doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.004

穴粒数可调气吸式棉花精量排种器设计与试验

魏　松[1]　丁幼春[1,2]　董万静[1]　廖　青[1]　王思达[1]　农　峰[1]　黄　强[3]

（1. 华中农业大学工学院，武汉 430070；2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070；
3. 荆州市农业科学院，荆州 434000）

摘要：针对长江流域麦后夏直播棉花作业时节降雨充沛，黏重土壤水分蒸发易板结，常规单粒播种易存在出苗破土难、出苗率低等问题，结合该区域内棉花精量直播穴粒数可调农艺要求，本文提出一种通过调节双吸种圆盘重叠空间切换不同吸孔组合，实现单粒吸种、单-双-单粒吸种和双粒吸种的穴粒数单双粒可调气吸式排种器。阐述了其结构与工作原理，设计了关键部件参数。基于 DEM－CFD 耦合方法解析了型孔直径、排种盘转速和吸种负压对排种性能影响规律。以型孔直径、吸种负压和排种盘转速为试验因素，以合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标，进行了正交试验，经台架试验验证最优参数为型孔直径 3.3 mm、吸种负压 4.3 kPa 和排种盘转速 30 r/min，此时单粒吸种、单-双-单吸种和双粒吸种合格指数、重播指数和漏播指数分别为：94.1%、93.8% 和 92.4%，5.34%、4.65% 和 6.01%，0.56%、1.55% 和 1.59%。在最优参数组合下进行田间试验，结果表明，当作业速度为 6 km/h 时，排种合格指数大于 89.3%，漏播指数小于 4.42%，重播指数小于 6.28%。单粒排种、单-双-单粒排种和双粒排种出苗率和缺苗断垄率分别为 78.98%、80.3% 和 84.66%，19.24%、18.92% 和 12.08%，双粒及单双交错播种较单粒播种，缺苗断垄率分别降低 7.16、0.32 个百分点，出苗率分别提高 5.68、4.36 个百分点，有效提升保苗率，保证了棉花群体建成，利于机械化一播全苗与高产稳产。

关键词：棉花；单双粒可调；夏直播棉花；气吸式排种器；排种性能

中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)02-0032-14　　**OSID**：

Design and Experiment of Precision Pneumatic Seed Metering Device with Adjustable Seeds per Hole for Cotton

WEI Song[1]　DING Youchun[1,2]　DONG Wanjing[1]　LIAO Qing[1]　WANG Sida[1]　NONG Feng[1]　HUANG Qiang[3]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*
3. *Jingzhou Academy of Agricultural Sciences*, *Jingzhou* 434000, *China*)

Abstract: In view of the problems in the Yangtze River Basin, such as abundant rainfall during the post-wheat direct seeding period, easy compaction of heavy clay soil due to water evaporation, difficulty in seedling emergence and low emergence rate in conventional single-seed sowing, combined with the agronomic requirement of adjustable number of seeds per hill for cotton precision direct seeding in this region, a pneumatic seed metering device with adjustable seeds per hill was proposed. This device can realize single-seed suction, single-double-single seed suction and double-seed suction by adjusting the overlapping space of dual seed-suction discs to switch different combinations of suction holes. The structure and working principle of the device were elaborated, and the parameter design of key components was carried out. Based on the DEM－CFD coupling method, the influence laws of seed hole diameter, rotation speed of the seed metering disc and seed suction negative pressure on the seed metering performance were analyzed. Taking seed hole diameter, seed suction negative pressure and rotation speed of the seed metering disc as experimental factors, and qualified index, replay index and miss-seeding index as evaluation indicators, orthogonal optimization experiments were conducted. The

收稿日期：2025－07－23　修回日期：2025－08－30

基金项目：湖北洪山实验室重大科研项目(2021hszd006)和湖北省棉花科技支撑计划项目(2024)

作者简介：魏松(1994—)，男，博士生，主要从事农业机械设计及理论研究，E-mail：weisong0707@163.com

通信作者：丁幼春(1978—)，男，教授，博士生导师，主要从事智慧农业技术与装备研究，E-mail：kingbug163@163.com

results showed that under the optimal parameter combination verified by bench tests, i. e., seed hole diameter of 3. 3 mm, seed suction negative pressure of 4. 3 kPa and rotation speed of the seed metering disc of 30 r/min, the qualified indexes, replay indexes and miss-seeding indexes corresponding to single-seed suction, single-double-single seed suction and double-seed suction were 94. 1%, 93. 8% and 92. 4%; 5. 34%, 4. 65% and 6. 01%; 0. 56%, 1. 55% and 1. 59%, respectively. Field experiments under the optimal parameter combination showed that when the operating speed was 6 km/h, the qualified index of seed metering was greater than 89. 3%, the miss-seeding index was less than 4. 42%, and the replay index was less than 6. 28%. The later seedling emergence results showed that the emergence rates and the rates of missing and broken seedlings for single-seed sowing, single-double-single sowing and double-seed sowing were 78. 98%, 80. 3% and 84. 66%; 19. 24%, 18. 92% and 12. 08%, respectively. Compared with single-seed sowing, double-seed sowing and single-double alternating sowing reduced the rate of missing and broken seedlings by 7. 16 and 0. 32 percentage points respectively, and increased the emergence rate by 5. 68 and 4. 36 percentage points, respectively. This effectively improved the seedling preservation rate, ensured the establishment of cotton population, which was conducive to mechanized full seedling emergence in one sowing as well as high and stable yield.

Key words: cotton; adjustable single and double seeds; summer direct-seeding cotton; pneumatic seed metering device; seeding performance

0　引言

棉花是国内重要的经济作物与战略物资，长江流域是国内三大棉花主产区之一，其主要采用麦后机械直播[1-2]。在长江流域棉区，播种主要集中在5—6 月，这时期该地区高温多雨，黏重土壤天晴易板结，常规单粒排种存在出苗破土难的问题，无法实现“一播全苗”，因此，棉花栽培专家提出根据气温和作业土壤情况实施“一穴多粒”精量露地播种的种植方式[3]，具体为单粒精量、单-双-单交错精量和双粒精量排种播种模式，而现有精播机在穴粒数调节时，通常需更换不同型号的排种盘，存在操作繁琐，播种作业效率低等问题。

棉花直播主要分为露地直播和地膜覆盖直播，新疆作为国内第一产棉区，主要采用地膜覆盖精量穴播技术[4]，陈学庚等[5]研制了气吸式棉花精密穴播器，可实现精量取种、清种、精准投种和精确点种，单粒穴播量合格率达到 95% 以上。张学军等[6]设计了一种双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器，采用双仓分离设计，利用独立仓室携种代替摩擦携种，减少了作业过程中相对运动部件对棉种的损伤。精量单粒穴播技术主要适用干旱及半干旱地区作业，若遇雨水，致使土面易板结，出苗难，且对土壤质地及整地质量要求高，不适用长江流域棉区作业。长江流域主要采用露地直播方式，胡梦杰等[7]以鄂抗棉 10 号棉种固有物料特性，结合内充充种方式与气吸式排种器结构特点，设计一种内充气力式棉花高速精量排种器，台架试验结果表明，当作业速度为 8 km/h 时，单粒合格指数大于 90%。YAZGI 等[8]以棉花和玉米种子为研究对象，开展垂直圆盘气吸式排种器不同吸孔数量及作业速度对排种性能的影响。当播种作业速度为 3 ~ 6 km/h 时，具有良好的适应性。气吸式排种器由于其气流吸附和精量播种的优点，避免了机械结构对种子造成的损伤，因此被广泛应用于田间播种作业中[9-13]。

基于现有圆盘型排种器，本文通过调节双吸种圆盘重叠空间切换不同吸孔组合，以实现单粒吸种、单-双-单吸种和双粒吸种的穴粒数可调气吸式排种器。可根据实际情况选择单粒精量、单-双-单交错精量和双粒精量排种播种模式，以提高棉花破土能力，保证出苗率。

1　长江流域麦后直播棉花种植模式

长江流域麦后直播棉花种植模式为基于等行距(76 cm)的种植方法，直播棉花种植模式作业效果如图 1 所示，三行一厢，行距为 76 cm，等行种植，厢宽为 250 cm，厢面两侧开畦沟便于排水，畦沟深 15 cm、宽 30 cm，种植密度在株距 14. 6 ~ 21. 9 cm 之间调整。

