doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.018

基于 DEM－CFD 的气压式高速玉米播种机工作参数优化与试验

王家忠[1]　康伟业[1]　曹志兴[1]　弋景刚[1]　赵晓顺[1]　刘忠军[2]

（1.河北农业大学机电工程学院，保定 071001；2.中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083）

摘要：高密度种植、高精度作业与高速度生产已成为现代玉米生产的新范式，对播种装备提出了严苛要求。针对气压式玉米播种机在实际播种中，工作参数与工况匹配不当导致播种合格率下降，难以充分发挥设备性能的问题，本文采用 DEM－CFD 气固双向耦合方法，从微观尺度阐明种子在排种器中的运移规律和力学特性，确定了气压、进种量和清种间隙为影响播种质量的关键因素。以单粒率为评价指标，以黄淮海地区常见的黄金粮 MY73 和郑单 958 为例，通过 Box－Behnken 正交试验对排种器工作参数进行优化。确定了不同品种种子在不同工作速度下排种器工作参数的最优组合，其中，黄金粮 MY73 在 12 km/h 下，气压为 4.0 kPa、进种挡位与清种挡位为 7 挡时，单粒率达到最佳；郑单 958 在 12 km/h 下，气压为 4.5 kPa、进种挡位为 8 挡、清种挡位为 7 挡时，单粒率达到最佳。在最优参数组合下进行田间试验，黄金粮 MY73 与郑单 958 的田间播种合格率分别达到 95.4% 与 95.7%。试验结果表明，不同品种在不同的工作速度下最优工作参数存在显著差异，该研究为实际播种作业时工作参数选取提供参考，同时为实现智能播种的“一键设定”提供理论依据。

关键词：玉米播种机；气压式排种器；DEM－CFD；播种质量

中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)13-0222-12　　**OSID**：

Optimization and Experiment of Operating Parameters for Pneumatic High-speed Maize Seeder Based on DEM－CFD

Wang Jiazhong[1]　Kang Weiye[1]　Cao Zhixing[1]　Yi Jinggang[1]　Zhao Xiaoshun[1]　Liu Zhongjun[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: High-density planting, high-precision operation and high-speed production have become the new paradigm of modern corn production, putting forward strict requirements for sowing equipment. Pneumatic maize planters have attracted much attention because they can maintain a high seeding qualification rate even at high speeds. However, sowing operations confronted with three major challenges: unstructured environment, high agronomic constraints, and strong farming seasons, which led to complex and changeable working conditions. Improper matching of operational parameters to conditions reduced seeding quality and underutilized equipment performance. The DEM－CFD gas-solid two-phase coupling method was employed to elucidate seed motion dynamics and mechanical behavior within the seed metering device at the microscale. Air pressure, seed feed rate, and seed cleaning gap were identified as critical factors affecting seeding quality. Using single grain rate as the evaluation metric, the operating parameters were optimized for two representative corn varieties in the Huang－Huai－Hai region (Huangjinliang MY73 and Zhengdan 958) through Box－Behnken response surface methodology. The optimal parameter combinations were determined as follows: for MY73 at 12 km/h, maximum singulation rate was achieved at 4 kPa air pressure, with seed feed rate and cleaning gap set to Level 7; for Zhengdan 958 at 12 km/h, optimal performance occurred at 4.5 kPa air pressure, Level 8 feed rate, and Level 7 cleaning gap. Orthogonal test results demonstrated that air pressure, seed feed rate, and seed cleaning gap had a very significant effect on single grain rate, with obvious interactions between factors; the established regression model fit well and can accurately predict seed discharge performance. Results

收稿日期：2025－12－27　修回日期：2026－02－05

基金项目：河北省重大科技支撑计划项目(242N7201Z)和河北省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(HBCT2024020205)

作者简介：王家忠(1970—)，男，教授，博士，主要从事智能农业装备研究，E-mail：wjz9001@163.com

demonstrated significant variation in optimal parameters across varieties and operating speeds. The research result can provide a reference for parameter selection in practical operations, which can establish a theoretical foundation for automated parameter configuration in intelligent seeding systems.

Key words: maize seeder; pneumatic seed metering device; DEM－CFD; sowing quality

0　引言

玉米是我国主要的粮食作物，是保障粮食安全的关键[1-3]。2025 年中央一号文件明确将粮食安全列为“首要任务”，要求稳定播种面积，主攻单产提升。高性能播种机既是玉米大面积单产提升的关键装备，也是当前农业农村部主推的“四良”融合核心突破口。气力式播种机凭借对种子形状适应性强、对种子损害小以及排种精度高的优点得到了重点研究与应用[4-8]。与气吸式播种机相比，气压式播种机由于更适用于高速作业工况，在实际播种作业中得到关注[9-10]。

排种器作为播种机的核心部件，对播种质量有显著影响，近年来学者针对排种器的结构与参数优化已开展大量研究。郭鹏等[11]设计了一种气力辅助充种式花生精量排种器，试验确定排种盘最佳参数组合为：排种器吸种负压 5.156 kPa、播种机前进速度 8.007 km/h、扰动吹种正压 1.149 kPa，此时充种合格率为 95.84%。赵鹏飞等[12]针对小麦排种器在宽苗带播种时种子均匀性差的问题设计了一种气力倾斜式排种器，确定了排种器工作转速 30 r/min、吸种负压 4.5 kPa 时最优。罗海峰等[13]针对水稻播种中种群堆积不易被吸附等问题，设计了一种外凸扰种仿形型孔气吸式排种器，试验表明，当排种器转速为 25 r/min、工作负压为 1.24 kPa 时，排种器合格指数为 92.64%，重播指数为 2.57%，漏播指数为 4.79%。以上研究针对不同作物类型，确定了排种器最优参数组合，然而，实际播种作业时，玉米种子的形状、尺寸等几何参数对工作参数有较大影响。同时，由于抢农时需要，工作速度往往作为强约束条件。因此，需针对不同的品种及工作速度，确定相对应的最优工作参数，以保证播种质量。

随着计算机仿真技术的发展，DEM－CFD 耦合技术应用于气力集中系统内种子流的运动研究[14-19]。Li 等[20]设计了一种基于文丘里效应的导种管，通过 DEM－CFD 耦合仿真对结构参数进行优化，提高了种子加速效果，减少了种子之间的碰撞。Tang 等[21]通过 CFD－DEM 耦合模拟，优化下落管的入口直径、喉部高度等，减少了种子碰撞和弹跳现象。上述研究大多使用耦合仿真对排种部件结构进行优化，缺少对排种器内部工作机理的系统研究，且未结合工作参数分析其对播种质量的影响机制。

在排种器工作过程中，气流与颗粒之间存在复杂的运动学和动力学关系，采用 DEM－CFD 耦合仿真对气压式排种器的运动机理开展研究必不可少。本文从微观机理层面，揭示气流－颗粒相互作用机制，探究工作参数对播种质量的影响。通过优化试验，确定不同速度下最优参数组合。本研究既为机手播种作业时选择参数提供参考，建立“品种－速度－参数”精准匹配模型，解决通用参数适应性不足的问题。同时也为智能播种机“一键标定”提供理论依据。

