doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.005

气压式高速玉米精量排种器充-投种机理分析与结构优化

李治民　安绍毅　杨　丽　张东兴　和贤桃　崔　涛
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：随着农业规模化种植的快速推进，高速、高效、高精度播种已成为玉米产量和经济效益协同提升的关键技术措施。现有排种器播种精度随着作业速度升高急剧下降，难以满足高速作业需求。针对气压式玉米精量排种器在作业速度超过 12 km/h 时，存在充种不充分与投种位置不一致等问题，本文提出扰种槽结构以增强种群流动性、降低充种阻力，提升充种性能；设计集卡种清除与主动推种功能于一体的推种机构，实现对卡滞种子的有效清除及投种位置的精准控制。通过理论分析明确影响充-投种性能的关键因素，并以吸孔直径、吸孔数量与进风量为变量，开展二次正交旋转回归试验，建立排种性能回归模型并优化参数组合。结果表明，在作业速度 15 km/h 条件下，吸孔直径为 6.21 mm、吸孔数量为 25、进风量为 265.98 m^3/h，排种器排种性能最优，合格指数达 98.14%，重播指数为 1.46%，漏播指数为 0.40%。通过对比试验得出，在 14 km/h 作业条件下，使用带扰动槽的排种盘时，排种合格指数提升 1.99 个百分点，漏播指数降低 2.12 个百分点，株距变异系数降低 1.48 个百分点；使用推种结构时，株距变异系数降低 3.2 个百分点。田间试验结果表明，在作业速度 14.37 km/h 条件下，排种合格指数为 98.04%、重播指数为 0.33%、漏播指数为 1.63%、株距变异系数为 15.62%，较自研气吸式排种器合格指数提升 7.6 个百分点、重播指数降低 2.9 个百分点、漏播指数降低 4.7 个百分点、株距变异系数降低 4.42 个百分点，验证了所研制的气压式玉米精量排种器具备良好的高速作业性能。研究结果可为气压式高速玉米精量排种器优化设计提供参考。

关键词：玉米；精量排种器；气压式；高速；推种机构
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0062-11　　**OSID**：

Analysis and Structural Optimization of Filling and Releasing Mechanism for Pneumatic High-speed Precision Maize Seed-metering Device

LI Zhimin　AN Shaoyi　YANG Li　ZHANG Dongxing　HE Xiantao　CUI Tao
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: With the accelerating trend of large-scale agricultural cultivation, high-speed, high-efficiency, and high-precision seeding has become a critical technological approach to simultaneously enhancing maize yield and economic returns. However, the seeding accuracy of existing seed metering devices declined significantly with the increase of working speed, failing to meet the demands of high-speed applications. To address the issues of insufficient seed filling and inconsistent seed placement in pneumatic precision maize seed metering device working at speeds above 12 km/h, a disturbance groove structure was proposed to improve seed flowability, reduce filling resistance, and enhance filling performance. Additionally, a seed-pushing mechanism integrating broken-seed removal and active seed pushing functions was designed to eliminate broken seeds and ensure consistent seed release position. Through theoretical analysis, the critical factors influencing seed filling and release performance were identified. A Box-Behnken response surface methodology experiment was conducted with hole diameter, number of hole, and airflow rate as variables, resulting in the establishment of a regression model for performance evaluation and optimization of parameter combinations. Results indicated that at working speed of 15 km/h, optimal performance was achieved with hole diameter of 6.21 mm, 25 holes, and airflow rate of 265.98 m^3/h, yielding qualified index of 98.14%, multiple-seeding index of 1.46%, and

收稿日期：2025-07-14　修回日期：2025-07-25
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD20000404)和国家现代玉米产业技术体系项目(CARS-02)
作者简介：李治民(2001—)，男，博士生，主要从事现代农业装备与计算机测控研究，E-mail：l1548956686@163.com
通信作者：杨丽(1975—)，女，教授，博士生导师，主要从事精量播种技术及其智能装备研究，E-mail：yl_hb68@126.com

missing-seeding index of 0.40%. The results of the comparative experiment showed that under the working condition of 14 km/h, when using a seed plate with disturbance groove structure, the qualified index was increased by 1.99 percentage points, the missing seeding index was decreased by 2.12 percentage points, and the plant spacing coefficient of variation was decreased by 1.48 percentage points. When using the seed-pushing mechanism, the plant spacing coefficient of variation was decreased by 3.2 percentage points. Field experiment showed that under the working speed of 14.37 km/h, the seed metering device achieved a qualified index of 98.04%, a multiple seeding index of 0.33%, a missing seeding index of 1.63%, and a plant spacing coefficient of variation of 15.62%. Compared with the previously high-speed precision seed metering device with air suction, the qualified index was improved by 7.6 percentage points, the multiple-seeding index was decreased by 2.9 percentage points, the missing seeding index was decreased by 4.7 percentage points, and the plant spacing coefficient of variation was decreased by 4.42 percentage points, confirming its superior performance under high-speed conditions. The research result can provide valuable insights for the structural optimization of pneumatic high-speed precision maize seed-metering device.

Key words: maize; precision seed-metering device; pneumatic; high-speed; seed-pushing mechanism

0　引言

玉米作为重要的粮食、饲料及工业原料作物，是保障国家粮食安全的关键支撑[1-4]。在玉米生产过程中，播种是决定作物最终产量的关键环节。随着农业规模化进程的加快，播种作业对效率与质量提出更高要求，播种装备正朝着高速化与高精度化方向发展[5-6]。作业速度的提升对排种精度与稳定性提出了更为严苛的要求。排种器作为播种机的核心部件，对播种质量具有决定性影响[7-8]。因此，提升排种器在高速条件下的作业性能，是实现玉米高效精量播种、促进粮食单产提升的重要技术路径[9-15]。

气力式排种器凭借排种精度高、适应性强、不伤种等优势，成为当前研究与应用的重点方向[16-22]。其中，气吸式排种器结构成熟、作业稳定性好，广泛应用于中低速的播种作业中，具有良好的排种一致性[23-27]。然而，在高速作业条件下（≥12 km/h），若未配套专用输种装置，种子在种管中易发生撞击与反弹，导致粒距均匀性下降，制约其高速作业性能；相较之下，气压式排种器利用高速气流扰动种群，有效减小充种阶段的种群堆积阻力，并借助气流导向实现种子的快速精准投放[4,20]，由于种子从释放到着地的时间极短（作业速度 12 km/h 时，气压式约为 0.15 s，气吸式约为 0.35 s），可降低因惯性作用和管壁碰撞引起的粒距偏差[28-29]。然而，中国农业大学张东兴教授团队[30-31]在前期研究中发现，气压式排种器在作业速度超过 12 km/h 时，仍面临充种不充分、投种位置不一致等问题，严重制约排种精度与作业稳定性。