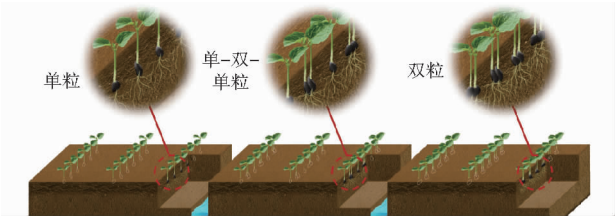


图 1　长江流域麦后直播棉花种植模式

Fig. 1　Post-wheat direct-seeding cotton cultivation mode in Yangtze River Basin

2　排种器结构与工作原理

穴粒数可调式棉花气吸精量排种器整体结构如

图 2 所示。主要包括观察口、第 1 排种盘、弹簧定位销、密封圈、排种轴、左外壳、第 2 排种盘、右种室等部分组成。其中，排种盘为保障排种质量的核心构件，在排种盘圆周开设成对的吸种孔，并通过调节第 1 排种盘与第 2 排种盘相对位置，进而改变套盖包覆第 2 排种盘吸种孔状况，实现排种盘在一穴双粒、单-双-单交错及单粒精播间的切换。

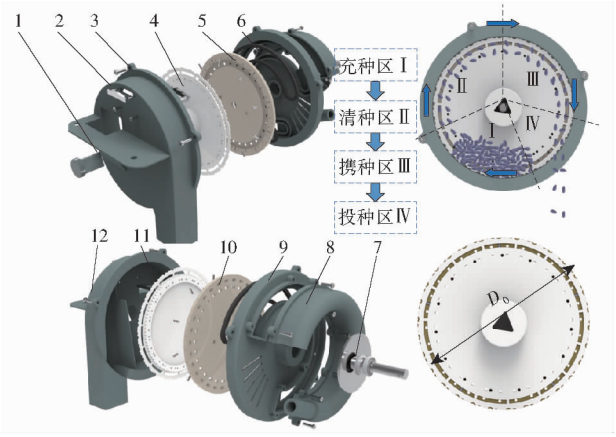


图 2 排种器总体结构及工作原理图

Fig. 2 Overall structure and working principle diagram of seed meter

1. 旋转手柄 2. 观察口 3. 螺钉 4. 清种刀 5. 弹簧定位销 6. 密封圈 7. 排种轴 8. 气道管 9. 右外壳 10. 第 2 排种盘 11. 第 1 排种盘 12. 左外壳

排种器工作时，棉花种子从充种口落入由卸种板、排种盘组成的种室，完成充种过程；排种盘在传动轴带动下同步转动，经风机负压作用，与密封圈在吸种孔位置形成负压区，利用排种盘两侧压差，使棉种吸附于型孔上随排种盘转动；当排种盘转动至清种区Ⅱ时，在清种装置作用下完成清种作业；经携种区Ⅲ后，转动至投种区Ⅳ时，在导种管内壁和重力作用下沿导种管底部有序滑落至土壤中，完成排种过程。

3 关键部件设计

棉花种子的物料特性是排种器关键部件设计主要依据[14]。选用长江流域麦/油后夏直播棉花种植模式广泛推广的特早熟品种“华棉 2270”，根据棉花种子三轴尺寸，分别选取椭球形、扁形种子对其物料特性参数进行测量。棉种尺寸分布如图 3 所示。由图 3 可知，棉花种子三轴尺寸符合正态分布。棉种长度 L 为 8.22 ~ 9.98 mm，长度集中在 8.8 ~ 9.6 mm 的棉花种子占全部棉花种子的 69%，宽度 W 为 4.16 ~ 6.04 mm，宽度为 4.8 ~ 5.4 mm 的棉花种子占全部棉花种子的 64%，厚度 T 为 3.19 ~ 5.63 mm，厚度为 4.0 ~ 4.8 mm 的棉花种子占全部棉花种子的 74%。

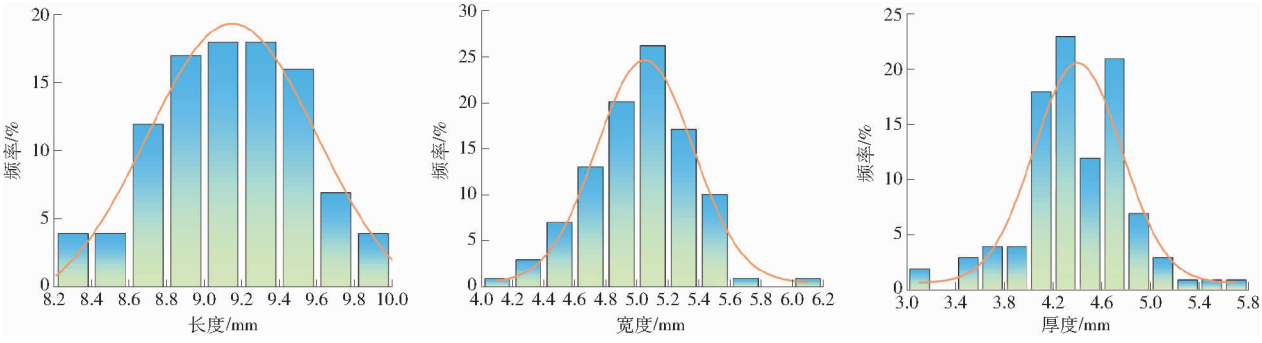


图 3 三轴尺寸频率分布直方图

Fig. 3 Histogram of frequency distribution of cotton seed sizes

3.1 穴粒数可调结构设计

吸孔可组合、穴粒数可调节排种盘结构如图 4 所示。其主要由第 1 排种盘、第 2 排种盘、弹簧定位销、固定槽、环形凹槽、半圆槽口、外沿吸孔、内沿吸孔、观察槽口、吸孔组等组成。

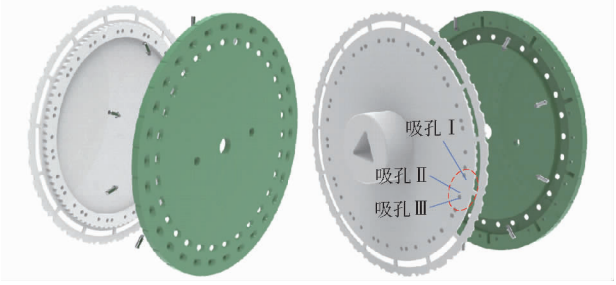


图 4 穴粒数可调排种盘结构图

Fig. 4 Structure diagrams of adjustable seed metering disk

穴粒数可调排种装置主要通过 2 个排种盘切换不同吸孔组合实现不同方式吸种。第 1 排种盘与第 2 排种通过弹簧定位销钉进行固定，并且在第 1 排种盘背面有凸台，凸台均匀分布于销钉活动段凹槽，第 1 排种盘背面凸台与第 2 排种盘的环形凹槽实现定位安装，当需切换排种盘时，通过旋转手柄转动第 1 排种盘，当第 1 排种盘上外沿观察槽口与第 2 排种盘外沿的半圆槽口重合同心时即调整结束，此时弹簧定位销正好固定 2 个排种盘。分别有不同尺寸观察槽口（大、中和小），如图 5a 所示，当第 1 排种盘“小”观察槽口与第 2 排种盘上的半圆槽口同心重合时，此时组合排种盘只剩第 2 排种盘外沿吸孔

与负气压室相通，可实现单粒吸种。同理，如图 5b 所示，当第 1 排种盘“中”观察槽口与第 2 排种盘上的半圆槽口同心重合时，此时组合排种盘第 2 排种盘内沿吸孔被间隔堵塞且外沿吸孔始终与负气压室相通，可实现单-双-单交错吸种。如图 5c 所示，当第 1 排种盘“大”观察槽口与第 2 排种盘上的半圆槽口同心重合时，此时组合排种盘第 2 排种盘内外沿吸孔始终与负气压室相通，可实现双吸种。由于第 1 排种盘吸孔直径小于第 2 排种盘内沿吸孔直径，当 2 排种盘组合时，吸孔直径变为第 1 排种吸孔直径。