1　排种器结构与工作原理

1.1　排种器结构

本研究采用的气压式排种器结构如图 1 所示。主要由进种量调节板、清种轮调整手柄、前壳体、调节底座、刮种轮、种盘、导种管、堵气轮等部件组成。

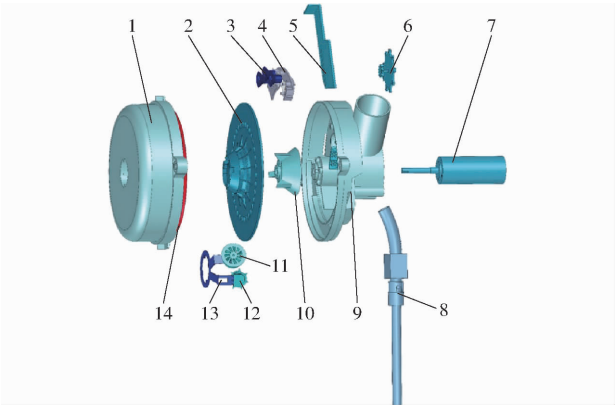


图 1　排种器结构图

Fig. 1　Schematic of seed metering device

1. 前壳体　2. 种盘　3. 刮种轮　4. 调节底座　5. 进种量调节板　6. 清种轮调整手柄　7. 电机　8. 导种管　9. 后壳体　10. 排种盘固定座　11. 堵气轮　12. 捕针轮　13. 轮支架　14. 密封圈

各部件核心功能如下：根据不同种子与播种密度调整进种量调节板控制进种流量；排种盘为核心取种载种部件；清种轮调整手柄调节清种轮挡位，调整刮种轮与种子型孔间隙；堵气轮用于切断正压气流，使种子失去压附力；导种管引导种子落入种沟，保证播种深度。这些部件协同配合，完成排种器从充种到排种的完整作业流程。

1.2　排种器工作原理

排种器分为充种、携种、清种、排种 4 个过程，其工作过程如图 2 所示。

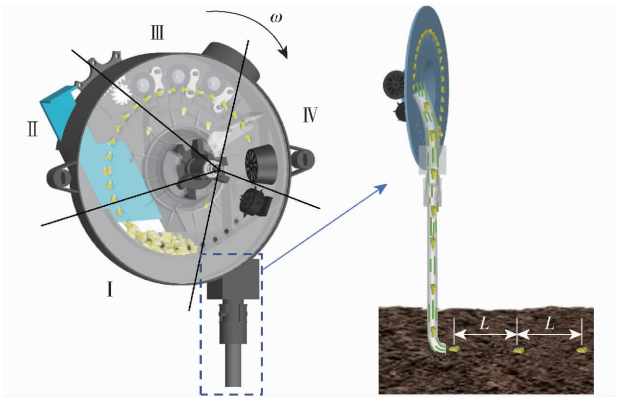


图 2 排种器工作过程

Fig. 2 Working process of seed metering device

Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 携种区 Ⅲ. 清种区 Ⅳ. 排种区

(1)充种过程

作业过程中,拖拉机动力输出轴(PTO)驱动风机产生稳定的正压气流,通过调节 PTO 转速可以调整风压大小,正压气流经后壳体进气口进入排种器内。玉米种子由种箱进入到充种区域Ⅰ,通过调节进种量调节板控制进入排种器的种子流量,进入到充种区域的玉米种子在正压气流作用下压附在型孔上,完成充种过程。

(2)携种过程

电机带动排种盘旋转,在充种区已压附于型孔上的种子在正压作用下随着排种盘一起转动,完成携种。

(3)清种过程

种子随着排种盘转动进入清种区Ⅲ后,通过转动刮种轮调整手柄带动调节底座转动,将刮种轮清种间隙调整到最佳位置,刮种轮通过与多余种子碰撞实现清种,被清除的种子落回到充种区,确保每个型孔压附单粒种子,完成清种。

(4)排种过程

清种完成后的单粒种子随着排种盘转动至排种区Ⅳ。堵气轮安装在种子释放位置,用于切断正压气流,使种子失去压附力后掉落至导种管。种子在导种管中在正压气流辅助下,排进土壤中。

综上可知,在排种器工作时,需要调整的部件有进种量调节板和清种轮调整手柄,因此,本研究选取影响排种器充种与清种性能的气压、进种量和清种间隙为工作参数,并针对不同种子,在不同工作速度下进行优化。

2 力学模型建立

排种器的充种与清种是影响播种质量的重要环节。在充种与清种过程,种子受到了多种作用力。为量化充种与清种过程的力学关系,明确种子稳定吸附及多余种子能被清除的力学条件,为排种器工作参数优化提供理论支撑,同时为后续 DEM - CFD 耦合仿真提供理论依据。

2.1 充种过程力学模型

在充种区,种子处于成堆状态,此时种子受力如图 3 所示,其受力平衡方程为

$$F_N - F_D\cos\beta_3 - J\cos\beta_3 - G - F_r\cos\beta_2 + F\cos\beta_1 = 0 \tag{1}$$

式中 F——扰动力,N

F_D——气流曳力,N

F_N——支持力,N

F_r——阻力,N

G——重力,N

J——离心力,N

β_1——扰动力与 y 轴夹角,(°)

β_2——阻力与 y 轴夹角,(°)

β_3——离心力与 y 轴夹角,(°)

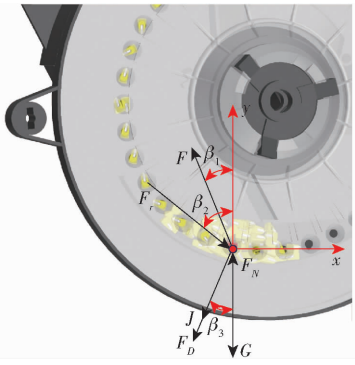


图 3 充种过程受力分析图

Fig. 3 Force analysis of seed filling process

当种子要脱离种群时,需满足条件

$$F_N + F\cos\beta_1 \geqslant F_D\cos\beta_3 + G + F_r\cos\beta_2 + J\cos\beta_3 \tag{2}$$

其中

$$J = m\omega^2 r \tag{3}$$

式中 m——种子质量,kg

r——型孔所在半径,m

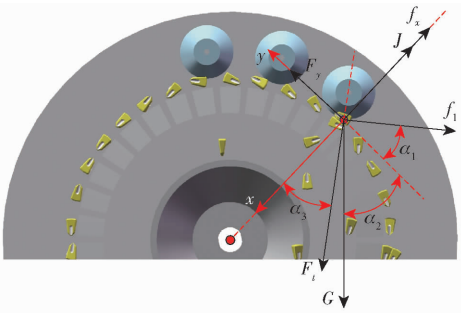
ω——排种盘角速度,rad/s

由式(2)可知,为了减小被压附的种子脱离种堆时掉落的概率,需减少其余种子带来的重力和阻力,并增大压附力,使种子可以更平稳地脱离种堆。因种子与气流的相互作用无法直接观测,因此,需在微观层面上使用 DEM - CFD 耦合仿真方法对充种过程进行运动机理研究。