为解决上述问题，本文对气压式排种器充种与投种机理开展理论分析，提出扰种槽结构以增强种群流动性、降低充种阻力，并设计集推种与卡种清除功能于一体的推种结构，以提升投种位置的一致性，通过开展优化试验确定关键结构参数的最佳组合，以提升排种器高速作业条件下的排种性能。

1　排种器结构与工作原理

1.1　排种器结构

如图 1 所示，气压式玉米精量排种器主要由前壳体、刮种器、挡气片、推种板、排种盘、阻气块、后壳体、推种机构后盖、轴承、防尘罩、卡扣、轴套、弹簧、推种凸台、卸种挡板、轴及弹片等部件组成。

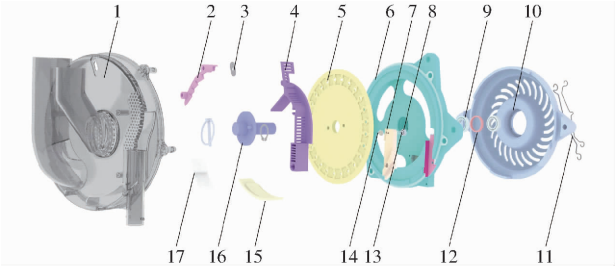


图 1　排种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of seed metering device

1. 前壳体　2. 刮种器　3. 挡气片　4. 推种板　5. 排种盘　6. 后壳体　7. 阻气块　8. 推种机构后盖　9. 轴承　10. 防尘罩　11. 卡扣　12. 轴套　13. 弹簧　14. 推种凸台　15. 卸种挡板　16. 轴　17. 弹片

1.2　排种器工作原理

排种器工作原理如图 2 所示，种子自种箱经单粒精准分离并定向排入种沟预定位置的全过程可划分为充种、清种、携种、投种与压种 5 个阶段。

在充种阶段，排种器充种区域内的种子在排种盘搅动及入口气流扰动下呈沸腾状态，吸孔邻近的种子在气流曳力作用下逐渐向吸孔靠近，具备充种优势地位的种子在吸孔两侧压差作用下被稳定吸附在吸孔上。

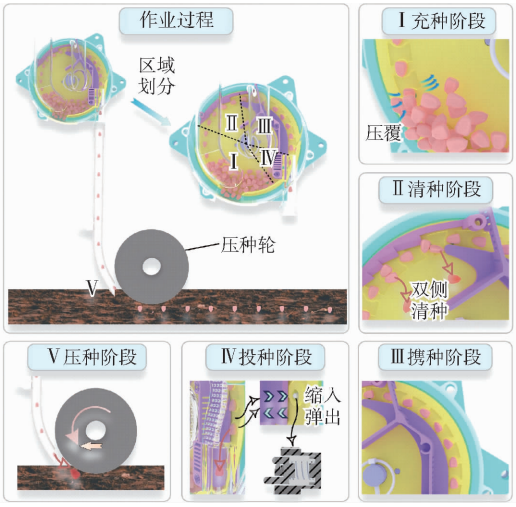


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Working principle of seed metering device

在清种阶段,刮种器通过机械接触作用,迫使位于吸孔上方的附加种子沿远离吸孔方向产生位移,削弱其受吸孔气流作用形成的吸附力,促使其脱离吸孔表面。同时,推种板前端部分亦对吸孔下侧种子起到了清种作用,下部种子与推种板接触,其径向运动被阻断,进而脱离吸孔。

在携种阶段,完成单粒清选的种子随排种盘匀速旋转,平稳进入投种区。

在投种阶段,当吸孔转至投种位置时,吸孔背侧的推种机构主动弹出,直接作用于种子,将其从吸孔中推离,经由种管导入种沟。推种机构同时具备清除碎种功能,可有效避免碎种卡滞于吸孔,防止发生周期性漏播。

在压种阶段,气流引导种子快速通过种管,精准落入种沟目标位置。为降低种子在种沟中的弹跳、保障株距一致性,压种轮对种子实施快速镇压。

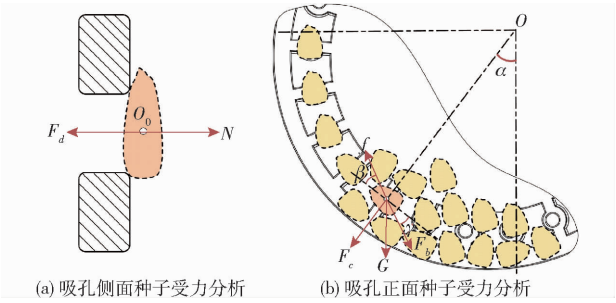
2 充种机理分析与种盘参数设计

2.1 充种机理分析

充种性能是影响排种质量的关键因素之一。深入分析气压式排种器充种机理,有助于识别和量化影响充种质量的关键因素。

播种机风机产生的气流,通过进风管进入排种器内部腔室,并经由吸孔和种管排出。在吸孔两侧形成的压差驱动下,气流产生高速流动,种子在气流所产生的曳力作用下被引导至吸孔,并吸附于其表面,从而完成充种,种子在填充过程中的受力如图 3 所示。

根据对吸附种子受力情况的分析可知,为实现其稳定吸附,需要满足



(a) 吸孔侧面种子受力分析 (b) 吸孔正面种子受力分析

图 3 充种阶段种子受力分析

Fig. 3 Force analysis of seed filling stage

$$\begin{cases} F_c + G\cos\alpha + F_b\sin\gamma = \mu F_d\sin\beta \\ G\sin\alpha + F_b\cos\gamma = \mu F_d\cos\beta \\ F_c = m\omega^2 r_0 \\ F_d = \Delta p\pi\dfrac{d^2}{4} \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_c——离心力,N

G——重力,N

F_b——种群阻力,N

F_d——吸附力,N

μ——动摩擦因数

m——种子质量,kg

r_0——吸孔所在半径,m

ω——种盘角速度,rad/s

Δp——吸孔内外压差,Pa

d——吸孔直径,m

α——重力与半径方向夹角,(°)

β——摩擦力与切线方向夹角,(°)