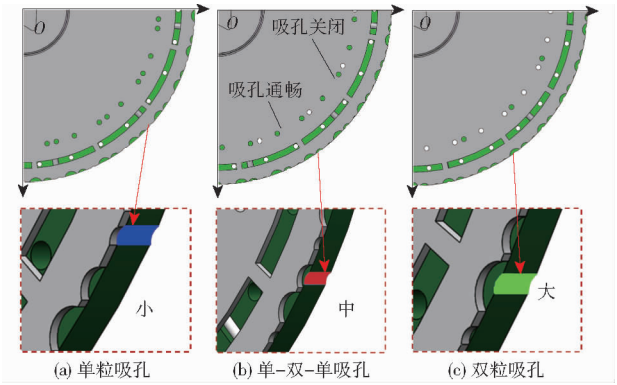


图 5　吸孔组合调节示意图

Fig. 5　Schematics of suction hole combination adjustment

3.2　排种盘结构设计

3.2.1　排种盘尺寸设计

排种盘直径决定着排种器整体结构尺寸，其尺寸过大，风机功率消耗增加，尺寸过小，不利于型孔分布，充种效果不好，吸种稳定性差。因此，建立排种盘尺寸与运动学关系式[15]为

$$t=\frac{30\theta}{\pi n} \tag{1}$$

式中　t——充种时间，s

θ——充种角，rad

n——排种盘转速，r/min

由式(1)可知，充种时间取决于充种角与排种盘转速，而排种盘直径并不会影响吸孔在充种区的滞留时长，因此增大排种盘直径无法延长吸孔充种时间。气吸式排种器排种盘直径为 140 ~ 260 mm，基于此，选定排种盘直径为 230 mm。型孔数是影响吸种质量的关键因素。结合棉花直播机田间作业要求和农业机械设计准则要求。建立排种盘转速与作业速度关系为

$$\begin{cases} n=\dfrac{60v_m}{LZ} \\ 60v_0=n\pi(D_0-2d_0) \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$ZT'=\pi(D_0-2d_0) \tag{3}$$

式中　L——株距，取 0.15 m

v_m——机具最大作业速度

D_0——排种盘直径

Z——排种盘型孔数

d_0——型孔中心线到排种盘边缘的距离，m

v_0——排种盘线速度，m/s

T'——相邻两型孔弧长，m

最外侧型孔中心线到排种盘边缘的距离 d_0 应大于棉花种子最大的三轴尺寸，取 d_0 为 20 mm，型孔中心线到排种盘中心线的距离 r_0 为 100 mm，排种盘线速度小于 0.5 m/s，作业速度小于 8 km/h。由式(3)得，型孔数应大于 18.62，综合考虑实际应用场景以及单双切换的关系，选取型孔数为 30，相邻型孔中心角为 12°。

3.2.2　双排孔间距设计

两排吸孔分布间距直接影响双排吸种排种质量[16]。如图 6 所示，点 A 为棉花种子长度方向沿排种盘径向内侧的吸孔中心，点 B 为棉花种子长度方向沿排种盘径向外侧吸孔中心，点 C、D 为内外侧吸孔倾斜中心，点 O 为排种盘中心。为了使内外侧型孔均能够充分充种，采用沿种盘周向均匀布置内外侧型孔，即 $\theta_1=\theta_2$。

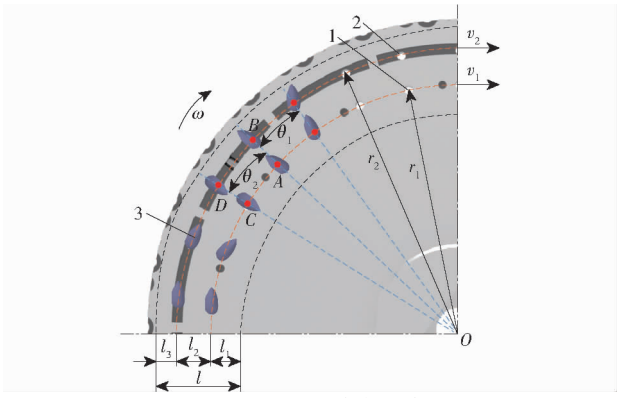


图 6　吸孔间距确定示意图

Fig. 6　Schematic for suction hole spacing determination

1. 内侧吸孔　2. 外侧吸孔　3. 棉花种子

双排孔间距需满足互不干涉条件，根据各点位置关系可得

$$\begin{cases} l=l_1+l_2+l_3 \\ r_2=r_1+l_2 \\ v_1=\dfrac{10^{-4}}{3}\pi n r_1 \\ v_2=\dfrac{10^{-4}}{3}\pi n r_2 \\ s_1=\dfrac{\theta_1\pi r_1}{180} \end{cases} \tag{4}$$

式中　l——气室边界水平宽度距离，mm

l_1——内侧型孔中心距气室边界最短距离，mm

l_3——外侧型孔中心距气室边界最短距离，mm

l_2——相邻两型孔中心距离,mm
r_1——内侧型孔中心距排种盘中心距离,mm
r_2——外侧型孔中心距排种盘中心距离,mm
v_1——内侧型孔吸附种子对应的线速度,m/s
v_2——外侧型孔吸附种子对应的线速度,m/s
s_1——外侧两型孔中心弧长,mm

由图 6 可知,为了防止内外行型孔充种时相互干扰,相邻内外行型孔距离 l_2 应大于棉花种子最大尺寸,即 l_2 大于 9.62 mm。由式(4)可知,r_1 与 r_2 相差越大,内外行型孔中心距离越大,且型孔中心到排种盘中心距离 r_1、r_2 越远,型孔经过充种区的弧长也就越长。因此,为了让内外行型孔线速度相差较小,减小投种时内外行初速度差异,两行型孔中心到排种盘中心距离差值应较小[17],最终选择两排型孔分度圆半径 $r_1=90$ mm 和 $r_2=100$ mm。

3.4 种子吸附过程分析

充种质量直接影响排种器性能[18-22]。采用动力学方法对种子进行分析,如图 7 所示。在充种过程中,气体与固体颗粒之间存在相对运动。颗粒处于气流环境中时,会受到气体所施加的气流阻力,种子受到足够大的阻力后,将克服重力场和种群阻力,向孔移动并被吸附,跟随排种盘排列。种子上的气流阻力主要分 2 个阶段作用。第 1 阶段是吸附种子阶段。棉花种子能更好完成充种,需满足条件

$$\begin{cases} F_1\cos\alpha_2 + F_n\cos\alpha_1 > 0 \\ F_1\sin\alpha_2 + G > F_n\sin\alpha_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中 F_1——充种时作用在种子上的吸力,N
F_n——种盘对种子的支持力,N
G——种子所受重力,N
α_1——F_n 与孔轴线夹角,(°)
α_2——F_1 与孔轴线夹角,(°)

整理式(5)得

$$\begin{cases} F_1 > -\dfrac{F_n\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2} \\ F_1 > \dfrac{F_n\sin\alpha_2 - G}{\sin\alpha_2} \end{cases} \tag{6}$$

从式(6)可知,随着 α_1 减小或 α_2 增大,将种子吸附到孔上所需的阻力越大,因此靠近孔且 α_1 较大,较大 α_2 的种子会优先向孔移动并被吸附。在吸附种子阶段,利用伯努利方程分析种子周围压力的受力情况,种子力学关系为

$$\begin{cases} p + \rho g h + \dfrac{1}{2}\rho v^2 = C \\ F_1 = ps \\ s = C_1\dfrac{Q}{\pi d} \end{cases} \tag{7}$$

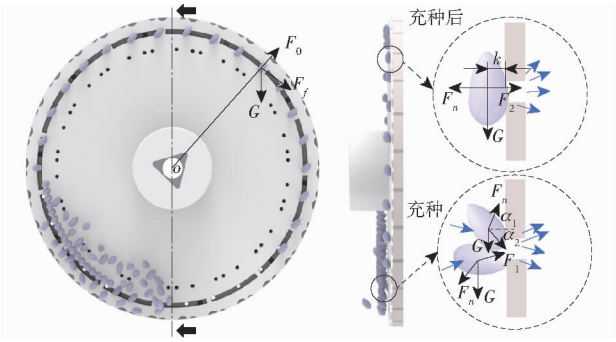


图 7 棉花种子吸附过程分析

Fig. 7 Analysis of cotton seed adsorption postures

其中
$$Q = vs \tag{8}$$

式中 p——吸孔处负压,Pa
ρ——空气密度,kg/m^3
g——重力加速度,m/s^2
h——竖直高度,m
v——风速,m/s
s——气流吸附面积,m^2
d——吸孔直径,m
Q——空气流量,m^3/s
C、C_1——常数

联合式(7)、(8)得

$$F_1 = C_1(C - \rho g h)\frac{2Q}{\pi d} - \frac{\rho Q \pi d}{4C_1} \tag{9}$$

由式(9)可知,作用在种子上的吸力受流量和孔径的影响,随着 Q 增加,种子上阻力增大,种子更易完成充种,而随着 d 增加,种子上阻力减小,使充种更困难。第 2 阶段是与种群分离,种子吸附到孔上并与排种盘一起旋转。在与种群分离之前,种子仍受种群摩擦的影响。然而,由于距排种盘中心距离不同,两排孔对种子施加的向心力和摩擦力不同,棉种完成充种受力关系为

$$Mk = \frac{d}{2}(F_2 - F_n) \tag{10}$$

其中

$$\begin{cases} M = \sqrt{F_f^2 + F_0^2 + (mg)^2 + 2\sqrt{F_f^2 + F_0^2}\,mg\cos\theta_3} \\ F_0 = m\omega^2 r \end{cases} \tag{11}$$