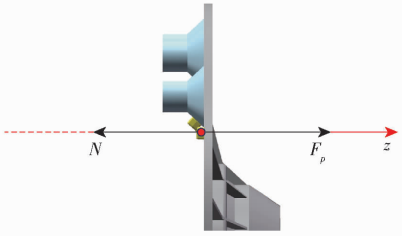
2.2 清种过程力学模型

当型孔上有多粒种子进入清种区时,被清除的种子受力如图 4a 所示。稳定吸附的玉米颗粒受力如图 4b 所示。

根据图 4 所示的被清除种子受力分析,建立直



(a) 被清除种子受力



(b) 稳定吸附种子受力

图 4　清种过程受力分析图

Fig. 4　Force analysis of seed cleaning process

角坐标系。在 X、Y、Z 方向分别进行力的平衡分析，即

$$\begin{cases} G\sin\alpha_2 + F_t\cos\alpha_3 - f_1\sin\alpha_1 - J - f_x = 0 \\ f_y - G\cos\alpha_2 - f_1\cos\alpha_1 - F_t\sin\alpha_3 = 0 \\ F_p - N = 0 \end{cases} \tag{4}$$

其中

$$f_1 = \mu_1 F_t \tag{5}$$

$$f = \mu F_p \tag{6}$$

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \tag{7}$$

$$F_p = P_\Delta S_i \tag{8}$$

$$S_i = \frac{1}{\mu P_\Delta}\sqrt{(G\sin\alpha_2 + F_t\cos\alpha_3 - \mu_1 F_t\sin\alpha_1 - m\omega^2 r)^2 + (G\cos\alpha_2 + \mu_1 F_t\cos\alpha_1 + F_t\sin\alpha_3)^2} \tag{9}$$

$$F_p = \frac{1}{\mu}\sqrt{(G\sin\alpha_2 + F_t\cos\alpha_3 - f_1\sin\alpha_1 - J)^2 + (G\cos\alpha_2 + f_1\cos\alpha_1 + F_t\sin\alpha_3)^2} \tag{10}$$

式中　f——被清种子与稳定吸附种子摩擦力合力，N

F_t——刮种轮推力，N

f_1——受到刮种轮的摩擦力，N

f_x——被清种子与稳定吸附种子 x 方向摩擦力，N

f_y——被清种子与稳定吸附种子 y 方向摩擦力，N

S_i——种子受力面积，m^2

P_Δ——排种盘两侧压力差，Pa

μ——排种盘与种子的摩擦因数

μ_1——刮种轮与种子的摩擦因数

F_p——稳定吸附种子吸附力，N

α_1——受到刮种轮的摩擦力与 y 轴夹角，(°)

α_2——重力与 y 轴夹角，(°)

α_3——刮种轮推力与 x 轴夹角，(°)

通过分析可得，清种机构通过调整清种间隙大小改变吸附力并且对种子施加冲击力，从而将不处于优势位置的种子清除。如果清种间隙过小或过大将会产生过清和漏清的现象，导致漏播和重播的发生。在清种过程中，无法直接观测到颗粒与清种轮、颗粒与颗粒之间的作用，需借助 DEM－CFD 仿真对清种过程的工作机理进行研究。

3　DEM－CFD 分析

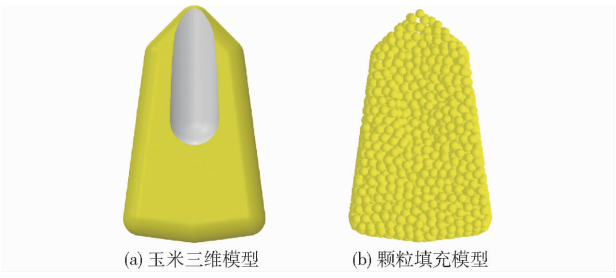
3.1　玉米颗粒建模

黄金粮 MY73 和郑单 958 等为黄淮海地区主推玉米品种，适合密植，且具有产量高、生长稳定性强的特点，玉米种子尺寸如表 1 所示。根据农艺要求，黄金粮 MY73 种植株距为 19 cm，郑单 958 种植株距为 22 cm，这会导致在相同工作速度下，种植黄金粮 MY73 时播种机排种盘转速会更快，进而可能会影响播种质量，并且由尺寸对比看出黄金粮 MY73 种子颗粒更小，更容易发生一个型孔压附多粒种子的情况。与郑单 958 相比，黄金粮 MY73 更具充种-清种研究代表性。因此，本文以黄金粮 MY73 为例进行分析。在 Solidworks 中建立玉米颗粒三维模型，如图 5a 所示，之后在 EDEM 中使用体积小于流场网格最小尺寸的颗粒对模型进行填充，填充完成后通过 Bonding 力将各颗粒粘结为整体，得到颗粒填充模型，如图 5b 所示。

表 1　玉米种子尺寸

Tab. 1　Dimensions of maize seeds　　mm

参数	黄金粮 MY73	郑单 958
长度	11.46	12.14
宽度	6.12	8.62
厚度	5.14	5.28



(a) 玉米三维模型　　(b) 颗粒填充模型

图 5　玉米种子模型

Fig. 5　Maize seed models

3.2　排种器模型建立

根据气压式排种器工作原理，将排种器建模分为颗粒场建模和气流场建模。颗粒场模型是在工作中与玉米颗粒相接触的模型，如图 6 所示。

为加快计算速度，本文将排种器模型简化为种

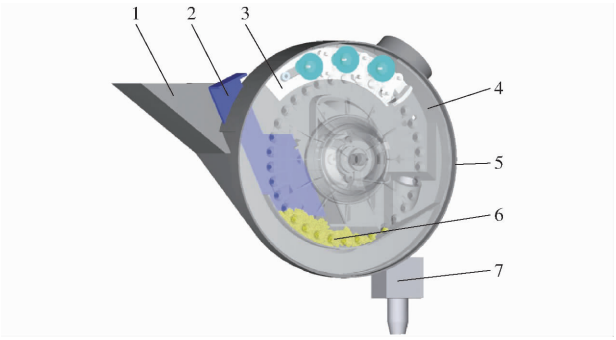


图 6 排种器颗粒场模型

Fig. 6 Particle field model of seed metering device

1. 种箱 2. 进种量调节板 3. 清种装置 4. 排种盘 5. 后壳体 6. 玉米颗粒 7. 导种管

箱、进种量调整板、前壳体、排种盘、清种装置和导种管 6 部分,在 Solidworks 建立模型,另存为 step 格式导入到 EDEM 中[22-23],简化模型如图 6 所示。在划分网格时需确保 EDEM 中网格单元尺寸为最小填充颗粒半径的 3 倍。之后,在种箱中设置颗粒工厂,用来生成填充完成的颗粒模型。

气流场的网格划分采用滑移网格法,将排种盘与型孔部分设置为动网格,将型孔与存种腔室、型孔与出气腔室、进气口与存种腔室之间的接触面设置为交界面,使得排种盘在转动下完成数据的交换[24-25]。进气口设置为 inlet,出气口设置为 outlet,其余面设置为 wall,气流场网格模型如图 7 所示。