γ——种群阻碍力与切线方向夹角,(°)

整理式(1),考虑压种可靠性系数 K_1 和工作稳定可靠性系数 K_2,得出充种阶段吸孔压差为

$$\Delta p = \frac{m\omega^2 r_0 + \sqrt{2}F_b\sin\left(\gamma+\dfrac{\pi}{4}\right) + \sqrt{2}mg\sin\left(\alpha+\dfrac{\pi}{4}\right)}{K\sin\left(\beta+\dfrac{\pi}{4}\right)d^2} \tag{2}$$

其中

$$K = \frac{\pi\mu}{2\sqrt{2}K_1K_2} \tag{3}$$

式中 K——作业系数

吸孔两侧所产生的压差是驱动种子吸附的根本动力。根据充种阶段压差(式(2)),可得吸孔压差与种群阻碍力、种子自重及其在转动过程中的离心力之间呈正相关关系。稳定吸种所需的吸孔压差随着上述因素的增大而同步增加。为了提升排种器的充种性能,应从降低充种阻力和离心力、提高吸孔两侧压差等方面着手进行优化。

为探究吸孔压差的影响因素,将排种器简化为一个具备单一进风口、多个吸孔出口及一个种管出

口的流动容腔。考虑到实际加工制造中的结构误差，导致排种器存在微小泄漏。为增强模型的适应性，在简化模型中引入气流泄漏口，简化模型如图 4 所示。基于该流动模型，进行吸孔两侧压差的理论分析，从而为优化气压式排种器的充种性能提供理论支撑。

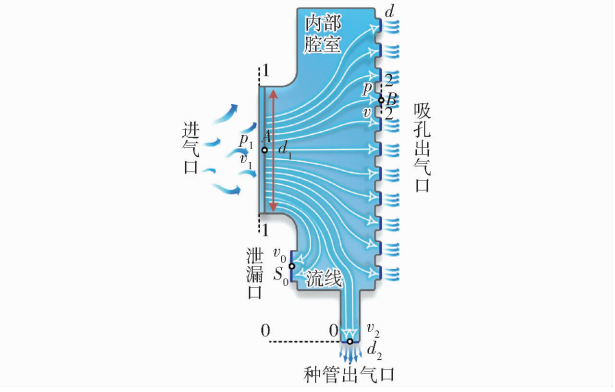


图 4　排种器内部腔室气压简化模型

Fig. 4　Simplified pressure model of seed metering device chamber

假设作业过程中腔室内部的气体不可压缩，气流进出口的流量相等，则根据流体连续性方程可得

$$\frac{\pi d_1^2}{4}v_1 = N_1\frac{\pi d^2}{4}v + \frac{\pi d_2^2}{4}v_2 + S_0 v_0 \tag{4}$$

式中　v_1——进气口气流速度，m/s

v——吸孔出气口气流速度，m/s

v_2——种管出气口气流速度，m/s

v_0——泄漏口气流速度，m/s

d_1——进气口直径，m

d_2——种管直径，m

S_0——泄漏口面积，m^2

N_1——吸孔数量

选取进气口平面 1－1 与吸孔出气口平面 2－2 为过流断面，鉴于沿程损失相较于局部损失可忽略不计，故可在两断面之间建立总流的伯努利方程

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v^2}{2g} + \zeta\frac{v^2}{2g} \tag{5}$$

式中　z_1——进气口 A 距基准面 0－0 高度，m

z——出气口 B 距基准面 0－0 高度，m

ρ——空气密度

p_1——进气口 A 静压，Pa

p——出气口 B 静压，Pa

α_1——过流断面 1－1 动能修正系数

α_2——过流断面 2－2 动能修正系数

ζ——局部水头损失系数

相较于流体的动能和压能，势能的影响可以忽略不计。根据气流的流动状态及入口与出口孔径比，确定动能修正系数为 1，局部水头损失系数为 0.5，代入系数对式(5)进行化简，得到进气口 A 静压满足

$$p_1 = \frac{3\rho v^2 - 2\rho v_1^2}{4} \tag{6}$$

综合考虑充种阶段吸孔压差公式和进气口 A 静压公式可知，在风机流量恒定条件下，通过扰动种群，增强其流动性，可以有效降低充种阻力，减少所需风压；减小吸孔所在半径有助于降低种子运动过程中的离心力，进一步降低风压需求；增大进风管直径可以降低进口流速，减小气流动压和局部水头损失，从而提高吸孔两侧的压差；减小种管半径有利于提升吸孔处流量，进一步增大压差。

适当增大吸孔数量可降低排种盘转速，但因总出口面积增大，单孔流量下降，吸孔两侧压差也随之降低，因此不能仅依赖增加吸孔数量实现性能优化。吸孔直径的增大有助于降低所需风压，但可能引发重播与卡种等问题。因此，吸孔直径与数量的最优组合通过后续参数优化试验加以确定。

2.2　排种盘设计

2.2.1　排种盘直径

为探究排种盘直径对充种性能的影响，建立充种时间 t 的运动学表达式

$$t = \frac{60\theta}{2\pi n} \tag{7}$$

式中　θ——充种区弧度，rad

n——排种盘转速，r/min

根据式(7)可知，增大充种区弧度或降低排种盘转速均可延长充种时间，提升充种性能。排种盘直径虽不影响上述 2 个变量，对充种时间无直接作用，但其变化会影响吸孔所在半径的取值，进而影响相邻两吸孔间的弧长 l，有

$$l = \frac{2\pi}{N_1}r_0 \geqslant l_{\max} \tag{8}$$

式中　$l_{\max}$——玉米种子最大长度，mm

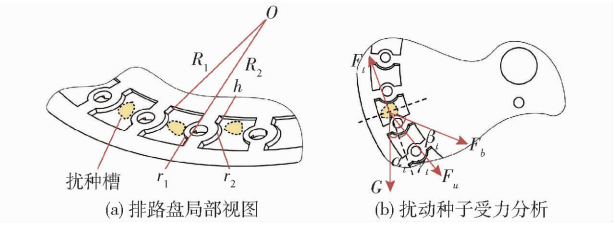
r_0——吸孔所在直径

若排种盘直径过小，相邻两吸孔间弧长将小于单粒玉米种子的最大尺寸，易导致吸孔间种子干涉，降低充种性能；而排种盘直径过大则会导致排种器整体尺寸增大，影响结构紧凑性与设备适配性。测量 1 000 颗郑单 958 玉米种子三轴尺寸，得出 $l_{\max}$ 为 12.29 mm。综合考虑种子尺寸与结构尺寸，选取排种盘直径为 200 mm，吸孔所在直径为 165 mm。