式中 F_0——种子所受的离心力,N
F_2——充种后种子所受吸力,N
F_f——种子间的内摩擦力,N
m——种子质量,kg
k——种子重心到排种盘的距离,m
ω——种盘角速度,rad/s
r——吸孔中心到种盘中心距离,m
θ_3——F_0、F_f 合力与 G 夹角,(°)

M——G、F_0与 F_f合力，N

取种子充种后极限位置，联合式(10)、(11)可得

$$F_2=\frac{2C_2k}{d}\left(1+\frac{\omega^2 r}{g}+\mu\right) \tag{12}$$

式中　μ——摩擦因数

根据(12)可知，种子物理特性、吸孔直径、排种盘角速度和负压决定作用在吸附种子上 2 个阶段的吸力。随着排种盘角速度、种子质量和种子重心到排种盘距离增加，种子与排种盘一起从种群中分离所需的阻力增加，但随着孔径增加而减小。

3.5　清种装置及清种过程分析

清种装置分上、下侧机构(图 8)：上侧位于排种盘外侧，清外侧吸孔，用锯齿状工作面，连续 2 次由外到内碰撞清除多余种子；下侧清种刀为 3 次锯齿状刮种面，对内侧种子 3 次碰撞，外侧孔多单粒，少多粒。充种时，气流经未完全密封的型孔会裹挟其他种子压附于同一型孔，形成“一孔多种”的重播现象；清种装置可清除劣势种子，使型孔仅留 1 粒[23]。种盘摩擦力的阻碍作用可忽略，清种分析如图 8 所示。

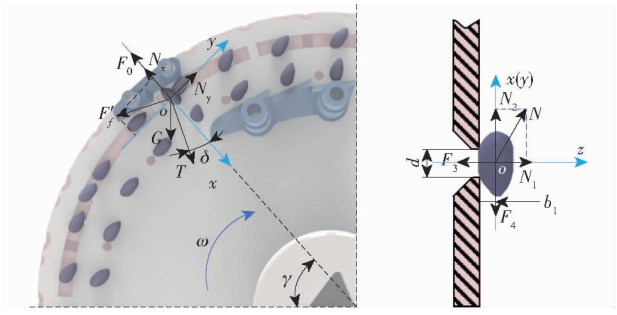


图 8　清种装置及过程分析

Fig. 8　Seed cleaning device and process analysis

建立力学平衡方程为

$$\begin{cases} T\cos\delta+G\sin\gamma-N_x-F_0-F'_f\sin\delta=0 \\ T\sin\delta+G\cos\gamma+F'_f\cos\delta-N_y=0 \\ F_3-N_1=0 \\ F_3\dfrac{d}{2}-F_4b_1=0 \end{cases} \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} F_f=\mu T \\ F_4=\sqrt{N_x^2+N_y^2} \end{cases}$$

式中　T——清种装置对棉种推力，N

N_x——棉种支持力 x 方向分力，N

N_y——棉种支持力 y 方向分力，N

F'_f——清种装置对棉种的摩擦力，N

F_3——对棉种的吸附力，N

F_4——在 xoy 平面内棉种所受力的合力，N

γ——棉种质心与水平方向的夹角，(°)

δ——推力方向与 x 方向的夹角，(°)

整理式(13)得

$$F_3=\frac{2b_1\sqrt{\left[T(\cos\delta-\mu\sin\delta)+G\sin\gamma-F_0\right]^2-\left[T(\sin\delta+\mu\cos\delta)+G\cos\gamma\right]^2}}{d} \tag{14}$$

由吸附力与真空度之间的关系得棉种有效吸附面积 s 为

$$s=\frac{F_3}{p} \tag{15}$$

联合式(14)、(15)可得，当型孔直径和真空负气压确定后，清种装置作用力 T 增大时，优势种子有效吸附面积 s 增大、劣势种子 s 减小，直至清离劣势种子。故清种装置设计需遵循渐增优势种子有效接触面积 s 的原则，清种装置与型孔位置影响 T，进而影响清种效果。需保证清种装置与多粒棉种接触并产生作用力，且不与单粒吸种接触，满足上侧清种装置清种斜面距吸孔中心距离大于棉种最大长度的一半，并大于棉种最小长度，综合考虑选取刮种刀与吸孔中心距离 7 mm，相邻两端清种刀夹角为 15°，斜面刀角度为 53°。考虑内侧种子发生重吸情况较多，采用 3 次锯齿状刮种棉，其余结构参数与上侧清种装置一致。

3.6　投种过程分析

气吸排种器投种阶段是种子从型孔吸附状态向脱离释放的关键过程，其核心是通过切断负压气流，使种子失去吸附力并在自身重力、离心力及外部作用力下脱离型孔，落入种沟。考虑棉花千粒质量较大，同时为降低排种过程中的风机能耗，依靠种子自重投种，种子进入投种区后，气室内负压气流受隔板的阻隔，在投种区域形成无压区。投种过程分析如图 9 所示，此时种子主要受重力，离心力和种子与型孔壁的摩擦力。

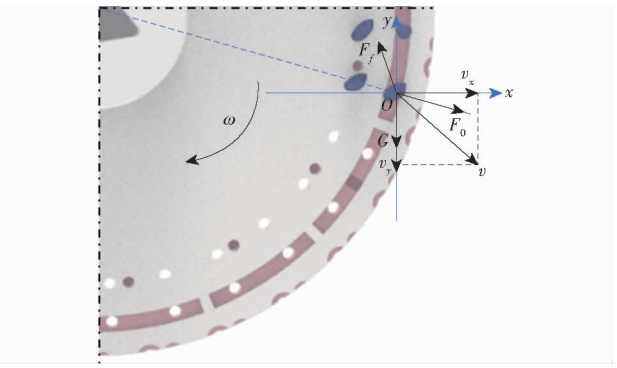


图 9　投种过程分析

Fig. 9　Analysis of seed dropping process

种子脱离型孔临界条件为离心力与重力合力大于种子与型孔静摩擦力，即

$$\sqrt{F_0^2+G^2}>F_f \tag{16}$$

以种子脱离瞬间为起点,建立水平(旋转切向)和竖直方向的运动方程为

$$\begin{cases} x=\omega rt+\dfrac{1}{2}\omega^2 rt^2 \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{17}$$

式中 x——种子 x 方向位移,m

y——种子 y 方向位移,m

由式(17)可得,种子落地时水平偏移量

$$x=\omega r\sqrt{\frac{2y}{g}}+\frac{\omega^2 ry}{g} \tag{18}$$

由式(18)可知,投种偏移量与排种盘角速度、旋转半径及投种高度正相关,为优化排种盘参数(如转速、型孔位置)以减小投种偏差提供理论依据。

4 排种性能数值模拟仿真

4.1 棉花种子仿真模型构建

为解决气固双向耦合仿真中颗粒体积需小于流场最小网格体积的问题,采用颗粒替换方式[24-27]。选取长江流域棉区麦后直播棉种"华棉 2270"品种的棉花种子,根据三轴尺寸,分别选取扁形、椭球形种子。从 2 种棉花种子中选取可表示三轴尺寸平均值的籽粒作为建模模型,最大程度还原棉花种子外形轮廓。通过三维扫描种子三维模型,最大程度还原棉花种子。2 种棉花种子如图 10 所示。

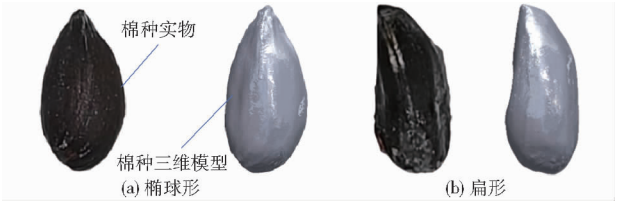


图 10 2 种尺寸棉花种子模型

Fig. 10 Two-size cotton seed simulation models

4.2 仿真模型建立

EDEM 中与种子接触的部件主要有排种盘、壳体。棉花排种器内部结构较为复杂,简化后模型分为型孔、气室、出气室,各部分均为独立实体。运用 Fluent Meshing 模块对目标模型实施网格划分,过程中需准确定义模型的流体入口与出口边界。对于吸孔接触面,统一将其设定为 interface 类型边界,确保各接触面间的网格数据可实现交互。完成网格划分并确认边界设置无误后,将生成的网格以适配 Fluent 的格式进行保存,为后续导入操作做好准备。启动 Fluent 软件,导入已保存的网格文件。在软件的物理模型设置中,找到动网格相关配置项,选择并启用滑移网格功能,以实现模型中不同区域网格的相对运动模拟,网格划分及相关设置如图 11 所示。