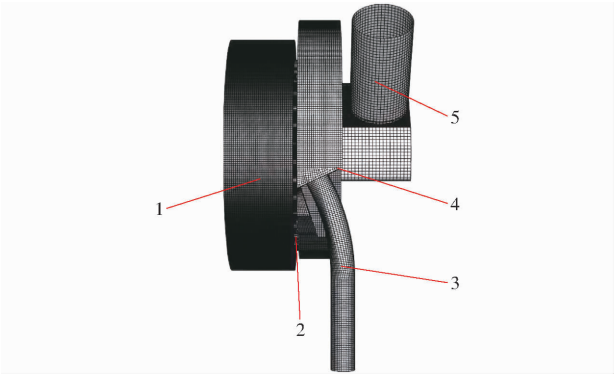


图 7 排种器气流场网格

Fig. 7 Airflow field mesh of seed metering device

1. 出气腔室网格 2. 型孔网格 3. 导种管网格 4. 存种腔室网格 5. 进气口网格

3.3 仿真参数确定

由于玉米颗粒表面无粘附力,因此采用 Hertz-Mindlin (no slip)接触模型。确定相关参数[26-29],如表 2、3 所示。

对于流体域,进行耦合计算时使用多相流框架进行求解。由于颗粒对流场有明显的作用,因此颗粒体积分数不能忽略,设置为欧拉多相流模型进行模拟。仿真过程中设置 EDEM 时间步长为 1×10^{-6} s,

表 2 玉米种子和排种盘物理特性

Tab. 2 Physical properties of maize seed and seed metering disc

项目	泊松比	密度/(g·cm^{-3})	剪切模量/Pa
玉米种子	0.4	1.180	1.37×10^{8}
排种盘	0.5	1.197	1.77×10^{8}

表 3 种子与种子、种子与排种盘接触参数

Tab. 3 Contact parameters between seed-seed and seed-seed metering disc

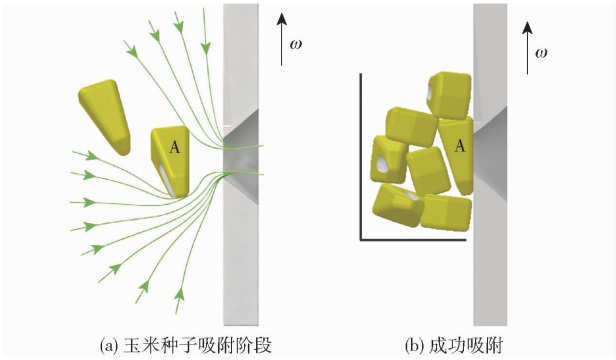
项目	弹性恢复系数	滑动摩擦因数	滚动摩擦因数
种子-种子	0.182	0.413	0.078 2
种子-排种盘	0.621	0.482	0.093 1

Fluent 时间步长为 1×10^{-4} s,为 EDEM 时间步长的 100 倍;设置 Fluent 时间步为 30 000 步,总的仿真时间为 3 s;设置最大迭代时间步为 50 步,每 0.02 s 保存一次数据。因气压式播种机适用于高速情况下,EDEM 中设置排种盘转速为 30 r/min(相当于播种机的工作速度为 12 km/h)。将 Fluent 中的转速设置为与 EDEM 中排种盘相同转速。

3.4 工作过程分析

3.4.1 充种过程分析

在充种过程中,种子群受到气流与颗粒的共同作用。在排种盘开始转动后,种子受到排种盘的扰动和气流曳力,开始向型孔逐渐靠近并且向角速度方向产生一定的运动趋势。此时气流场主要发挥 3 个作用:①将有优势位置的玉米种子 A 推向型孔,如图 8a 所示。②为稳定压附到型孔上的种子提供持续的压附力,以克服其余种子带来的阻力,保证种子离开种堆随排种盘做圆周运动,如图 8b 所示。③气流对处在充种区的种堆起到扰动作用。



(a) 玉米种子吸附阶段 (b) 成功吸附

图 8 充种过程种子的移动

Fig. 8 Seed movement during seed filling process

在充种过程中,颗粒场会产生负面作用:①在充种过程,只有靠近型孔占有优势的种子才可以被充种到排种盘上,其余的种子会因为相对运动产生摩擦而影响种子填充。②被吸附种子在随着排种盘进行圆周运动时,除了克服其余种子的摩擦力之外还需克服其余种子重力。当进种量达到型孔以上时扰

种槽开始发挥作用，扰种槽设置在型孔上方，在排种盘转动时对种堆进行搅拌，使种子可以到达一个局部“沸腾”的状态，从而减小种子间的阻力，并且可以对型孔上方的种子进行一定支撑，从而减小其余种子重力对已被吸附种子 A 的影响。

此外气流的扰动对充种有很大影响。如果扰动种子速度过快会导致种子快速掠过型孔而未被吸附或在种子被压附到型孔的过程中脱离预定轨迹，降低充种稳定性。若扰动种子速度过慢，表明气流对种子没有起到一个很好的扰动，种堆内部种子流动性较差，靠近型孔周围有优势的种子更新速度慢，容易造成充种不及时。因此扰动之后种子速度过快或过慢都会对充种产生不利影响。

3.4.2　清种过程分析

在充种阶段，由于种子形状尺寸的差异会出现型孔无法完全覆盖的情况，此时如果气压足够大可能会出现压附两粒或者两粒以上的情况，如图 9a 所示。为实现单粒播种应保证在进入排种区时每个型孔上只有单粒种子，需要清种机构将多余的种子清除，保证型孔上只保留单粒种子，如图 9b 所示。

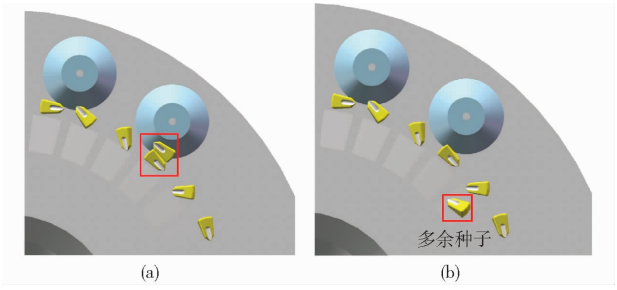


图 9　清种过程

Fig. 9　Seed cleaning process

4　仿真试验设计与分析

4.1　仿真试验设计

结合理论分析结果，选取气压、进种挡位、清种挡位作为试验因素，在微观尺度下采用 DEM－CFD 耦合仿真进行单因素试验。其中，清种装置和进种量调节板分别设置 9 个挡位，根据作物粒径可将其划分为小型作物（3～6 mm，适配 1～3 挡，如小麦）、中型作物（6～10 mm，适配 4～6 挡，如大豆）、偏大型作物（10 mm 以上，适配 7～9 挡，如花生）。因为玉米种子形态存在差异，粒径在 10～12 mm 范围内，处于中型作物上限与偏大型作物粒径区间的过渡范围，因此试验中两个调节部件均选取 6～8 挡位。单因素试验水平如表 4 所示。