2.2.2　扰种槽尺寸

为了打破种群的堆积状态，提升种群整体流动性，降低充种阻力，在排种盘圆周方向布置若干扰种槽，扰种槽内径 R_1，外径 R_2，深度为 h，中心两侧添

加半径为 r_1 和 r_2 的凸台，其尺寸如图 5a 所示。



(a) 排路盘局部视图 (b) 扰动种子受力分析

图 5 扰动槽尺寸及扰动受力分析示意图

Fig. 5 Schematics of disturbance groove size and disturbance force analysis

如图 5b 所示，对受到扰动的单粒种子进行受力分析，种子沿扰动槽支持力方向的受力满足

$$F_t - G\cos\alpha_t - F_u\cos\gamma_t - F_b\cos\beta_t = ma_t \tag{9}$$

式中 α_t——重力与扰动槽支持力夹角，(°)

γ_t——曳力与扰动槽支持力夹角，(°)

β_t——种群阻力与扰动槽支持力夹角，(°)

a_t——种子沿扰动槽支持力方向加速度，m^2/s

F_t——扰动槽对种子支持力，N

F_u——气流对种子曳力，N

根据对扰动种子的受力分析可知，扰动槽施加于种子的支撑力可有效促使种子脱离局部堆积状态，提升其运动速度，从而增强种群整体的流动性，减小种群阻力，提升充种性能。

为确保扰种槽能够充分扰动种群，避免其仅在种群表面滑动而无法提供扰动支持力，须确保种群中部分种子的体积位于扰动槽空间内，同时为避免种子卡死在扰种槽内部，造成排种失效，扰种槽的尺寸参数应满足条件

$$\begin{cases} R_2 - R_1 > \dfrac{l_{\max}}{2} \\ \dfrac{2\pi}{N_1} r_0 - r_1 - r_2 > \dfrac{l_{\max}}{2} \end{cases} \tag{10}$$

根据式(10)的尺寸要求，选取扰种槽内径 R_1 为 73.5 mm，扰种槽外径 R_2 为 91.5 mm，左侧凸台半径 r_1 为 5 mm，右侧凸台半径 r_2 为 6.5 mm，扰种槽深度 h 为 1 mm。

3 投种机理分析与推种机构参数设计

3.1 投种机理分析

阻气投种方式具有不伤种、适应性强等优势，被广泛应用于气力式排种器中。然而，采用阻气方式时，受限于加工与装配误差，往往难以在投种口位置实现气流的完全阻断，导致投种位置存在偏差，引发株距不一致问题。此外，在排种器工作过程中会存在碎种被吸附并卡滞于吸孔内的情况，阻气投种方式无法有效清除卡滞碎种，被封堵的吸孔在随后的充种阶段将无法正常吸附种子，进而产生周期性漏播，影响排种质量。因此，阻气投种方式通常需配合卡滞清除装置共同使用，导致结构复杂性增加。阻气方式弊端如图 6 所示。针对上述问题，本文提出了一种主动机械推种机构，通过机械方式主动将种子推离吸孔。该设计不仅有助于简化排种器整体结构，还具有主动清除卡滞碎种，提升株距一致性等优势。

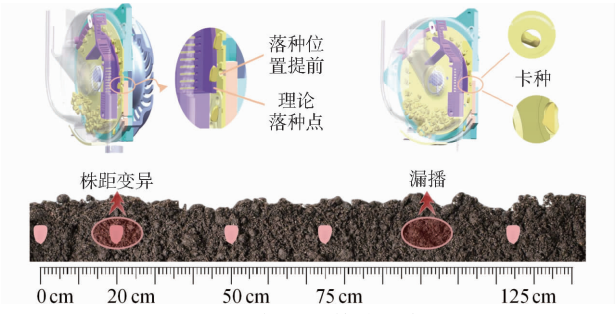
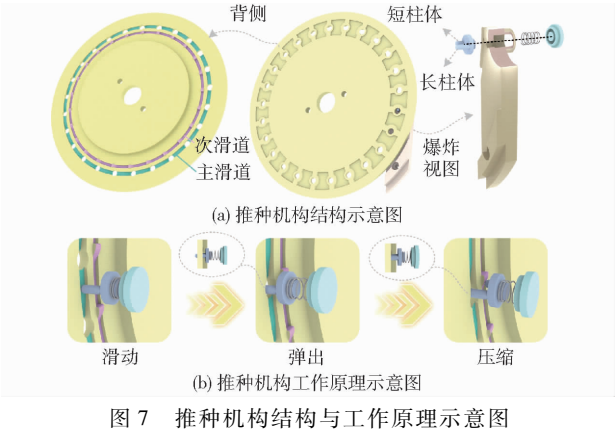


图 6 阻气方式弊端示意图

Fig. 6 Schematic of drawbacks of air-cutoff method

3.2 推种机构设计

推种机构的结构如图 7 所示，整体由主滑道、次滑道、推种凸台、弹簧、阻气块及推种机构后盖等部分组成。其中，弹簧安装于阻气块内部空腔内，两端分别连接推种凸台与推种机构后盖。推种凸台上设置有长、短 2 个柱体，长柱体与主滑道接触，短柱体与次滑道接触。



(a) 推种机构结构示意图

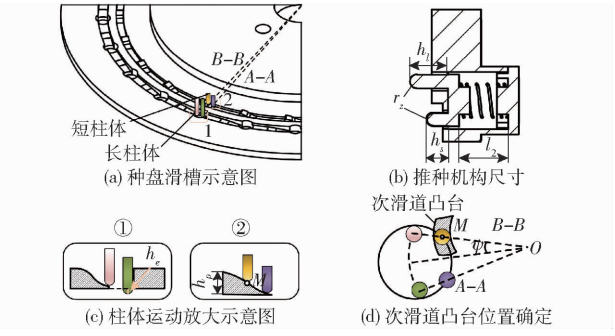
(b) 推种机构工作原理示意图

图 7 推种机构结构与工作原理示意图

Fig. 7 Schematics of structure and working principle of seed-pushing mechanism

推种机构工作过程可分为滑动、弹出与压缩 3 个阶段。在滑动阶段，长柱体沿主滑道滑动，短柱体未接触次滑道，处于悬空状态。随着排种盘的旋转，推种机构运行至吸孔位置，进入弹出阶段，长柱体脱离主滑道，在弹簧弹力作用下迅速弹出，推动吸附于吸孔处的种子，使其脱离吸孔。为确保推种凸台能够有效作用于种子，需保证长柱体完全穿过吸孔。在排种盘进一步旋转过程中，穿出的长柱体会阻碍排种盘正常转动。因此，在压缩阶段，短柱体与次滑道接触，迫使弹簧压缩，使推种凸台回缩，避免长柱