图 11 网格划分

Fig. 11 Mesh generation

4.3 仿真参数设定

排种器与棉花种子接触部分采用树脂 3D 打印,对棉花种子物性参数与接触参数进行参数标定[28-31],仿真参数如表 1 所示。在 EDEM 中设置时间步长为 3×10^{-5} s,Fluent 中时间步长为 EDEM 的整数倍,设置为 6×10^{-4} s。EDEM 中 0.01 s 保存一次数据,Fluent 中 0.001 s 保存一次数据,设置 Fluent 步长为 6×10^{-5} s,最大迭代次数为 60[32]。在 EDEM 建立颗粒场,将排种器结构简化为与种子接触 3 个部分:主壳体、排种盘和挡种刷。设置颗粒工厂,使进种口在 0~0.26 s 产生 1 000 粒种子,如图 12 所示。

表 1 EDEM 仿真参数

Tab. 1 EDEM simulation parameters

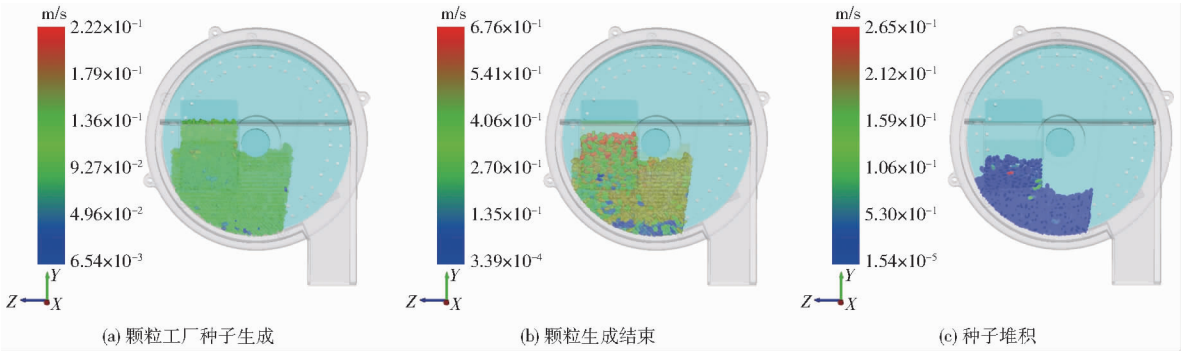
材料	参数	数值
棉花种子	密度/(kg·m^{-3})	640
	泊松比	0.25
	剪切模量/MPa	1.0
排种器(透明光敏树脂)	密度/(kg·m^{-3})	1 050
	泊松比	0.40
	剪切模量/MPa	327
棉花种子-棉花种子	恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.56
	动摩擦因数	0.15
排种器-棉花种子	恢复系数	0.12
	静摩擦因数	0.29
	动摩擦因数	0.15

4.4 EDEM-CFD 耦合仿真过程

启动 Fluent 并导入 mesh 文件,连接交界面后用非定常求解,选 $k-\varepsilon$ 湍流模型及 standard 模型,完成速度、k 向区域参数设置与风压、壁面边界条件定义后保存。在 EDEM 中启动 Coupling Server 待耦合,Fluent 导入 UDF,待 Model 栏出现"EDEM Coupling (Not Connected)"后点击 Connect,状态变为"Connected"即完成耦合,最后点 Calculate 启动计算。仿真过程如图 13 所示。

4.4.1 仿真精度验证试验

吸种稳定性是棉花种子精量播种的前提[32-35]。



(a) 颗粒工厂种子生成　　(b) 颗粒生成结束　　(c) 种子堆积

图 12　种子颗粒生成过程

Fig. 12　Seed particle filling process

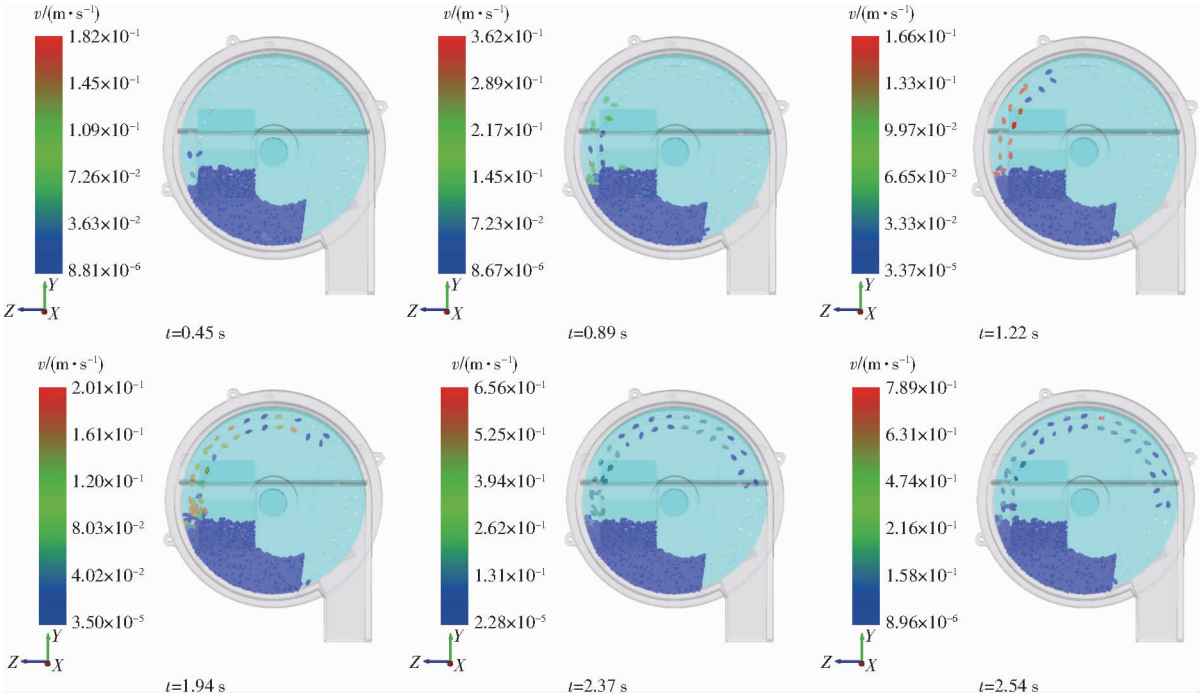


图 13　仿真过程

Fig. 13　Simulation process diagram

为验证 DEM－CFD 耦合仿真的准确性，通过大量预试验，设定排种盘转速为 30 r/min、气压为 4 kPa，以单粒模式为例，进行仿真和台架试验。比较不同出气口直径(2.5～3.5 mm)仿真与实际试验气流速度和漏播情况。每组试验重复 3 次，记录平均值，试验结果如图 14 所示。由图 14 可知，随着型孔直径增大，气流速度逐渐减小，仿真与实测气流速度随出气口直径变化趋势一致。试验结果存在误差，但整体误差较小，原因为仿真试验气流条件理想，而台架试验中排种器密封装置存在漏气现象。数值计算结果表示理想条件，实际中气流与种子相互作用复杂，种子形状和大小不均，机械传动存在振动等，仿真与实测气流速度相对误差不高于 20.4%，在可接受范围内。

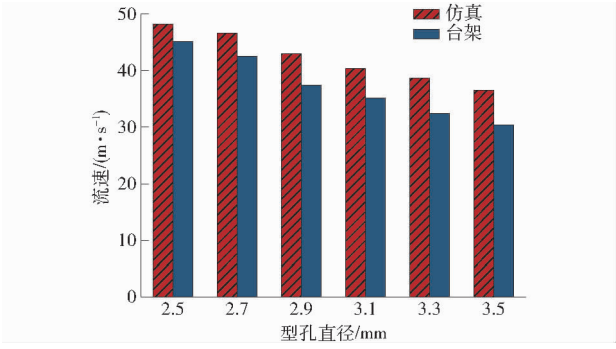


图 14　型孔直径与气流速度关系

Fig. 14　Relationship between orifice diameter and airflow velocity

4.4.2　型孔直径单因素试验

单因素试验每组重复 3 次，取平均值。由图 15 可知，型孔直径对排种器漏播指数、合格指数影响呈“先优后劣”趋势：型孔直径较小时，气吸吸附力弱，种子易在排种中脱落，漏播指数高、合格指数低，随型孔直径增大，气吸作用力增强，种子可稳定吸附于吸孔并顺利排出，漏播减少、合格指数上升，当型孔