4.2　指标分析

4.2.1　充种指标分析

在 EDEM 软件后处理中可以提取任一颗粒的速度与受力，本文选择已经被稳定吸附的种子，并对其在充种区时的速度进行分析，如图 10 所示。

表 4　试验因素水平

Tab. 4　Levels of experimental factors

水平	因素		
	气压/kPa	清种挡位	进种挡位
1	3.5	6	6
2	4.0	7	7
3	4.5	8	8

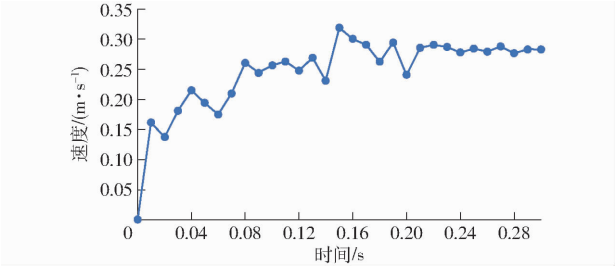


图 10　目标种子速度变化曲线

Fig. 10　Target seeds velocity

如图 11a 所示，目标种子在 0～0.01 s 内种子处于非吸附区，种子速度处在低挡位上下波动。此时气体压力进入到排种器，但目标种子并未占有优势，此时速度变化的原因，主要是气流与扰种装置对种子进行扰动从而使种子处于“沸腾”状态。

在 0.01～0.08 s 内，目标种子处于吸附区，此时速度再次提高。这是因为在这个阶段种子在气流作用下开始向型孔移动，如图 11b 所示，最终被型孔捕获，如图 11c 所示。在吸附阶段所需时间更短，说明捕获种子的能力更强。因此，选择捕获种子所需的时间作为充种能力的评价指标。

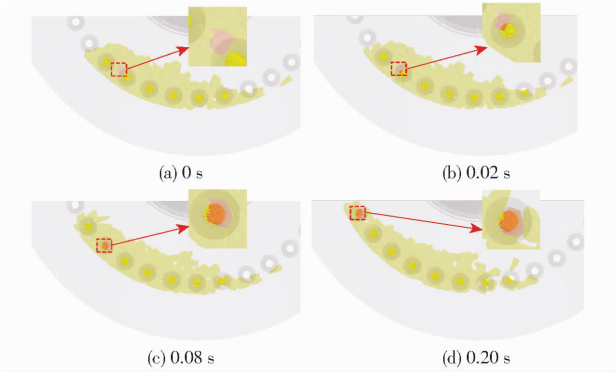


图 11　目标种子位置

Fig. 11　Target seeds positions

在 0.08～0.20 s 目标种子速度不断上下波动。这是因为种子被捕获后随着排种盘进行转动，目标种子不断受到周围种子的挤压和碰撞，直到脱离种堆，如图 11d 所示。此时种子处于不稳定状态，因此，挤压压力直接决定了被吸孔吸附的种子是否能顺利通过种堆。

在 0.20 s 之后目标种子速度趋于稳定，这是因为在这个阶段目标种子已经离开种堆，减少了其余种子的干扰。提取目标种子在种堆当中的压缩力，如图 12 所示，其中，正负号表示型孔轴线方向的压缩力方向，其绝对值代表压缩力大小。提取种子被捕获到脱离种堆这一段时间的压缩力的总和定义为移动阻力，作为另一充种性能的指标。

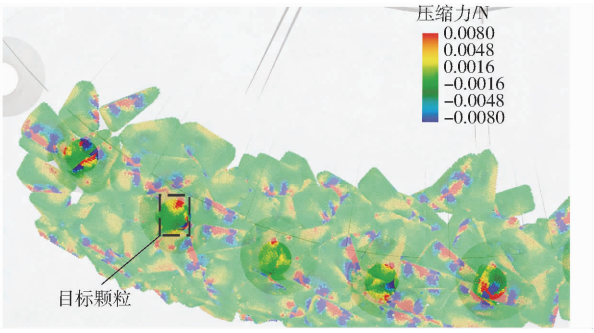


图 12 被捕获种子的压缩力

Fig. 12 Compressive force of captured seeds

4.2.2 清种指标分析

在充种区可能会出现一个型孔捕获多粒种子的情况。当进入到清种区时，被捕获的多余种子与刮种轮发生碰撞。选择与刮种轮发生碰撞的种子，对其在清种区时的速度进行分析，如图 13 所示。

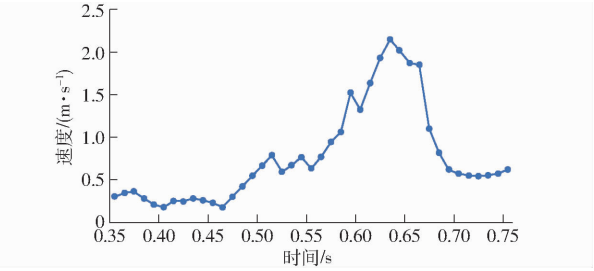


图 13 被清种子速度变化曲线

Fig. 13 Speed of seeds being cleared

如图 14 所示，颗粒 A 与刮种轮发生碰撞，种子 A 速度发生剧烈波动。此时种子 B 逐渐占据了型孔，刮种轮将多余的种子颗粒 A 清除，保证每个型孔只有单粒种子。在清种过程中，种子颗粒与刮种轮接触后的极限速度越大说明刮种轮与种子碰撞越强，越容易清除多余的种子，因此本文将碰撞后的极限速度作为评价清种性能的指标。

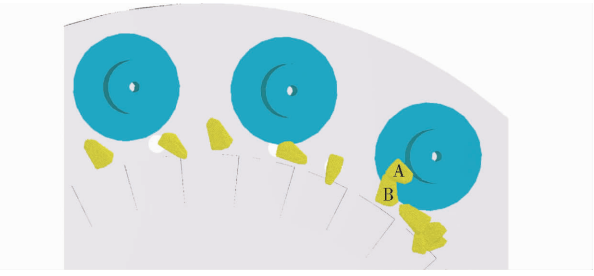


图 14 种子颗粒与清种轮碰撞

Fig. 14 Collision between seed particles and seed cleaning wheel

4.3 性能分析

4.3.1 充种性能分析

在仿真完成之后，通过后处理软件提取贴近排种盘区域的种群速度分布，如图 15 所示。结合种盘转速分析可知，在排种盘转速 30 r/min 的情况下（对应型孔部分线速度为 0.28 m/s），不同气压条件下扰种效果有显著差异。在气压 3.5 kPa 下，型孔周围仅有少数种子因扰动获得高速度，大部分种子流动性不佳。在 4.0 kPa 时，速度高值区集中、均匀并且大多在 0.26 m/s 左右，说明扰种效果良好。在 4.5 kPa 时虽然大多数种子都被气流扰动，但是种子速度普遍过高，型孔周围速度大多在 0.3 m/s 以上，最大达到 0.39 m/s，会使种间碰撞加剧影响充种。

