed feeder[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(6): 249 - 256, 264. (in Chinese)

[9] 冯洋洋,纪超,陈金成,等. 棉花气吸式排种机构的优化[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 140 - 149.
Feng Yangyang, Ji Chao, Chen Jincheng, et al. Optimization of cotton air suction seed metering device[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(8): 140 - 149. (in Chinese)

[10] 王磊,陈永成,王维新. 棉花播种机排种器的现状和发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2005(3): 80 - 82.
Wang Lei, Chen Yongcheng, Wang Weixin. Status quo and developing direction of cotton seed metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2005(3): 80 - 82. (in Chinese)

[11] 王吉奎,郭康权,吕新民,等. 夹持式棉花精密穴播轮改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 43 - 47.
Wang Jikui, Guo Kangquan, Lü Xinmin, et al. Experiment and improvement on clamping cotton precision seeding dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 43 - 47. (in Chinese)

[12] 魏松,丁幼春,董万静,等. 穴粒数可调气吸式棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2026,57(2):32 - 45.
Wei Song, Ding Youchun, Dong Wanjing, et al. Design and experiment of precision pneumatic seed metering device with adjustable seeds per hole for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(2): 32 - 45. (in Chinese)

[13] 罗海峰,刘光辉,吴明亮,等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):227 – 239.
Luo Haifeng, Liu Guanghui, Wu Mingliang, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227 – 239. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 吴海峰,张学军,史增录,等. 摆杆夹持式玉米精量排种器的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 291 – 302.
Wu Haifeng, Zhang Xuejun, Shi Zenglu, et al. Design and test of pendulum-clamped corn precision seed metering device[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 291 – 302. (in Chinese)

[16] 王珏,杨欣,王建合,等. 基于离散元法的棉花勺式排种器排种性能模拟[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 873 – 878.
Wang Jue, Yang Xin, Wang Jianhe, et al. Simulation for performance to seed cotton with scoop-type based on discrete element method[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(6): 873 – 878. (in Chinese)

[17] 徐照耀,周勇,胡梦杰,等. 基于 EDEM 的内充种式棉花排种器排种仿真试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(4): 175 – 183.
Xu Zhaoyao, Zhou Yong, Hu Mengjie, et al. Seeding simulation test of inside-filling cotton seed-metering device based on EDEM[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(4): 175 – 183. (in Chinese)

[18] 王龙,贺小伟,胡灿,等. 基于离散元法的棉花窝眼式穴播器排种性能模拟与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 151 – 156.
Wang Long, He Xiaowei, Hu Can, et al. Simulation and experiment for seeding performance of socket cotton dibbler based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 151 – 156. (in Chinese)

[19] Shi Z L, Wang M J, Zhang Xuejun, et al. Calibration and optimization of discrete element parameters for coated cotton seeds [J]. Engenharia Agrícola, 2024, 44: e20230085.

[20] 胡梦杰,周勇,汤智超,等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 175 – 180.
Hu Mengjie, Zhou Yong, Tang Zhichao, et al. Mechanical properties of the delinted and coated cottonseed[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(1): 175 – 180. (in Chinese)

[21] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58 – 67.
Lei Xiaolong, Yang Wenhao, Liu Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58 – 67. (in Chinese)

[22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[23] 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)

[24] 胡梦杰. 内充气力式棉种精密排种器设计与仿真分析[D]. 武汉: 华中农业大学,2022.
Hu Mengjie. Design and simulation analysis of inside-filling pneumatic precision seed-metering device for cotton seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[25] 李玉道,宋占华,孙学振. 勺轮式棉花排种器排种性能分析与试验[J]. 农机化研究,2025,47(5):109 – 115,125.
Li Yudao, Song Zhanhua, Sun Xuezhen. Analysis and experiment on the performance of spoon wheel cotton seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5):109 – 115,125. (in Chinese)

[26] Wang L, Ran X Y, Shi L, et al. Simulation and optimization of a rotary cotton precision dibbler using DEM and MBD coupling [J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1411.

[27] 赖庆辉,高筱钧,张智泓,等. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 27 – 37.
Lai Qinghui, Gao Xiaojun, Zhang Zhihong, et al. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27 – 37. (in Chinese)

[28] 牛莉. 油菜种-肥同播同施集排器设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Niu Li. Design and experiment of rapeseed-fertilizer same sowing and same application collector[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[29] 王磊,舒彩霞,席日晶,等. 小麦气送集排器等宽多边形槽齿轮式供种装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 53 – 63.
Wang Lei, Shu Caixia, Xi Rijing, et al. Research on seed feeding device with constant width polygon groove-tooth wheel of air-assisted centralized metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 53 – 63. (in Chinese)