直径超 3.5 mm 后,气吸作用力过强:一方面易致单孔吸附多粒种子(引发重播),另一方面使种子难从吸孔脱附(增加漏播),且过大型孔会破坏吸种负压稳定性(气流不均),进一步降低排种精度,导致合格指数下降、漏播指数上升。综上,最佳型孔直径为 3.0 ~ 3.5 mm。

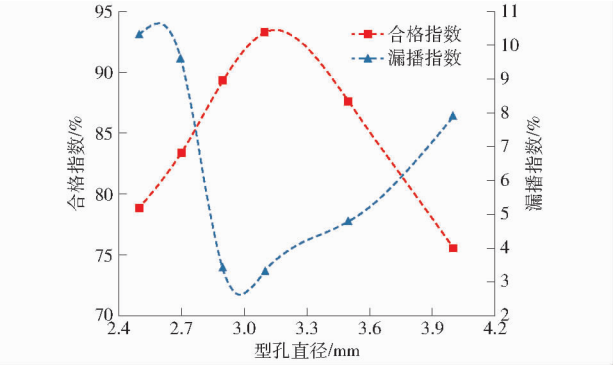


图 15 型孔直径与排种性能关系曲线

Fig. 15 Relationship between orifice diameter and miss-seeding index

4.4.3 吸种负压单因素试验

为保障吸种稳定性与充种时间需求,排种盘转速设为 25 r/min,选取型孔直径 3.1 mm、吸种负压 2.0 ~ 5.0 kPa 开展单因素试验,对比不同负压(2.0 ~ 5.5 kPa)下仿真与实际试验的合格指数及漏播指数,如图 16 所示。由图 16 可知,随吸种负压增大,合格指数呈先升后降趋势,漏播指数呈先降后升趋势,负压较低时,气吸吸附力不足,排种盘转动中种子易受振动、离心力干扰从吸孔脱落,漏播频发,故漏播指数高、合格指数低,负压逐渐增大后,吸附力增强,种子可牢固吸附于吸孔,排种脱落风险降低,漏播显著减少,合格指数逐步上升,负压超 4.5 kPa 后,过强吸附力引发问题:种子与吸孔贴合过紧,排种时难剥离导致滞留漏播;负压易使吸孔周边产生额外吸附力,造成单孔多粒吸附(重播),挤占排种空间间接增加漏播概率;同时过高负压会提升气吸系统能耗、降低气流稳定性,进一步干扰排种精度,最终导致合格指数下降、漏播指数上升。最佳吸种负压为 3.0 ~ 4.5 kPa。

4.4.4 排种盘转速单因素试验

基于上述单因素试验,设定吸种负压 4.5 kPa、型孔直径 3.1 mm,选取排种盘转速 10 ~ 55 r/min 开展单因素试验,对比不同转速下仿真与实际试验的合格指数及漏播指数,由图 17 可知,随排种盘转速增大,合格指数呈先升后降趋势,漏播指数呈先降后升趋势:转速较低时,排种盘转动缓慢,易导致吸孔周边种子堆积、挤压或卡滞,阻碍新种子进入,易发生漏播;转速适度提升后,吸孔在填充区的通过时间

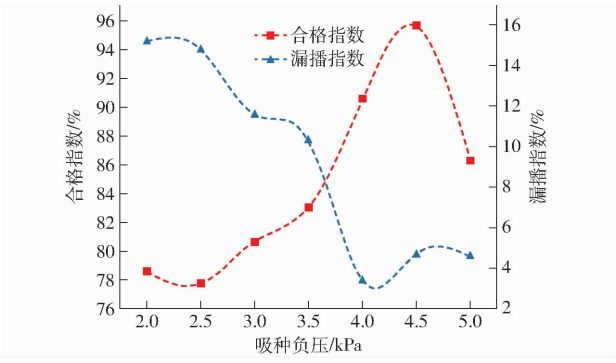


图 16 吸种负压与排种性能的关系曲线

Fig. 16 Relationship between miss-seeding index and seed-suction negative pressure

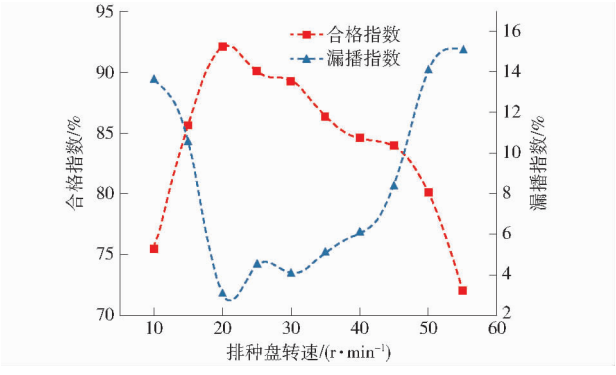


图 17 排种盘转速与排种性能的关系曲线

Fig. 17 Relationship between miss-seeding index and rotational speed of seed metering plate

适配,既规避低转速下的种子堆积问题,又保障种子充足入孔时间;减少“空吸”现象;当转速升至 50 r/min 及以上时,高速转动充种时间短,漏播指数上升。综上,适宜排种盘转速为 20 ~ 40 r/min。

4.5 正交试验

4.5.1 试验方案

根据前文分析,确定型孔直径为 2.83 ~ 3.67 mm,设置排种器吸种负压为 3.16 ~ 4.84 kPa、排种盘转速为 13.18 ~ 46.82 r/min,试验编码表如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	型孔直径/mm	吸种负压/kPa	排种盘转速/(r·min⁻¹)
-1.682	2.83	3.16	13.18
-1	3.00	3.50	20.00
0	3.25	4.00	30.00
1	3.50	4.50	40.00
1.682	3.67	4.84	46.82

4.5.2 试验结果与方差分析

根据 Design-Expert 8.0.6 软件中的响应曲面法

进行试验方案设计，试验方案与结果如表 3 所示。表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test scheme and result

序号	因素			合格指数	重播指数	漏播指数
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	-1	-1	-1	74.2	13.5	12.3
2	1	-1	-1	78.3	10.8	10.9
3	-1	1	-1	80.1	13.2	6.7
4	1	1	-1	85.2	12.0	2.8
5	-1	-1	1	79.5	11.8	8.7
6	1	-1	1	83.2	10.5	6.3
7	-1	1	1	81.2	13.0	5.8
8	1	1	1	88.1	9.5	2.4
9	-1.682	0	0	75.3	12.9	11.8
10	1.682	0	0	77.4	12.7	9.9
11	0	-1.682	0	76.6	8.6	14.8
12	0	1.682	0	87.2	10.8	2.0
13	0	0	-1.682	78.1	13.4	8.5
14	0	0	1.682	86.6	12.2	1.2
15	0	0	0	92.3	3.5	4.2
16	0	0	0	90.7	3.8	5.5
17	0	0	0	91.9	3.2	4.9

方差分析结果如表 4 所示，合格指数（Y_1）、重播指数（Y_2）和漏播指数（Y_3）回归模型 P 小于 0.01，且失拟项大于 0.05，表明三者的回归模型均极显著，且不存在显著失拟问题，模型拟合度较高，能够有效解释响应变量的变异规律。回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 91.52 + 1.71X_1 + 2.73X_2 + 2.09X_3 + 0.53X_1X_2 + \\ \quad 0.18X_1X_3 - 0.78X_2X_3 - 5.02X_1^2 - 3.06X_2^2 - 2.90X_3^2 \\ Y_2 = 3.53 - 0.66X_1 + 0.35X_2 - 0.49X_3 - 0.087X_1X_2 - \\ \quad 0.11X_1X_3 - 0.087X_2X_3 + 3.18X_1^2 + 2.09X_2^2 + 3.18X_3^2 \\ Y_3 = 4.95 - 1.05X_1 - 3.08X_2 - 1.59X_3 - 0.44X_1X_2 - \\ \quad 0.063X_1X_3 + 0.86X_2X_3 + 1.84X_1^2 + 0.97X_2^2 - 0.28X_3^2 \end{cases} \tag{19}$$