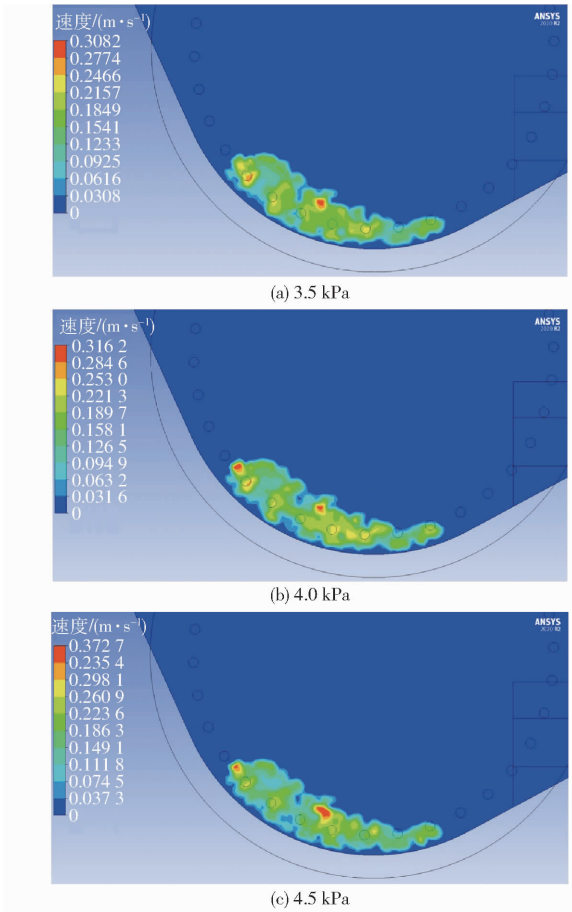


图 15 种群速度分布

Fig. 15 Seed population velocity distribution

通过仿真得出气压与进种挡位对种子捕获时间和压缩力的影响，如图 16 所示。随着气压的增大种子捕获所需时间持续减小，但是移动阻力逐渐变大。这是因为在气压增大下，一方面种子受力增大，压附到种盘上的时间缩短；另一方面，气压通过调控扰种效果影响了移动阻力。但是在气压过大的情况下种子之间碰撞概率与强度增加，增大了其余种子对已捕获种子的阻力，从而导致压缩力增大。

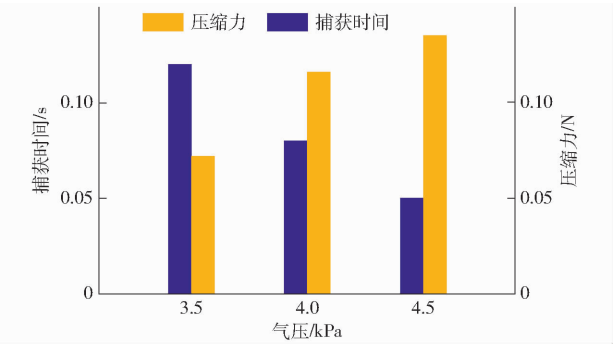


图 16　气压对种子捕获时间和压缩力影响

Fig. 16　Effect of air pressure on seed capture time and compressive force

如图 17 所示，进种量对捕获种子时间影响不显著，但是随着进种挡位增加，压缩力呈现先减小后增大的趋势。随着种子增多排种盘型孔上方的扰种机构对种堆的扰动效果逐渐达到最佳，增加了型孔周围种子处于“沸腾”状态的时间。但是随着进种量不断增多型孔周围处于“沸腾”状态的时间开始减少，并且被吸附种子在种堆中移动的时间更长，受到其余种子的阻力更大，因此增大了压缩力。

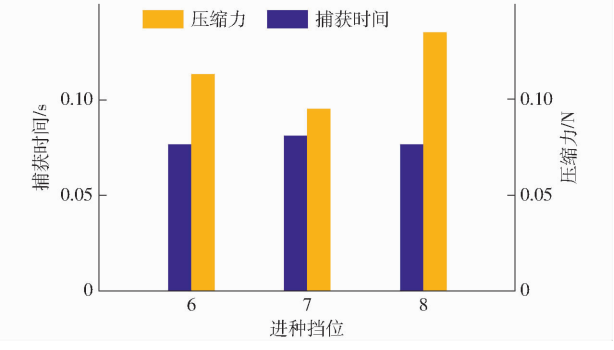


图 17　进种挡位对种子捕获时间和压缩力影响

Fig. 17　Effect of seed gear on seed capture time and compressive force

4.3.2　清种性能分析

清种间隙对碰撞极限速度的影响如图 18 所示。种子的碰撞极限速度随清种挡位的减小而增大，这是因为随着清种间隙的减小种子与刮种轮碰撞力增大，导致碰撞极限速度增大，减小清种间隙可以提高清种性能，这与清种过程力学模型相一致。

4.3.3　综合分析

气压式排种器的排种质量主要取决于充种和清种性能，但是单一的充种和清种性能无法准确地反映排种质量。比如当气压与进种量都最佳时排种性能达到最佳，当压力足够大时就容易造成多粒同时吸附现象，此时需要提高清种性能，就需要减小清种间隙。但增大刮种轮与种子颗粒直接的碰撞力，导致稳定压附在型孔上的种子也可能被误清造成漏播。因此，充种与清种性能是相互制约的关系，需进行优化找到最佳的参数组合方案，以协调排种器的充种与清种。

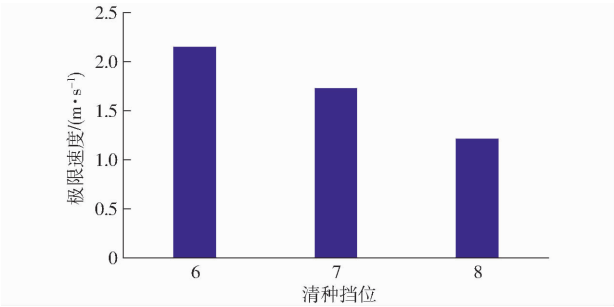


图 18　清种挡位对极限速度影响

Fig. 18　Effect of seed cleaning gear on limit speed

5　台架试验

5.1　正交试验设计

在仿真试验中从微观尺度上定义了排种器的性能指标，然而这些指标在实际试验中无法直接观测。为明确排种器作业性能的关键影响因素，本文选取气压、进种挡位和清种挡位作为试验因素，以单粒率、重播率和漏播率为评价指标，开展 Box－Behnken 响应面优化试验，试验因素编码见表 5，台架试验装置如图 19 所示。

表 5　试验因素编码

Tab. 5　Factors and codes of experiment

编码	因素		
	气压 x_1/kPa	进种挡位 x_2	清种挡位 x_3
－1	3.5	6	6
0	4.0	7	7
1	4.5	8	8



图 19　台架试验装置

Fig. 19　Bench test rig

1. 排种器　2. 计数传感器　3. 控制器　4. 风源

通过控制器来调整排种盘转速，通过使用排种试验台来提供可变风压，通过欧姆龙 E3X－HD100 型光电计数传感器（100 kHz，10 μs 响应）可在控制

器上精准统计并显示播种粒数。以设定株距对应的种子下落理论时间为基准，当传感器检测到连续两个及以上信号峰值，且相邻峰值的时间间隔小于理论时间的 1/2 记为重播；当传感器检测区域内无信号，且无信号持续时间大于 2 倍理论时间，记为漏播。每组试验统计 80 个型孔下种数进行重播率、漏播率和单粒率的计算，计算式分别为

$$Q_r = \frac{n_1}{80} \times 100\% \tag{11}$$

$$Q_m = \frac{n_2}{80} \times 100\% \tag{12}$$

$$Q_p = 100\% - Q_m - Q_r \tag{13}$$

式中 Q_r——重播率，%

Q_m——漏播率，%

Q_p——单粒率，%

n_1——重播数

n_2——漏播数

5.2 正交试验结果分析

正交试验方案与结果如表 6 所示（表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值），使用 Design-Expert 软件对单粒率方差分析，如表 7 所示。由分析结果可知，气压、进种挡位与清种挡位对单粒率均有显著影响（$P<0.01$）。回归方程的失拟项不显著（$P>0.05$），说明所建立的回归模型的拟合效果良好，有较高的可信度。