体干涉排种盘运动，保障机构平稳运行。若缺乏此回缩过程，长柱体将导致排种盘运动受阻，进而可能引发电机卡滞或机构损坏的风险。推种结构及其尺寸示意如图 8 所示。



(a) 种盘滑槽示意图　(b) 推种机构尺寸　(c) 柱体运动放大示意图　(d) 次滑道凸台位置确定

图 8　推种机构尺寸确定

Fig. 8　Determination of dimensions of seed-pushing mechanism

为确保推种机构能将种子推离吸孔，忽略推种凸台撞击种子的能量损失和撞击方向系统的动能，弹簧压缩到释放过程的弹性势能变化全部用于种子克服吸附力做功，假定种子在脱离过程中吸附力不变，根据能量守恒定律得

$$\frac{1}{2}\frac{G_k d_k^4}{8 d_m^3 n_k}\Delta^2 x - \Delta p \frac{\pi d^2}{4}\Delta y = 0 \tag{11}$$

式中　G_k——弹簧材料切变模量，Pa

d_k——弹簧线径，m

d_m——弹簧中径，m

n_k——弹簧有效圈数

Δx——弹簧弹出过程的长度变化量，m

Δy——吸附力做功距离，m

为确保种子能被推离吸孔，选取 Δy 大于 1 mm，Δp 为 3 kPa 的极端条件，根据式(11)确定弹簧材料为 65Mn 弹簧钢，弹簧线径 d_k 为 0.4 mm，弹簧中径 d_m 为 8 mm，弹簧长度为 15 mm，弹簧弹出过程的长度变化量 Δx 为 2 mm。

为确保长柱体能够穿出吸孔完成推种，其伸出长度 h_e 设计为 1 mm，长、短柱体半径 r_z 应小于吸孔半径，取 r_z 为 1 mm。同时，为避免长柱体在种盘旋转过程中对其运动产生阻碍，需确保当吸孔转离推种机构位置时，推种凸台已完成回缩，推种机构尺寸需要满足

$$\begin{cases} \dfrac{h_p}{2} \geqslant h_e \\ h_l \geqslant w + h_e \\ l_x \geqslant l_2 \geqslant \Delta x \\ h_s = h_l - \Delta x \\ \psi \leqslant \arccos\left(1 - \dfrac{d^2}{8r_0^2}\right) - \arccos\left(1 - \dfrac{r_z^2}{2r_0^2}\right) \end{cases} \tag{12}$$

式中　h_p——次滑道凸台高度，m

h_l——长柱体高度，m

h_s——短柱体高度，m

w——吸孔厚度，m　　l_x——弹簧长度，m

l_2——弹簧安装空腔长度，m

ψ——次滑道凸台与吸孔中心角度，(°)

根据式(12)要求，确定次滑道凸台高度 h_p 为 2 mm，长柱体高度 h_l 为 7 mm，短柱体高度 h_s 为 4 mm，弹簧安装空腔长度 l_2 为 8 mm，次滑道凸台与吸孔中心角度 ψ 为 1°。

4　台架试验

4.1　试验条件

为优化吸孔直径、吸孔数量及进风量的组合参数，实现最佳作业性能，依据 Box－Behnken Design (BBD)试验设计原理，于 2025 年 3 月 17 日在中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室开展了台架试验。试验装置(图 9)包括气压式玉米精量排种器、RB－61D 型全风高压风机、艾科力 MTP60V24E1 型直流无刷电机、中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪[32]以及风速风量风压测试仪等设备。试验用种选用未经分级处理的郑单 958 杂交玉米种子，作业速度设定为15 km/h。试验过程中，气压和风量通过测试仪器持续监控，以保证排种器性能的稳定。



图 9　试验装置

Fig. 9　Test bench

4.2　试验方案

通过前期单因素预试验确定各试验因素取值范围：吸孔直径为 5～7 mm、吸孔数量为 20～40、进风量为 240～270 m^3/h，试验因素编码如表 1 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Test factors and codes

编码	因素		
	吸孔直径/mm	吸孔数量	进风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
－1	5	20	240
0	6	30	255
1	7	40	270

根据 GB/T 6973—2005 的规定,以合格指数 Y_1(%)、重播指数 Y_2(%)、漏播指数 Y_3(%)作为评价指标,每组试验测定排种器稳定连续排出的 251 粒种子,每组试验重复 2 组取平均值。

$$Y_1 = \frac{n_1}{N_0} \times 100\% \tag{13}$$

$$Y_2 = \frac{n_2}{N_0} \times 100\% \tag{14}$$

$$Y_3 = \frac{n_3}{N_0} \times 100\% \tag{15}$$

式中 N_0——理论播种数量

n_1——单粒播种数量

n_2——2 粒及以上播种数量

n_3——漏播种子数量

4.3 试验结果与分析

试验方案与结果如表 2 所示,d、N、Q 为因素编码值。采用 Design-Expert 软件进行方差分析,探究各因素对评价指标影响显著性,方差分析结果如表 3 所示。

表 2 试验方案及试验结果

Tab. 2 Test scheme and result

编号	因素			评价指标		
	d	N	Q	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	-1	-1	0	93.63	1.00	5.37
2	1	-1	0	96.81	2.39	0.80
3	-1	1	0	95.62	1.80	2.58
4	1	1	0	94.42	5.38	0.20
5	-1	0	-1	95.02	0.80	4.18
6	1	0	-1	96.21	3.39	0.40
7	-1	0	1	96.61	1.79	1.60
8	1	0	1	96.21	3.59	0.20
9	0	-1	-1	94.63	1.39	3.98
10	0	1	-1	97.21	2.39	0.40
11	0	-1	1	97.21	1.99	0.80
12	0	1	1	95.42	4.38	0.20
13	0	0	0	98.01	1.39	0.60
14	0	0	0	98.60	1.00	0.40
15	0	0	0	98.20	1.00	0.80
16	0	0	0	98.21	0.80	0.99
17	0	0	0	98.01	1.39	0.60