4.5.3　参数优化及台架试验验证

利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解，根据实际工作条件及上述相关模型分析结果，确定试验因素约束条件为：型孔直径为 2.83 ~ 3.67 mm，设置排种器吸种负压为 3.16 ~ 4.84 kPa、排种盘转速 13.18 ~ 46.82 r/min。试验指标：合格指数最大值、重播指数和漏播指数最小值。利用 Design-Expert 8.0.6 软件得到模型参数最优组合为型孔直径 3.3 mm、吸种负压 4.18 kPa、排种盘转速 32.75 r/min，此时，合格指数为 92.58%，重播指数为 4.01%，漏播指数为 3.41%。使用同样试验方法对型孔单双交错和双粒吸种排种性能寻优，单双交错吸种：当型孔为单-双-单布局时，模型参数最优组合为：型孔直径为 3.2 mm、吸种负压为 4.26 kPa、排种盘转速为 30.5 r/min，此时，合格指数为 94.32%，重播指数为 4.31%，漏播指数为 1.37%；双粒吸种：型孔直径为 3.35 mm、吸种负压为 4.37 kPa、排种盘转速为 28.6 r/min，此时合格指数为 92.17%，重播指数为 5.31%，漏播指数为 2.52%。综合 3 种型孔排布方式下，最佳型孔直径均在 3.3 mm 附近，最佳负气压均在 4.3 kPa 附近，而对于最佳排种盘最佳转速差异较大，原因是在双粒吸种时，相较于单粒吸种，所需充种时间较长，才

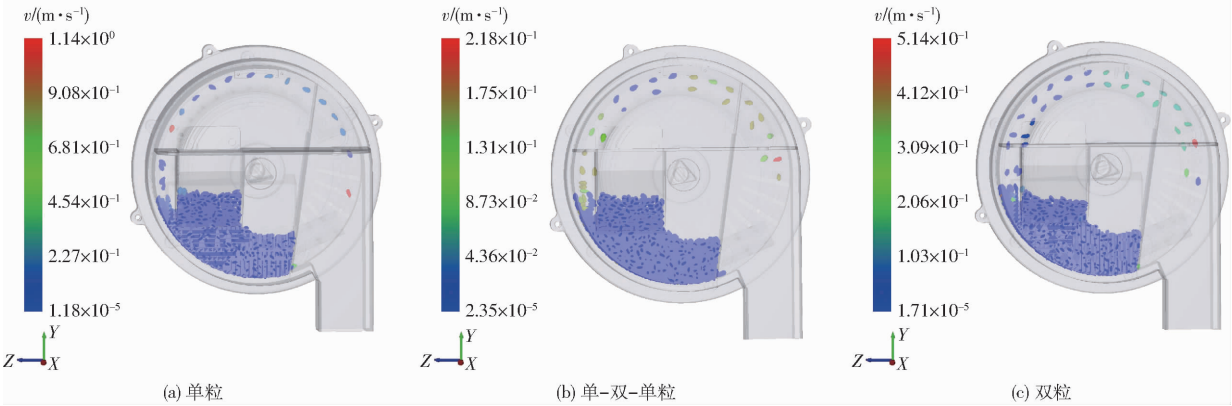
表 4　方差分析结果

Tab. 4　Variance analysis

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	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	537.62	9	15.85	0.000 7 **	192.59	9	20.83	0.000 3 **	238.11	9	11.17	0.002 2 **
X_1	39.86	1	10.58	0.014 *	5.98	1	5.82	0.046 6 *	14.96	1	6.32	0.040 2 *
X_2	101.48	1	26.93	0.001 3 **	1.69	1	1.64	0.240 8	129.33	1	54.62	0.000 2 **
X_3	59.46	1	15.78	0.005 4 **	3.3	1	3.22	0.115 9	34.73	1	14.67	0.006 5 **
X_1X_2	2.21	1	0.59	0.469 3	0.061	1	0.06	0.814 1	1.53	1	0.65	0.447 8
X_1X_3	0.25	1	0.065	0.806 1	0.1	1	0.099	0.762 7	0.031	1	0.013	0.911 8
X_2X_3	4.81	1	1.28	0.296	0.061	1	0.06	0.814 1	5.95	1	2.51	0.156 9
X_1^2	284.31	1	75.45	<0.000 1 **	114.1	1	111.08	<0.000 1 **	38.19	1	16.13	0.005 1 **
X_2^2	105.54	1	28.01	0.001 1 **	49.02	1	47.73	0.000 2 **	10.7	1	4.52	0.071 1 *
X_3^2	94.85	1	25.17	0.001 5 **	114.1	1	111.08	<0.000 1 **	0.89	1	0.38	0.559 6
残差	26.38	7		7.19	7		16.58	7				
失拟	24.99	5	7.21	0.126 3	7.01	5	1.40	0.061 4	15.73	5	7.43	0.122 8
误差	1.39	2			0.18	2			0.85	2		
总和	564.00	16			199.78	16			254.68	16		

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

能保证充种稳定,综合考虑故选定最优转速为 30 r/min。吸种效果如图 18 所示。



(a) 单粒 (b) 单-双-单粒 (c) 双粒

图 18 仿真效果

Fig. 18 Simulation effect diagrams

为验证优化结果可靠性,在华中农业大学工程训练中心精播种实验室进行。如图 19 所示,在 JPZS-16 型排种器进行台架试验。试验材料为排种器、C8012 型直流无刷风机(最大风压11 kPa)、直流无刷电机、试智能数字微压风速风压计、导种管、直流电源、棉花随速控制箱、棉花种子、导种管、测速编码器和移动终端。

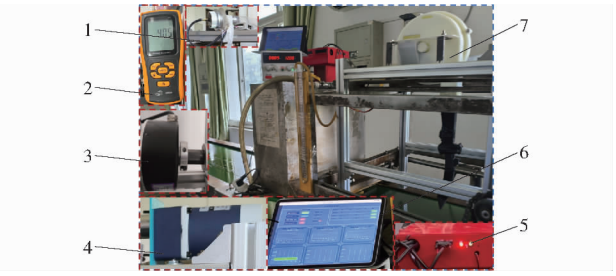


图 19 台架试验

Fig. 19 Performance test

1. C8012 型直流风机 2. 压力风速风量仪 3. 测速编码器
4. 直流电机 5. 控制移动端 6. 控制箱 7. 排种器

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》进行试验,每组重复 3 次。为了综合考虑实际应用及加工安装方便,选取型孔直径 3.3 mm、吸种负压为 4.3 kPa 和排种盘转速为 30 r/min。选取优化结果进行台架试验,每组试验重复 3 次。在双粒及单双粒排种时,内外圈对应吸种落种距离小于 1.5 cm 视为合格,在计算时视为一穴合格数。吸种排种效果如图 20 所示。单粒吸种、单-双-单吸种和双粒吸种的合格指数、重播指数和漏播指数分别为 94.1%、5.34% 和 0.56%,93.8%、4.65% 和 1.55%,92.4%、6.01% 和 1.59%。

5 田间试验

5.1 试验条件

为进一步验证排种器播种实际田间工作性能,



(a) 单粒 (b) 单-双-单粒 (c) 双粒

图 20 台架排种效果

Fig. 20 Seeding effect

于 2025 年 5 月 20 日在华中农业大学荆州棉花试验示范基地开展不同穴粒数播种田间试验。如图 21 所示,试验前茬作物为小麦,土壤类型为粘壤土,0~0.3 m 范围内平均土壤含水率为 20.2%。前麦茬地土壤紧实度随深度递增明显,2.5 cm 平均为 103.25 kPa,15 cm 达 1 510 kPa,麦茬密度达 480 根/m^2,高度 16.5~23 cm(平均值 19.6 cm,变异系数为 10.7%),呈高密度直立或半倒伏状态,环刀取土测得麦茬根系平均埋深为 8.5 cm,根系干质量为 0.5 g/根,土壤与根系结合较为紧实。



图 21 试验前茬作业环境

Fig. 21 Operating environment

5.2 试验方法

田间实际作业过程中,为了考虑棉花直播机旋耕灭茬效果以及和优化结果保持一致,拖拉机作业速度控制为 6 km/h,随速控制系统[36]可以在线设置粒距 11 cm,此时对应的排种盘转速为 30 r/min,考虑田间机具振动以及粉尘对风压的影响,负压控制为 4.5 kPa。田间试验现场如图 22 所示。

5.3 试验结果分析

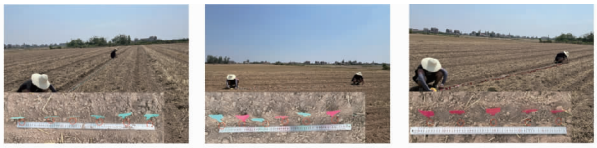
机具作业前后 5 m 作为机具启停区,每组试验



图 22　田间试验

Fig. 22　Field experiment

采集 251 粒种子情况，每组重复 3 次，取 3 次试验平均值作为结果，田间排种性能测试效果如图 23 所示。3 种不同型孔布局方式下，合格指数大于 89.3%，漏播指数小于 4.42%，重播指数小于 6.28%。相较室内台架试验结果，合格指数下降 3.1 个百分点，重播指数上升 0.27 个百分点，漏播指数上升 2.83 个百分点，其原因为：相较于室内单一工况条件，田间工作环境复杂，随机性和不确定性因素更多，导致合格指数下降，重播指数，漏播指数上升。