在单粒率的回归模型中，X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_2X_3、X_1X_2 对响应变量影响极显著，X_1X_3 对响应变量影响显著。去除不显著因素之后得到单粒率的回归方程为

$$Q_p = -644.6875 + 178.5x_1 + 51.22x_2 + 57.47x_3 - 2.5x_1x_2 - 1.25x_1x_3 - 0.9375x_2x_3 - 18.875x_1^2 - 2.53x_2^2 - 3.16x_3^2 \tag{14}$$

为了更直观地说明各因素对单粒率的影响，根据回归方程绘制了气压、清种挡位与进种挡位对单粒率的等高线图，如图 20 所示。

由此，可以确定黄金粮 MY73 在工作速度为 12 km/h、清种挡位为 7 挡、进种挡位为 7 挡、气压 4.0 kPa 时，单粒率最高，由于各参数间存在显著的

表 6 试验方案及结果

Tab. 6 Test scheme and results

序号	因素			Q_r/%	Q_m/%	Q_p/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	0	10.00	90.00
2	1	-1	0	2.50	3.75	93.75
3	-1	1	0	5.00	3.75	91.25
4	1	1	0	7.50	2.50	90.00
5	-1	0	-1	1.25	11.25	87.50
6	1	0	-1	3.75	6.25	90.00
7	-1	0	1	0	7.50	92.50
8	1	0	1	5.00	2.50	92.50
9	0	-1	-1	0	8.75	91.25
10	0	1	-1	3.75	5.00	91.25
11	0	-1	1	0	3.75	96.25
12	0	1	1	5.00	2.50	92.50
13	0	0	0	0	1.25	98.75
14	0	0	0	0	1.25	98.75
15	0	0	0	1.25	1.25	97.50
16	0	0	0	0	1.25	98.75
17	0	0	0	1.25	0	98.75

表 7 单粒率方差分析

Tab. 7 Single-seed rate variance analysis

来源	平方和	均方	F	P
模型	222.99	24.78	105.71	<0.0001 **
X_1	3.13	3.13	13.33	0.0082 **
X_2	4.88	4.88	20.83	0.0026 **
X_3	23.63	23.63	100.83	<0.0001 **
X_1X_2	6.25	6.25	26.67	0.0013 **
X_1X_3	1.56	1.56	6.67	0.0364 *
X_2X_3	3.52	3.52	15.00	0.0061 **
X_1^2	93.75	93.75	400.02	<0.0001 **
X_2^2	26.98	26.98	115.11	<0.0001 **
X_3^2	41.94	41.94	178.96	<0.0001 **
失拟项	0.3906	0.1302	0.4167	0.751
总和	224.63			

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

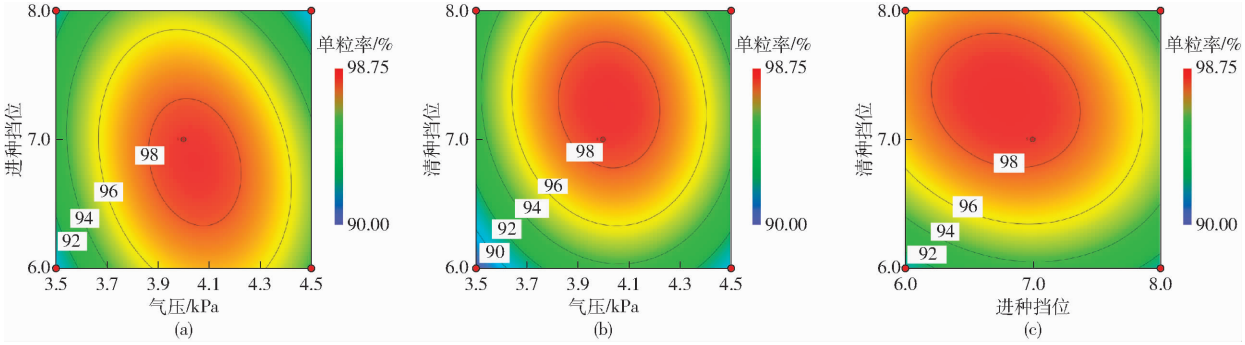


图 20 交互项对单粒率影响的等高线图

Fig. 20 Contour maps of effect of interaction terms on single-seed rate

交互协同作用，当偏离该组合时，单粒率会明显降低。

5.3　参数优化

为了获得排种器的最佳工作参数，对试验指标进行优化求解。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Q_p \\ \min Q_m \\ \min Q_r \\ \text{s.t.} \begin{cases} 3.5\ \text{kPa} \leqslant x_1 \leqslant 4.5\ \text{kPa} \\ 6 \leqslant x_2 \leqslant 8 \\ 6 \leqslant x_3 \leqslant 8 \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

以黄金粮 MY73 和郑单 958 为例，采用上述的正交试验方法以 10、12、14 km/h 作业速度对排种器进行试验，其中，黄金粮 MY73 农艺株距为 19 cm，10、12、14 km/h 作业速度分别匹配排种盘转速 25、30、35 r/min；郑单 958 农艺株距为 22 cm，同作业速度梯度下排种盘转速依次为 22、27、32 r/min。结合排种器实际工作状态，得到各个作业速度下的最优参数组合，见表 8、9。针对黄金粮 MY73 根据农艺要求株距为 19 cm，在 10 km/h 的作业速度下适配气压为 3.5 kPa、进种挡位为 7 挡、清种挡位为 6 挡，12 km/h 时调整为气压 4.0 kPa、进种挡位 7 挡、清种挡位 7 挡，14 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 7 挡；针对郑单 958 为保证农艺要求株距 22 cm，10 km/h 的作业速度下适配气压为 4.0 kPa、进种挡位为 7 挡、清种挡位为 7 挡，12 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 7 挡，14 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 8 挡。

表 8　黄金粮 MY73 参数组合

Tab.8　Parameters combination of Huangjinliang MY73

作业速度/(km·h^{-1})	清种挡位	进种挡位	气压/kPa	单粒率/%
10	6	7	3.5	97.5
12	7	7	4.0	98.4
14	7	8	4.5	96.3

表 9　郑单 958 参数组合

Tab.9　Parameters combination of Zhengdan 958

作业速度/(km·h^{-1})	清种挡位	进种挡位	气压/kPa	单粒率/%
10	7	7	4.0	96.3
12	7	8	4.5	98.7
14	8	8	4.5	95.0