表 3 方差分析结果

Tab. 3 Analysis of variance

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	35.66	9	41.11	<0.000 1 **	28.14	9	36.89	<0.000 1 **	40.85	9	43.39	<0.000 1 **
d	0.972 2	1	10.09	0.015 6 *	10.96	1	129.29	<0.000 1 **	18.46	1	176.47	<0.000 1 **
N	0.019 8	1	0.206	0.663 7	6.43	1	75.85	<0.000 1 **	7.16	1	68.48	<0.000 1 **
Q	0.714 3	1	7.41	0.029 7 *	1.79	1	21.13	0.002 5 **	4.77	1	45.58	0.000 3 **
dN	4.80	1	49.82	0.000 2 **	1.20	1	14.16	0.007 **	1.20	1	11.48	0.011 6 *
dQ	0.634 9	1	6.59	0.037 2 *	0.158 7	1	1.87	0.213 4	1.43	1	13.66	0.007 7 **
NQ	4.80	1	49.82	0.000 2 **	0.486 1	1	5.74	0.047 8 *	2.23	1	21.34	0.002 4 **
d^2	10.69	1	110.96	<0.000 1 **	1.99	1	23.47	0.001 9 **	3.46	1	33.07	0.000 7 **
N^2	9.40	1	97.52	<0.000 1 **	2.95	1	34.78	0.000 6 **	1.82	1	17.40	0.004 2 **
Q^2	1.50	1	15.60	0.005 5 **	1.45	1	17.16	0.004 3 **	0.000 4	1	0.004	0.951 4
残差	0.674 6	7			0.593 2	7			0.732 1	7		
失拟	0.436 5	3	2.44	0.204 0	0.307 5	3	1.44	0.357 1	0.525 8	3	3.40	0.134 1
误差	0.238 1	4			0.285 7	4			0.206 3	4		
总和	36.33	16			28.73	16			41.58	16		

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

根据方差分析结果可知,合格指数、重播指数和漏播指数的回归模型 P 值均小于 0.01,且失拟项 P 值均大于 0.05,表明所建立的回归模型具有良好拟合效果,具备较高可信度。

在合格指数的回归模型中,dN、NQ、d^2、N^2、Q^2对响应变量的影响极显著,d、Q、dQ 影响显著,其余项不显著;在重播指数的回归模型中,d、N、Q、dN、d^2、N^2、Q^2对响应变量的影响极显著,NQ 影响显著,其余项不显著;对于漏播指数的回归模型,d、N、Q、dQ、NQ、d^2、N^2对响应变量的影响极显著,dN 影响显著,其余项不显著。

剔除回归方程中不显著的交互与二次项,得到各评价指标与试验因素的回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 98.21 + 0.35d + 0.05N + 0.30Q - \\ \quad 1.10dN - 0.40dQ - 1.10NQ - \\ \quad 1.59d^2 - 1.49N^2 - 0.60Q^2 \\ Y_2 = 1.12 + 1.17d + 0.90N + 0.47Q + \\ \quad 0.55dN + 0.35NQ + 0.69d^2 + \\ \quad 0.84N^2 + 0.59Q^2 \\ Y_3 = 0.68 - 1.52d - 0.95N - 0.77Q + \\ \quad 0.55dN + 0.60dQ + 0.75NQ + \\ \quad 0.91d^2 + 0.66N^2 \end{cases} \tag{16}$$

通过绘制不同因素之间交互作用的响应曲面,进一步分析各试验因素对评价指标的影响机理。响

应曲面图如图 10 所示。由图 10 可知，随着吸孔直径的增大，合格指数呈现先升高后降低的趋势，漏播指数逐渐降低，而重播指数则表现为先降低后升高。当吸孔直径较小时，种子吸附面积较小，吸附力不足，在充种阶段，部分种子因无法克服种群阻力而未能进入吸孔，导致漏充，从而引发漏播。同时，在携种区域，吸附力不足也会导致部分种子在尚未到达投种点前提前脱落，与其它种子同时落下，形成“一重一漏”，进一步加剧了重播与漏播的发生。随着吸孔直径的增大，吸附面积增大，吸附力增强，漏充概率降低，种子在携种区吸附稳定，漏播指数相应下降，合格指数上升。然而，当吸孔直径过大时，易发生一孔多充，导致清种负担加重，重播加剧，最终使合格指数下降。由合格指数响应曲面可知，当吸孔直径为 5.5 ~ 6.5 mm，吸孔数量为 25 ~ 30，进风量为 250 ~ 270 m^3/h，排种合格指数较优。

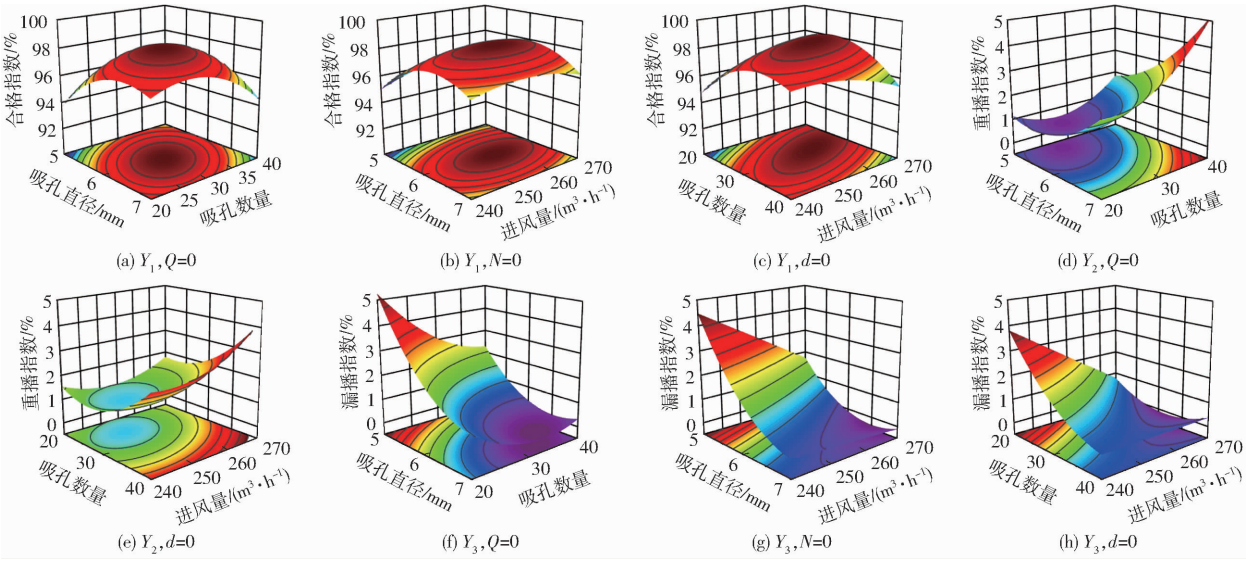


图 10　交互项对排种质量影响的响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of influence of interaction terms on seeding quality