(a) 单粒　(b) 单-双-单粒　(c) 双粒

图 23　田间排种效果

Fig. 23　Effect of field seeding

5.4　出苗效果

出苗效果如图 24 所示，出苗率及缺苗断垄率如表 5 所示。单粒播种平均出苗率 78.98%，标准差 6.53%，各小区出苗率波动大，小区之间出苗率差异 22.71%。单双粒种植平均出苗率 80.3%，标准差 5.09%，小区之间出苗率差异 17.64%。双粒种植出苗率 84.66%，标准差 3.83%，小区之间出苗差异 12.31%。单粒播种平均缺苗断垄率 19.24%，标准差 5.07%。单-双-单粒种植平均缺苗断垄率 18.92%，标准差 2.93%。双粒种植缺苗断垄率 12.08%，标准差 3.83%，小区之间缺苗断垄率差异 4.98%。相对于单粒播种模式，单双粒、双粒播种模式能提高保苗率，能够有效提高种子破土能力保证出苗，保证了棉花群体建成。



图 24　出苗效果

Fig. 24　Seedling emergence effect

表 5　出苗测试结果

Tab. 5　Test results of seedling emergence　%

组别	出苗率			缺苗断垄率		
	单粒	单-双-单粒	双粒	单粒	单-双-单粒	双粒
1	70.0	72.0	78.0	27.6	23.1	19.6
2	75.0	79.5	85.0	20.1	19.6	14.2
3	84.0	81.3	86.3	17.5	16.7	10.9
4	80.0	84.0	87.6	16.3	19.6	8.6
5	85.9	84.7	86.4	14.7	15.6	7.1
平均值	78.98	80.30	84.66	19.24	18.92	12.08

6　结论

(1)设计了一种具有穴粒数可调装置气吸式棉花精量排种器，通过对排种盘和型孔的棉种进行受力和运动分析确定了气吸式棉花排种器关键结构参数。

(2)单因素试验结果表明，影响排种指标的较优范围：型孔直径 3.0～3.5 mm，吸种负压为 3.0～4.5 kPa，排种盘转速为 20～40 r/min，通过多因素正交组合试验结果及方差分析，构建了多目标寻优求解，得出 3 种模式排种指标最优组合。台架试验结果表明，当型孔直径为 3.3 mm、吸种负压为 4.3 kPa 和排种盘转速为 30 r/min 时，单粒吸种、单-双-单粒吸种和双粒吸种的合格指数、重播指数和漏播指数分别为：94.1%、5.34 和 0.56，93.8%、4.65% 和 1.55%，92.4%、6.01% 和 1.59%。

(3)田间试验结果表明，排种性能合格指数大于 89.3%、漏播指数小于 4.42%、重播指数小于 6.28%，出苗效果表明：单粒种植模式平均出苗率为 78.98%，单双粒种植模式平均出苗率为 80.3%，双粒种植模式出苗率 84.66%。表明采用多粒式播种方式能够有效提高长江流域麦后直播棉出苗率。

参　考　文　献

[1]　魏松，张驰海，詹振宇，等. 基于 DEM－MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：275－289，341.
WEI Song，ZHANG Chihai，ZHAN Zhenyu，et al. Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM－MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：275－289，341.(in Chinese)

[2] ZHAO Zhang, SHOAID A, MUHAMMAD S C, et al. Managing plant density and nitrogen fertilizer to reduce nitrogen input without yield reduction of late-sown cotton after wheat by improving light interception and sink nitrogen partitioning in a double cropping system[J]. Field Crops Research, 2023, 295(5): 108875.

[3] ZHOU Jingyuan, NIE Junjun, KONG Xiangqiang, et al. Cotton yield stability achieved through manipulation of vegetative branching and photoassimilate partitioning under reduced seedling density and double seedlings per hole[J]. Field Crops Research, 2023, 303: 109117.

[4] 苑严伟,白圣贺,牛康,等. 棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(6):1-11.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1-11. (in Chinese)

[5] 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 perfomance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35-38. (in Chinese)

[6] 张学军,陈勇,史增录,等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(19):27-36.
ZHANG Xuejun, CHEN Yong, SHI Zenglu, et al. Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 27-36. (in Chinese)

[7] 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)

[8] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56(10): 128-135.

[9] 王东伟,纪瑞琪,何晓宁,等. 驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报,2023,54(5):59-70,149.
WANG Dongwei, JI Ruiqi, HE Xiaoning, et al. Drive-guided combination slot-assisted seed-attached air-absorbing peanut high-speed precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 59-70, 149. (in Chinese)

[10] 黄玉祥,刘卓韬,杨鑫,等. 链勺翘尾自清式半夏精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):279-290.
HUANG Yuxiang, LIU Zhuotao, YANG Xin, et al. Design and test of chain spoon cocked tail self-cleaning *Pinellia ternata* precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 279-290. (in Chinese)

[11] LI Hongsheng, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and optimization of a high-speed maize seed guiding device based on DEM-CFD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227(2): 109604.

[12] LI Chuan, ZHANG Dongxing, LI Yang, 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(11): 109434.

[13] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报,2021,52(7):40-50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 40-50. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):61-73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61-73. (in Chinese)

[16] 郑娟,赖虹宇,李甜,等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):165-176,335.
ZHENG Juan, LAI Hongyu, LI Tian, et al. Design and test of precision seed metering device for wheat wide seedling belt with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 165-176, 335. (in Chinese)

[17] WANG Weiwei, SONG Lanzhou, AN Xue, et al. Optimizing seed filling performance of the double-filling air suction maize and soybean seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110586.

[18] ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, GAO Shengbo, et al. Design and experiment of an intelligent testing bench for air-suction seed metering devices for small vegetable seeds[J]. Biosystems Engineering, 2024, 245: 84-95.

[19] 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)

[20] 廖宜涛,刘嘉诚,廖庆喜,等.正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):63 – 76.
LIAO Yitao, LIU Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63 – 76. (in Chinese)

[21] 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)

[22] ANTONIO Bustos-Gaytán, NOÉ Saldaña-Robles, DIEGO R, et al. Advancements in pneumatic seed-metering devices: a review of numerical and experimental approaches[J]. Results in Engineering, 2026, 26: 105626.

[23] 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)

[24] XING He, CAO Xiaoman, ZHONG Peng, et al. DEM – CFD coupling simulation and optimisation of rice seed particles seeding a hill in double cavity pneumatic seed metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224(9): 109075.

[25] SADDAM H, CHEN Yong, YU Xing, et al. Design optimization and aerodynamic investigations of air suction seed metering systems through CFD – DEM approach[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101082.

[26] 丁力,杨丽,张东兴,等. 基于 DEM – CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(5):50 – 60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50 – 60. (in Chinese)

[27] 王韦韦,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)

[28] 胡斌,蔡一全,罗昕,等.基于种群胁迫的有限齿侧空间高速充种理论与试验[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(2):574 – 588.
HU Bin, CAI Yiquan, LUO Xin, et al. Theory and experiment of high-speed seed filling in limited gear-shaped side space based on seeds group stress[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(2): 574 – 588. (in Chinese)

[29] LI Kezhi, CAI Wenqing, ZHAO Binqiang, et al. Simulation and experimental study on the seed filling performance of a split cotton seeder[J]. Biosystems Engineering, 2025, 253: 104128.

[30] DU Xin, LIU Cailing. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 1 – 17.

[31] 衣淑娟,张清朋,戴智博,等.玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(2):261 – 274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zhibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding gevice for maize detal-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 261 – 274. (in Chinese)

[32] 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)

[33] LI Chuan, CUI Tao, ZHANG Dongxing, 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.

[34] XU Jian, SUN Shunli, HE Zhaokai, et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 277 – 300.

[35] 陈永,高晓勋,金鑫,等.双孔并行气吸式油莎豆精量穴播器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):213 – 223.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Design and experiment of two-hole parallel air-absorbing precision seed metering device for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 213 – 223. (in Chinese)

[36] 丁幼春,张驰海,董万静,等.基于雷达测速的棉花精量直播机排种测控系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):59 – 70.
DING Youchun, ZHANG Chihai, DONG Wanjing, et al. Design and test of seeding measurement and control system for cotton precision directing machine based on radar speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 59 – 70. (in Chinese)