6　田间试验

为了检验排种效果与模拟结果的一致性，在河北省望都县高优农场进行田间试验。试验机具为德易播 2BQD－6A 型播种机，使用东方红 LX1604(g4)型拖拉机加装北斗导航系统进行播种作业，作业过程中保持匀速直线行驶。在播种过程使用与模拟试验中相同参数进行田间试验，试验场景如图 21 所示。



(a) 试验机具　(b) 株距测定　(c) 播种详情

图 21　田间试验场景

Fig.21　Field test scenario

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》以重播率、漏播率和合格率为评价指标对结果进行分析，试验结果如表 10、11 所示。

表 10　黄金粮 MY73 田间试验结果

Tab.10　Field test results of Huangjinliang MY73

%

速度/(km·h^{-1})	合格率	重播率	漏播率
10	94.40	2.70	2.90
12	95.40	2.15	2.45
14	92.31	2.90	4.79

表 11　郑单 958 田间试验结果

Tab.11　Field test results of Zhengdan 958　%

速度/(km·h^{-1})	合格率	重播率	漏播率
10	94.40	2.20	3.40
12	95.70	1.97	2.33
14	92.70	2.62	4.68

在真实播种场景下，播种机在工作中会发生振动；且在台架试验中风压可以保持恒定，而实际播种时风压会出现不稳定的情况，这都会对播种质量产生不利影响。此外，在台架试验中种子通过导种管时直接通过传感器计数，而实际播种时种子入土会发生弹跳现象，影响合格率。通过计算现场试验与模拟试验的误差，合格率的平均误差小于 5%，满足模拟试验和现场试验的误差要求，证明构建的模型能有效反映实际工作情况。

7　结论

(1)提高播种机单粒率是实现精量播种的关

键。通过构建耦合仿真模型对气压式排种器充种与清种过程进行分析,确定气压、清种间隙和进种量是影响充种与清种的关键因素。

(2)结合 DEM - CFD 建立了气压式排种器充种清种的耦合模型,在微观层面上对充种清种机理进行研究。解析了排种器内气流场与种子颗粒场的相互作用机制,并通过台架试验与 Design-Expert 软件在宏观层面上对综合排种质量进行优化,协调了充种与清种的制约关系,确定了黄金粮 MY73、郑单 958 在作业速度 10 ~ 14 km/h 下最优的参数组合。具体为:针对黄金粮 MY73 根据农艺要求株距为 19 cm,在 10 km/h 的作业速度下适配气压为 3.5 kPa、进种挡位为 7 挡、清种挡位为 6 挡,12 km/h 时调整为气压 4.0 kPa、进种挡位 7 挡、清种挡位 7 挡,14 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 7 挡;针对郑单 958 为保证农艺要求株距 22 cm,10 km/h 的作业速度下适配气压为 4.0 kPa、进种挡位为 7 挡、清种挡位为 7 挡,12 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 7 挡,14 km/h 时调整气压为 4.5 kPa、进种挡位 8 挡、清种挡位 8 挡。田间试验证明,采用优化参数作业时,播种合格率为 92.31% ~ 95.70%,模拟试验与田间试验的合格率平均误差小于 5%。证明了仿真模型能有效反映实际情况。

(3)试验表明,种子品种与作业速度的改变会改变排种器的工作状态,气压式播种机的最优工作参数也会发生改变,在实际播种中为保证播种高合格率,应根据实际工况对排种器工作参数进行调整。

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] 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)

[3] 李治民,安绍毅,杨丽,等. 气压式高速玉米精量排种器充-投种机理分析与结构优化[J]. 农业机械学报,2025,56(9):62 - 72,128.
Li Zhimin, An Shaoyi, Yang Li, et al. Analysis and structural optimization of filling and releasing mechanism for pneumatic high-speed precision maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 62 - 72, 128 (in Chinese)

[4] 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)

[5] 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)

[6] 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)

[7] 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 for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23 - 31. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 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)

[10] Yang L, Yan B X, Cui T, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1): 9 - 26.

[11] 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)

[12] 赵鹏飞,邓敏,王孟盛,等.气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(7):38－47.
Zhao Pengfei, Deng Min, Wang Mengsheng, et al. Design and experiment of pneumatic swash plate wheat wide-seedling-belt uniform sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 38－47. (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 seeds with protruding species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227－239. (in Chinese)

[14] 李博竑,李骅,齐新丹,等.基于 CFD－DEM 的排种器仿真及参数优化(英文)[J].智能化农业装备学报(中英文),2021,2(2):26－41.
Li Bohong, Li Hua, Qi Xindan, et al. Simulation and parameter optimization of seed metering device based on CFD－DEM[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2021, 2(2): 26－41. (in Chinese)

[15] 王磊,廖宜涛,万星宇,等.油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4):43－53.
Wang Lei, Liao Yitao, Wan Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for repeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43－53. (in Chinese)

[16] Kong X R, Liu J, Yang T Y, et al. Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 31－42.

[17] 李贵川,李海宇,杨少鹏,等.基于 CFD－DEM 耦合的不同出口形式气力集排系统分配器仿真与试验(英文)[J].智能化农业装备学报(中英文),2024,5(1):1－11.
Li Guichuan, Li Haiyu, Yang Shaopeng, et al. Simulation and experiment of distributors of different outlet types of pneumatic collection and discharging systems based on CFD－DEM coupling[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2024, 5(1): 1－11. (in Chinese)

[18] Mudarisov S, Badretdinov I, Rakhimov Z, et al. Numerical simulation of two-phase "air-seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105151.

[19] Hu H J, Zhou Z L, Wu W C, et al. Distribution characteristics and parameter optimization of an air-assisted centralized seed-metering device for rapeseed using a CFD－DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246－259.

[20] Li H, Yang L, Zhang D, 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.

[21] Tang H, Xu F, Xu C, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107555.

[22] 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)

[23] Xu J, Sun S, He Z, 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.

[24] 史嵩,刘虎,位国建,等.基于 DEM－CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(5):54－66.
Shi Song, Liu Hu, Wei Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM－CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54－66. (in Chinese)

[25] 丁力,杨丽,武德浩,等.基于 DEM－CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J].农业机械学报,2018,49(11):48－57.
Ding Li, Yang Li, Wu Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM－CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48－57. (in Chinese)

[26] 王云霞,梁志杰,张东兴,等.基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J].农业工程学报,2016,32(22):36－42.
Wang Yunxia, Liang Zhijie, Zhang Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36－42. (in Chinese)

[27] 陈泽仁,刘正彬,关威,等.面向播种过程离散元仿真的玉米颗粒建模方法[J].农业工程学报,2024,40(14):14－22.
Chen Zeren, Liu Zhengbin, Guan Wei, et al. Maize grain modeling method for the DEM simulation of sowing process[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(14): 14－22. (in Chinese)

[28] 张荣芳,周纪磊,刘虎,等.玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J].农业机械学报,2022,53(增刊 1):69－77.
Zhang Rongfang, Zhou Jilei, Liu Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 69－77. (in Chinese)

[29] 王美美,王万章,杨立权,等.基于响应面法的玉米籽粒离散元参数标定[J].华南农业大学学报,2018,39(3):111－117.
Wang Meimei, Wang Wanzhang, Yang Liquan, et al. Calibration of discrete element model parameters for maize kernel based on response surface methodology[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(3): 111－117. (in Chinese)