随着吸孔数量的增加，合格指数呈现先升高后降低的变化趋势，漏播指数持续降低，重播指数则先降低后升高。当吸孔数量较少时，为维持排种量，排种盘需以较高转速运行，导致充种时间缩短、漏充概率升高，从而合格指数降低、漏播指数增大。随着吸孔数量增多，排种盘转速减小，充种时间延长，漏充现象减少。然而，吸孔数量过多导致相邻吸孔间距减小，易出现种子被夹持在 2 个吸附种子之间、无法被清种装置清除的情况，进而引发重播，降低合格指数。由重播指数响应曲面可知，当吸孔直径为 5 ~ 6 mm、吸孔数量为 20 ~ 30、进风量为 245 ~ 255 m^3/h，排种重播指数较优。

在进风量变化方面，合格指数随其增加呈现先升高后降低的趋势，漏播指数逐渐降低。当进风量不足时，吸孔两侧风压较低，吸附力不足，导致漏充现象明显，排种合格指数偏低，漏播指数较高。随着进风量增大，吸附效果改善，漏播减少，合格指数上升。然而，当进风量过大时，吸孔易发生一孔多充，重播现象加剧，合格指数反而下降。由漏播指数响应曲面可知，当吸孔直径为 6.5 ~ 7 mm、吸孔数量为 30 ~ 40、进风量为 260 ~ 270 m^3/h，排种重播指数较优。

4.4　参数优化与验证试验

为了使排种器作业性能达到最佳，寻找最佳的参数组合，构建多目标优化函数

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant d \leqslant 1 \\ -1 \leqslant N \leqslant 1 \\ -1 \leqslant Q \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

经优化求解，获得的最优参数组合为：吸孔直径 6.21 mm、吸孔数量 25、进气量 265.98 m^3/h。在该条件下排种器预测性能为：合格指数 98.17%、重播指数 1.59%、漏播指数 0.24%。

为检验优化结果的有效性，开展验证试验，并重复 3 组取均值。验证结果显示，排种合格指数为 98.14%，重播指数为 1.46%，漏播指数为 0.40%，实际测量值与模型预测值高度一致，优化结果可信。

为验证排种器在高速条件下的排种质量，测试其在作业速度 14 ~ 17 km/h 范围内的播种质量，测试结果如表 4 所示。

根据试验结果可知，作业速度 14 ~ 17 km/h 范围内，排种合格指数不低于 97%，重播指数不超过

表 4 高速作业工况下排种作业性能

Tab. 4 Seeding quality under high-speed condition

%

作业速度/(km·h^{-1})	合格指数	重播指数	漏播指数
14	99.07	0.53	0.40
15	98.14	1.46	0.40
16	97.33	1.00	1.67
17	97.08	0.93	1.99

1.5%,漏播指数不超过 2%,表明该排种器在高速作业工况下具备优异的排种性能。

为验证扰种槽结构与推种机构对排种性能提升的有效性,对比 14 km/h 作业条件下,有无两者的排种性能差异,试验结果如表 5 所示。

表 5 对比试验结果

Tab. 5 Comparative experiment result %

排种器结构	合格指数	重播指数	漏播指数	株距变异系数
无扰种槽	97.08	0.40	2.52	11.53
无推种机构	98.80	0.80	0.40	13.25
完整排种器	99.07	0.53	0.40	10.05

根据对比试验结果可知,14 km/h 作业条件下,缺少扰种槽的排种器,其合格指数降低 1.99 个百分点,漏播指数提升 2.12 个百分点,株距变异系数增加 1.48 个百分点;而缺少推种机构的排种器,其粒距合格指数无明显下降,但株距变异系数增大 3.2 个百分点。装置优化前后效果对比如图 11 所示。



(a) 装置优化前

(b) 装置优化后

图 11 装置优化前后播种效果对比

Fig. 11 Comparison of sowing effects before and after device optimization

5 田间试验

为验证气压式玉米精量排种器在高速作业条件下的播种性能,田间试验于 2025 年 5 月 16 日在东北农业大学向阳基地开展,试验场景如图 12 所示。

试验机具为雷沃 2BMQF-8D 型玉米精量播种机,其中排种器部分替换为所研发的气压式高速玉米精量排种器。驱动系统采用团队自主研发的基于 GPS 测速的电驱式玉米精量控制系统[33],旨在避免地轮驱动因打滑而引发株距变异。播种机挂载于雷硕 1604D 型拖拉机上进行田间作业,其风机由拖拉机的动力输出轴驱动。



(a) 试验机具

(b) 株距测定

(c) 出苗情况

图 12 田间试验场景

Fig. 12 Field experiment scenes

为适应东北地区垄作双行农艺种植模式,将同垄双行行距设定为 60 cm,垄间行距为 80 cm。试验前对试验地进行浅层整地处理,所用种子为未经分级的郑单 958。目标株距为 25 cm,风压为 6 kPa,受限于风量分配不均,各播种单体风压存在 ±0.5 kPa 的波动。田间实际作业速度与设定作业速度误差在 ±0.5 km/h 范围内,作业区域内 GPS 所测作业速度均值为 14.37 km/h。随机选取连续的 51 颗种子进行株距测量,总计测量 6 组,统计结果如表 6 所示。

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Result of field experiment %

组号	合格指数	重播指数	漏播指数	株距变异系数
1	98.04	0	1.96	12.44
2	98.04	0	1.96	15.90
3	100	0	0	18.38
4	96.08	0	3.92	19.02
5	98.04	1.96	0	11.18
6	98.04	0	1.96	16.77

根据表 6 试验结果统计得:气压式玉米精量排种器平均合格指数为 98.04%,重播指数为 0.33%,漏播指数为 1.63%,株距变异系数为 15.62%。与团队自主研发的气吸式玉米精量排种器在相同设定速度下的田间试验结果相比[34],排种合格指数提升 7.6 个百分点,重播指数降低 2.9 个百分点,漏播指数降低 4.7 个百分点,株距变异系数降低 4.42 个百分点。上述结果表明,所研制的气压式玉米精量排种器在高速作业条件下具有更好的排种性能。

6 结论

(1)针对气压式玉米精量排种器在作业速度超过 12 km/h 时充种不充分的问题,开展了充种机理的理论建模与受力分析,明确吸孔压差、离心力及种群阻力为影响充种稳定性的关键因素。提出扰种槽结构以增强种群流动性、降低充种阻力,为提升排种器在高速工况下的充种性能提供了理论支撑与结构改进方案。

(2)针对阻气投种方式中存在的落种位置不一致问题,设计了一种集主动推种与卡种清除功能于一体的推种机构,可有效确保种子在高速作业过程中准确释放,显著提升投种位置一致性,并具备清除吸孔卡滞碎种的功能,增强了排种作业可靠性。

(3)基于 Box - Behnken 设计开展二次正交旋转回归试验,建立了排种性能与吸孔直径、吸孔数量、进风量之间的回归模型,并优化得到最佳参数组合为吸孔直径 6.21 mm、吸孔数量 25、进风量 265.98 m^3/h,对应作业性能指标为:合格指数 98.14%、重播指数 1.46%、漏播指数 0.40%。

(4)台架对比试验结果表明,在作业速度 14 km/h 条件下,使用扰动槽排种盘时,排种合格指数提升 1.99 个百分点,漏播指数降低 2.12 个百分点,株距变异系数降低 1.48 个百分点;使用推种结构时,株距变异系数降低 3.2 个百分点,验证了扰动槽与推种机构能够提升播种性能。

(5)田间试验结果表明,在作业速度 14.37 km/h 条件下,所研制排种器合格指数为 98.04%,重播指数为 0.33%,漏播指数为 1.63%,株距变异系数为 15.62%。与团队自研气吸式排种器相比,分别提升 7.6 个百分点、降低 2.9 个百分点、降低 4.7 个百分点和降低 4.42 个百分点,验证了该气压式玉米精量排种器具备良好的高速作业性能。

参 考 文 献

[1] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 108 - 119.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 108 - 119. (in Chinese)

[2] GAO X, XIE G, LI J, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161 - 181.

[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 precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 50 - 60. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 解春季, 杨丽, 张东兴, 等. 基于激光传感器的播种参数监测方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 140 - 146.
XIE Chunji, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Seeding parameter monitoring method based on laser sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 140 - 146. (in Chinese)

[6] WANG H, YANG L, ZHANG D, et al. Comparative investigation and evaluation of electric-drive seed-metering systems across diverse speed ranges for enhanced high-precision seeding applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 108976.

[7] 尚增强, 张开飞, 杨东福, 等. 基于 DEM - CFD 耦合的气吸式大豆排种器种盘参数优化[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 1 - 8.
SHANG Zengqiang, ZHANG Kaifei, YANG Dongfu, et al. Simulation optimization of seed plate of air suction soybean seed-metering device based on DEM - CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(11): 1 - 8. (in Chinese)

[8] 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)

[9] WANG W, SONG L, AN X, 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.

[10] HUANG Z, JIANG Y, QIN W, et al. Establishment and validation of a negative pressure prediction model for rice air-suction seed-metering device[J]. Biosystems Engineering, 2025, 253: 104126.

[11] TANG H, XU F, GUAN T, et al. Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107997.

[12] 施彬彬, 郑娟, 王磊, 等. 小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 30 - 41.
SHI Binbin, ZHENG Juan, WANG Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30 - 41. (in Chinese)

[13] 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.

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. (in Chinese)

[14] 李兆东, 杨文超, 武尧尧, 等. 油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 57 - 66.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57 - 66. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. (in Chinese)

[18] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 37 - 46.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37 - 46. (in Chinese)

[19] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)

[20] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 10 - 18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10 - 18. (in Chinese)

[21] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8 - 16.
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8 - 16. (in Chinese)

[22] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM - CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 23 - 31.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM - CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23 - 31. (in Chinese)

[23] 陈玉龙, 刘泽琪, 韩杰, 等. 气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 1 - 11.
CHEN Yulong, LIU Zeqi, HAN Jie, et al. Design and experiments of the flat seed-adsorbing posture adjustment mechanism for the air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 1 - 11. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 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.
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. (in Chinese)

[26] 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)

(下转第 128 页)

Agriculture, 2022, 13(1): 23.
[20] 何瑞银, 王建林, 徐高明, 等. 限制充种姿态-正负压式小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 39-49, 167.
HE Ruiyin, WANG Jianlin, XU Gaoming, et al. Design and experiment of wheat precise seed metering apparatus with positive and negative pressure with function of limiting seed filling posture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 39-49, 167. (in Chinese)
[21] 马连元, 刘俊峰, 王廷双, 等. 内侧充种垂直圆盘排种器精播分蘖作物的探讨[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 38-43.
MA Lianyuan, LIU Junfeng, WANG Tingshuang, et al. Discussion on precision sowing tiller crops with vertical disc seed metering device filled with seeds inside[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 38-43. (in Chinese)
[22] 刘俊峰, 王廷双, 冯晓静, 等. 内充种垂直轮式新型小麦精量排种器的研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 91-94.
LIU Junfeng, WANG Tingshuang, FENG Xiaojing, et al. Research on a new type of wheat precision metering device with vertical wheel filled with seeds[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 91-94. (in Chinese)
[23] 李晓冉, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 51-61.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 51-61. (in Chinese)
[24] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68-79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)

(上接第 72 页)

[27] 宋庆斌, 毕于彬, 赵鹏飞, 等. 玉米小区播种机阻断型气吸式排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 1-9.
SONG Qingbin, BI Yubin, ZHAO Pengfei, et al. Design and test of the blocking type air-suction seed metering device for maize plot seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese)
[28] 和贤桃. 处方图式变量播种控制系统研究与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
HE Xiantao. Research and experiment on map-based control system of variable rate seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[29] DU Z, YANG L, ZHANG D, et al. Design and experiment of a soil organic matter sensor-based variable-rate seeding control system for maize[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109752.
[30] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[31] 李玉环. 高速玉米精量排种器清种和投种机构优化设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2021.
LI Yuhuan. Optimal design and experimental study of cleaning and linear throwing mechanism of the high speed maize precision seed-metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[32] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese)
[33] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42-49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42-49. (in Chinese)
[34] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 26-35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese)