中国农业大学学报 2026,31(12):248-266
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

李玉环,李贤,楚森,任永峰,刘尊民,李宝刚,路战远,蒋永新,张向前,谢锐. 基于环隙引射原理的玉米高速气流导种方法研究[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):248-266.

LI Yuanhuan, LI Xian, CHU Sen, REN Yongfeng, LIU Zunmin, LI Baogang, LU Zhanyuan, JIANG Yongxin, ZHANG Xiangqian, XIE Rui. Research on high-speed airflow seed guiding method for maize based on the annular gap ejector principle[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 248-266.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.19

基于环隙引射原理的玉米高速气流导种方法研究

李玉环[1,2,3] 李 贤[1] 楚 森[1] 任永峰[2] 刘尊民[1,3] 李宝刚[1,3]
路战远[2] 蒋永新[4] 张向前[2] 谢 锐[2*]

(1. 青岛理工大学 城市建设学院,山东 青岛 266520;
2. 内蒙古自治区农牧业科学院,呼和浩特 010031;
3. 青岛理工大学 工业流体节能与污染控制教育部重点实验室,山东 青岛 266520;
4. 新疆维吾尔自治区农业科学院,乌鲁木齐 830091)

摘 要 针对重力式导种在高速作业时种子与管壁碰撞,导致相邻种子流叠压,破坏原排种器输出的有序种子流,造成播种质量恶化的问题,本研究设计了一种基于环隙引射原理的玉米高速气流导种装置,通过环形狭缝构建上吸下吹的流场结构,实现排种器出口种子的精准拾取与均匀输送。基于流体动力学理论,阐明了环隙引射结构在导种过程中的作用机制,建立了玉米种子运移动力学模型。通过环隙结构参数的离散元-计算流体动力学耦合方法(DEM-CFD)进行数值分析,确定最优参数组合为环隙进口宽度4 mm、环隙出口宽度1.2 mm、环隙长度20 mm,该组合下导种一致性变异系数为8.61%。台架试验表明:当作业速度不超过14 km/h时,该装置合格率≥95.9%,漏播率≤1.8%,株距变异系数≤14.7%,对作业速度变化表现出良好的适应性。田间试验表明:当作业速度为8~14 km/h时,装置合格率为95.2%~97.5%,漏播率为0.9%~2.4%,株距变异系数为14.5%~21.9%,各项性能均显著优于传统重力式导种装置,可满足玉米精量播种要求。研究结果为气吸式精量排种系统导种方案优化提供了理论依据与工程参考,对提升玉米精量播种质量、保障田间群体结构整齐度具有重要实践价值。

关键词 精量排种;气流导种;环隙;Fluent仿真;气固耦合;EDEM

中图分类号 S223.2 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0248-19 **文献标志码** A

Research on high-speed airflow seed guiding method for maize based on the annular gap ejector principle

LI Yuanhuan[1,2,3], LI Xian[1], CHU Sen[1], REN Yongfeng[2], LIU Zunmin[1,3], LI Baogang[1,3],
LU Zhanyuan[2], JIANG Yongxin[4], ZHANG Xiangqian[2], XIE Rui[2*]

(1. Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;
3. Key Laboratory of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control, Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
4. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

收稿日期:2026-04-11;接受日期:2026-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52505266);中国博士后科学基金项目(2024MD763988);内蒙古自治区自然科学基金项目(2025MS05006);新疆战略人才培养计划一流科技领军人才项目(XJRC-2025-KJ-PY-KJLJ-075);中央引导地方科技发展资金项目(2024YD012)

第一作者:李玉环(ORCID:0009-0009-1073-2284),副教授,主要从事精量播种装备设计及研发,E-mail:18612897966@163.com

通讯作者:谢锐(ORCID:0009-0009-2467-3801),副研究员,主要从事作物耕作栽培与配套农机装备研究,E-mail:xierui12358@163.com

Abstract　During high-speed operation of gravity-type seed delivery, seeds collide with the pipeline wall during high-speed operation of gravity-type seed delivery, which causes overlapping of adjacent seed flow, disrupts the ordered seed flow discharged from the seed metering device and deteriorates seeding quality, A high-speed airflow seed guiding device for maize based on the annular gap ejection principle was designed in this study. An upper-suction and lower-blow flow field structure was constructed via annular narrow slits to realize accurate picking and uniform conveying of seeds at the outlet of the seed metering device. Based on fluid dynamics theory, the action mechanism of the annular gap ejection structure during seed delivery was clarified, and a dynamic model for maize seed migration was established. DEM-CFD gas-solid coupling numerical analysis on structural parameters of the annular gap was carried out, and the optimal parameter combination was determined as follows: inlet width of annular gap 4 mm, outlet width 1.2 mm and annular gap length of 20 mm, with the variation coefficient of seed delivery consistency reaching 8.61% under this configuration. Bench tests indicated that when the operating speed was ≤14 km/h, the qualify rate of the device was≥95.9%, the missing seeding rate ≤1.8%, and the coefficient of variation of plant spacing ≤14.7%, exhibiting favorable adaptability to variations in operating speed. Field experiments indicate that at the operating speed of 8-14 km/h, the device achieves a qualify rate of 95.2%-97.5%, a miss-seeding rate of 0.9%-2.4% and a plant spacing variation coefficient of 14.5%-21.9%, compared to the conventional gravity-type seed guiding device and can satisfy the technical requirements of precision maize seeding. The research findings provide theoretical basis and engineering references for optimizing the seed delivery scheme of vacuum precision seed metering systems, and hold important practical value for improving maize precision seeding quality and guaranteeing the uniformity of field crop population structure.

Keywords　precision seed metering; airflow seed guiding; annular gap; fluent simulation; gas-solid coupling; EDEM

高速精量播种（作业速度大于8 km/h）可确保株距均匀、出苗整齐，有利于光、温、水、肥的协调利用，并可抢抓农时，有效提高单产水平[1-5]。高性能单粒精量排种系统是高速精量播种技术的核心，由精量排种器与导种机构两部分构成，分别承担精量排种与种子平稳输送功能。目前，国内种子平稳运移技术普遍采用重力欠约束导种方案，即高速精量播种机配备重力式方形曲线导种管。高速作业时，田间机具振动剧烈，种子与管壁发生频繁碰撞，导致运移轨迹偏移或相邻种子叠合，破坏原有种子流的稳定性，加剧重播与漏播，严重影响播种质量[6-10]。

为实现均匀有序导种，国外企业采用全约束导种和气送式欠约束导种两类技术路线。其中Precision Planting的Speed Tube型输送带式导种装置、Kinze的毛刷轮旋转取种的带式导种装置、John Deere的毛刷带式导种装置，均对离开排种器后的种子进行全机械约束，有效减少了种子输送过程中的无序碰撞[11-13]。Väderstad[14]、Kverneland[15]、Horsch等[16]公司则采用正压气流弹射投种技术，借助正压气流驱动种子沿导种管内壁快速滑落入沟，种子与管壁碰撞少，播种均匀性优良。国内学者也围绕种子平稳有序输送技术开展了系列研究，陈学庚等[17]研发了一种带式导种装置，实现了种子精准投送，显著提高了播种精度。王超等[18]针对播种过程中稻麦轮作区土壤粘附堵塞严重影响播种质量的问题，通过优化导种装置关键结构参数，设计了一种小麦高速气流投种机构，实现了稳定有序的单粒精量播种。刘瑞等[19]针对高速工况下因投种点位过高、种子剧烈碰撞导致粒距均匀性差的问题，基于文丘里管原理设计了一种正压气流辅助精量播种机导种装置，提高了播种均匀性。Tang等[20]针对种子与管壁碰撞影响播种质量的问题，设计了一种气流辅助导种装置，采用DEM-CFD气固耦合仿真和台架试验优化了关键部件参数，减少了种子碰撞。上述研究在播种均匀性提升方面提出了较为有效的解决方案，但全约束导种方式采用主动输送机构，增加了系统的复杂性，降低了整机可靠性。气压式玉米精量播种机利用自身正压气流配合导种机构实现气送导种，气流源与气压式精量排种器共用，对正压气流稳定性要求较高，难以同时兼顾充种稳定性与导种的均匀性[21-26]。本团队前期研制了一种基于环隙引射的高速气流导种装置，通过高速气流裹挟种子实现平稳输送，但对种子运移机理

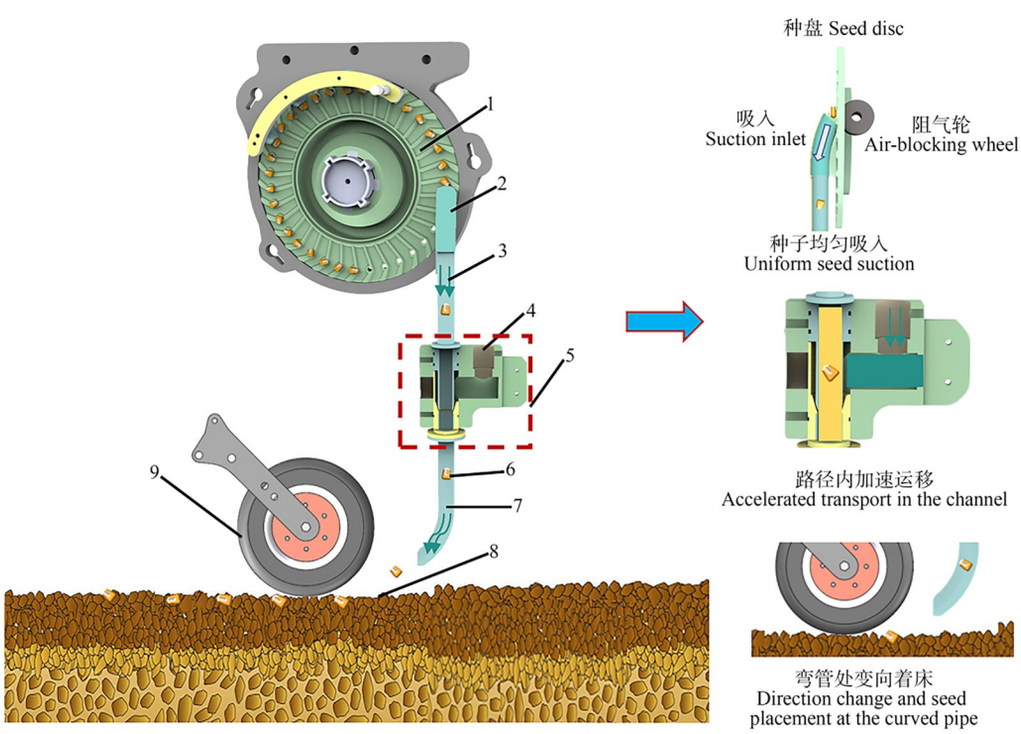
的认识尚不清晰，环隙引射在导种中的流场作用机制未得到揭示，限制了该项技术的深化应用[27]。

鉴于此，本研究通过理论分析和仿真试验，探明种子在气流作用下的平稳运移机理，并在弯管负压取种方法的基础上[27]，应用环隙引射原理揭示流场与种子运移规律，优化高速气流导种装置，进一步提升高速工况下的播种质量。

1 高速气流导种装置结构与工作原理

高速气流导种装置结构如图1所示，主要由取种弯管、进种口段细管、环隙结构、落种管等组成。环隙接口是产生上吸下吹流场的核心部件，通过环隙进出口宽度差异将高速气流收缩，形成局部低压区，产生上吸下吹的气流分布，完成排种器投种点的精准取种和导种管的稳定输种。

作业时，由外接风机提供稳定正压气流，经进气口导入环隙结构；气流在环隙收缩口的作用下汇聚加速，接口处流速升高、压力下降，形成低压区；该低压区在进种管内建立负压流场，运移至投种位置的种子在进种口负压吸附作用下被加速吸入导种系统；随后，种子在气流推力作用下经导种路径加速射入种沟，在压种轮作用下被快速压入土壤，完成平稳有序输送。高速气流输送导种过程可分解为种子均匀吸入、路径内加速分离及弯角处变向着床定位3个环节，前期提出的弯管负压取种方法可保障种子均匀吸入[27]。



1. 气吸式精量排种器；2. 取种弯管；3. 进种口段细管；4. 进气口；5. 环隙结构；6. 玉米种子；7. 落种管；8. 种沟；9. 压种轮

1. Pneumatic precision seed-metering device; 2. Seed-picking elbow pipe; 3. Thin pipe at seed inlet section; 4. Air inlet; 5. Annular gap structure; 6. maize seed; 7. Seed dropping outlet; 8. Seed furrow; 9. Seed pressing wheel

图1 高速气流裹挟输送导种装置工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed airflow entrainment seed guiding device

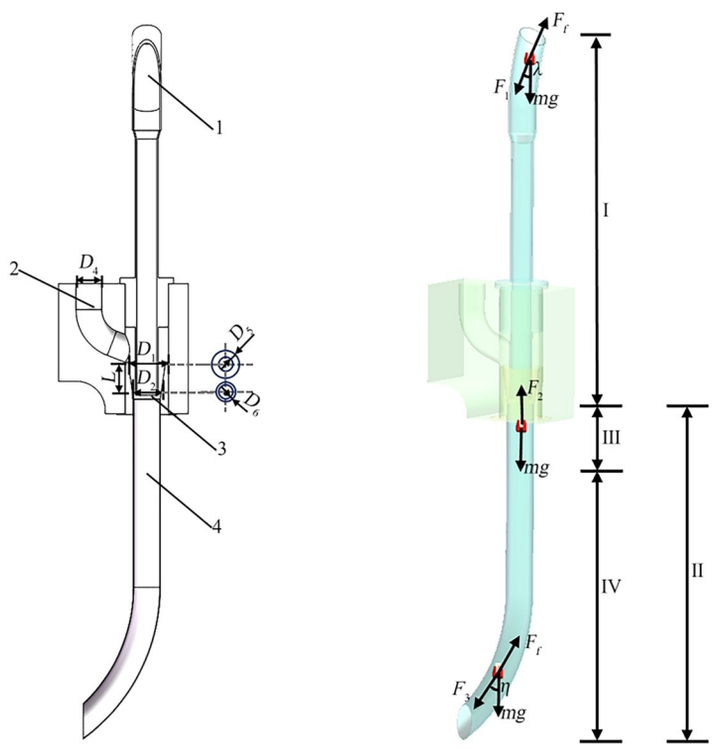
2 环隙引射导种过程分析与参数确定

2.1 种子导种过程动力学分析

传统文丘里供种结构依靠局部截面收缩产生的压差驱动种子，流场集中于喉部区域，种子受力方向单一，姿态偏斜导致碰壁与速度波动；气吹导种装置则多采用单侧气流冲击方式，流场分布不均，种子受力稳定性差。环隙引射式结构通过环形狭缝生成周向均匀的高速射流，流场呈对称分布，对种子形成周向包裹式约束，种子受力路径更为稳定，碰壁损失显著降低，可显著抑制种子姿态偏斜与速度波动，提升导种过程的稳定性与一致性。为

建立种子运移动力学模型，本研究作出如下基本假设：1）忽略种子之间的相互碰撞与干扰，视单粒种子独立运动；2）种子与管壁之间为弹性碰撞，碰撞过程无能量损失，速度方向遵循几何反射规律；3）气流为稳态、不可压缩、绝热流动，流场分布均匀稳定；4）理论分析阶段将种子视为等效球体；DEM-CFD仿真中采用三维扫描真实外形。

如图2（a）所示，高速气流导种装置环隙结构的主要结构参数包括环隙进口直径（D_1）、环隙出口直径（D_2）、进气管直径（D_4）、环隙进口宽度（D_5）、环隙出口宽度（D_6）、环隙长度（L）。种子在导种装置内的运动过程分为2个阶段，如图2（b）所示。上部吸种阶段包括弯管负压送种和直管负压取种2个过程，种子在管道收缩段形成的负压作用下被快速吸附，加速并稳定进入导种管，实现种子的有序拾取；随后种子进入管道渐扩段，气流由负压逐步转为正压，在III段反向压力作用下加速衰减，继而在IV段稳定加速段进行加速运动射入土壤，完成上吸取种与下吹送种的全过程。



(a) 导种装置结构参数示意图
(a) Schematic diagram of structural parameters of the seed guiding device

(b) 种子在导种装置内运动示意图
(b) Schematic diagram of seed movement inside the seed guiding device

1. 进种区；2. 进气区；3. 混合区；4. 排种区；I. 上吸取种过程；II. 下吹送种运动过程；III. 加速衰减段；IV. 稳定加速段；F_1为环隙上侧负压吸附力；F_2为加速衰减段所受的环隙下的侧气流干扰力；F_3为在加速阶段所受的环隙下侧吹种力；m为玉米种子质量；g为重力加速度；F_f为玉米种子与导种管壁的摩擦力；λ为F_1与mg的夹角；η为F_3与mg的夹角；D_1为环隙进口直径；D_2为环隙出口直径；D_4为进气管直径；D_5为环隙进口宽度；D_6为环隙出口宽度；L为环隙长度。下同。

1. Seed inlet area; 2. Air inlet area; 3. Mixing area; 4. Seed discharge area; I. Upper suction seeding process; II. Lower air-blowing seeding movement process; III. Accelerated decay phase; IV. Stable acceleration section; F_1 is the negative pressure adsorption force on the upper side of the annular gap; F_2 is the airflow interference force on the lower side of the annulus suffered during the acceleratteddecay segment; F_3 is the seed-blowing force exerted on the lower side of the annular gap during the acceleration stage; m is the mass of the maize seed; g is the gravitational acceleration; F_f is the friction force between the maize seed and the inner wall of the seed guide tube; λ is the angle between F_1 and mg; η is the angle between F_3 and mg; D_1 is the inlet diameter of the annular gap; D_2 is the outlet diameter of the annular gap; D_4 is the diameter of the air inlet pipe; D_5 is the inlet width of the annular gap; D_6 is the outlet width of the annular gap; L is the length of the annular gap. The same below.

图2　导种装置结构及运动示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the structure and movement of the seed-guiding device

2.2　上吸取种过程分析

环隙进口至环隙出口管径收缩，气流沿锥形侧壁加速流动，流速升高、压力下降，形成负压区。根据动量定理，种子在I段的运动方程为：

$$\begin{cases} mv_1 - mv_0 = \int_0^{t_1}(F_1 + mg)\,dt - \int_0^{t} F_f\,dt \\ F_1 = \dfrac{4}{3}\pi\left(\dfrac{1}{2}D\right)^3 \Delta P_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中：m为玉米种子质量，g；F_1为环隙上侧负压吸附力，N；g为重力加速度，m/s^2；F_f为玉米种子与导种管壁的摩擦力，N；v_0为种子进入取种弯管入口的初始速度，m/s；t_1为种子在Ⅰ段的运移时间，s；t为摩擦力在Ⅰ段的作用时间，s；v_1为种子在Ⅰ段的速度，m/s；D为玉米种子直径，mm；ΔP_1为种子在上吸取种阶段所受的压力差，Pa。下同。

2.3 下吹送种过程分析

2.3.1 加速衰减段受力分析

环隙管道直径由小变大，高速气流速度降低，压力升高，种子进入下吹运动阶段Ⅱ，压力从负压过渡到正压，气流干扰力作用下种子加速度降低导致加速度衰减。根据动量定理，种子在Ⅲ段的运动方程为：

$$\begin{cases} mv_2 - mv_1 = \int_{t_2}^{t_1}(mg - F_2)\,dt \\ F_2 = \dfrac{4}{3}\pi\left(\dfrac{1}{2}D\right)^3 \Delta P_2 \end{cases} \tag{2}$$

式中：t_2为种子在Ⅲ段的运移时间，s；v_2为种子在Ⅲ段的速度，m/s；ΔP_2为种子在下吹运动加速衰减阶段所受的压力差，Pa；F_2为种子在加速衰减阶段所受的环隙下侧吹种力，N。

2.3.2 加速段受力分析

受环隙下侧吹种力的影响，种子易与导种装置下部弯曲末端发生碰撞。种子运动方向应与导种装置方向保持一致；碰撞发生时，下部吹种弯管处受到摩擦力。种子在Ⅳ段稳定加速段进行加速运动，高速气流对种子产生拖曳力，在拖曳力[28]及重力的协同作用下，根据动量定理，可得种子在Ⅳ段的运动方程为：

$$\begin{aligned} & mv_3 - mv_2 = \int_{t_2}^{t_3}(F_3 + mg)\,dt - \int_0^{t_{11}} F_f\,dt \\ & F_3 = \frac{1}{2}C\cdot\rho_g A_p\left(v_g - v_p\right)^2 \\ & C = \begin{cases} \dfrac{24}{Re_p}, Re_p < 1 \\ \dfrac{24}{Re_p}\left(1 + 0.15Re_p^{0.687}\right), 1 < Re_p \leqslant 1\,000 \\ 0.44, 1\,000 < Re_p \leqslant 2\times 10^5 \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式中：t_3为种子在Ⅳ段的运移时间，s；t_{11}为摩擦力在Ⅳ段的作用时间，s；v_3为种子在Ⅳ段的速度，m/s；F_3为在加速阶段所受的环隙下侧吹种力，N；C为空气阻力系数，取0.03；v_g为气流速度，m/s；v_p为颗粒速度，m/s；A_p为种子当量截面积，m^2；ρ_g为气流密度，kg/m^3；Re_p为颗粒雷诺数。

综上可知：

$$\begin{aligned} v_1 &= v_0 + \frac{1}{m}\left[\int_0^{t_1}\left(\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{2}D\right)^2\Delta P_1 + mg\right)dt - \int_0^{t} F_f\,dt\right], t\in[0, t_1] \\ v_2 &= v_1 + \frac{1}{m}\int_{t_1}^{t_2}\left(mg - \frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{2}D\right)^2\Delta P_2\right)dt, t\in(t_1, t_2] \\ v_3 &= v_2 + \frac{1}{m}\left[\int_{t_2}^{t_3}\left(\frac{1}{2}C\cdot\rho_g A_p\left(v_g - v_p\right)^2 + mg\right)dt - \int_{t_2}^{t_{11}} F_f\,dt\right], t\in(t_2, t_3] \end{aligned} \tag{4}$$

由种子在导种装置内的分段运动方程可知，种子上吸取种与下吹送种过程的速度是环隙上侧负压吸附力、重力、环隙下侧吹种力、气流阻力与摩擦力在不同时间区间内耦合作用的结果。对上吸取种及下吹送种运动过程的分析表明：环隙结构形成的负压有利于种子加速进入高速气流导种装置；混合区下部与排种区上部的反向压差较小，且排种室气流速度较大，有利于种子获得理想出射速度。以管内平均速度及进出口流量为评价指标，环隙进口宽度D_5、环隙出口宽度D_6和环隙长度L是影响环隙上侧负压吸附力的关键结构参数，通过关键结构参数的合理匹配，可在混合区内获得均匀稳定的正压加速流场和较高的正压气流流速，有利于玉米种子的加速投种。以下分析不同结构参数对管内气流均匀稳定性的影响。

2.4 导种管内环隙结构参数确定

种子在加速运移阶段，环隙进出口宽度对环隙流场有很大的影响。该参数是调控气流流速与气流量的核心指标[27]，取种弯管直径为21 mm。根据取种弯管的直径及玉米种子的三维尺寸，并考虑对种子产生初步加速作用，结合前期试验，确定进种口段细管直径为17 mm。为保证气流稳定，进气管

直径与取种弯管直径相同，取 21 mm。

环隙结构关键参数示意图如图 3 所示，导种管环隙截面比 α 定义为环隙出口面积与进气管截面积之比，是影响气流速度和气流量的关键参数[28]，即：

$$\alpha=\left(\frac{D_2}{D_4}\right)^2 \tag{5}$$

式中：D_2 为环隙出口直径，mm；D_4 为进气管直径，mm；α 为环隙出口面积与进气管截面积之比。

由上述分析可知，进气管直径 D_4 为 21 mm，当两者截面积比为 1 时，环隙出口宽度 D_6 最大约为 2 mm；环隙出口宽度过小将增加加工难度，取最小值为 0.4 mm。根据前期预试验，初步选定环隙进口宽度 D_5 为 2.0～6.0 mm，环隙长度 L 为 14～26 mm，各因素均设置 5 个梯度，如表 1 所示。以环隙出口平均速度、进气管入口（inlet1，压力入口，5 000 Pa）、取种弯管入口（outlet1，压力出口，0 Pa）、下出口段出口（outlet2，压力出口，0 Pa）的气流量为评价指标，结合田间播种作业参数，通过理论分析得出玉米种子的初始速度为 0.281 m/s（播种速度 12 km/h，播种间距 25 cm）[29]。采用仿真分析软件分析气流的均匀稳定性。

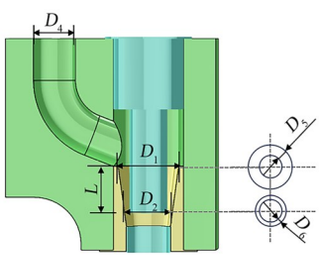


图 3　环隙结构关键参数示意图

Fig. 3　Schematic diagram of key parameters of the annular gap structure

3　仿真试验

3.1　模型建立与网格划分

在 Ansys 18.0 软件中，利用 ICEM-CFD 18.0 软件对高速气流导种装置的计算流体域进行网格划分，如图 4 所示。计算流体域的网格尺寸设置为最大网格尺寸为 5×10^{-3} m，最小网格尺寸为 1×10^{-3} m。对气流路径附近区域进行细化网格处理，并采用 Poly 网格等多种网格类型划分，以提升计算精度。所有网格质量通过检查，确保网格质量最小值不低于 0.4，满足仿真精度要求。

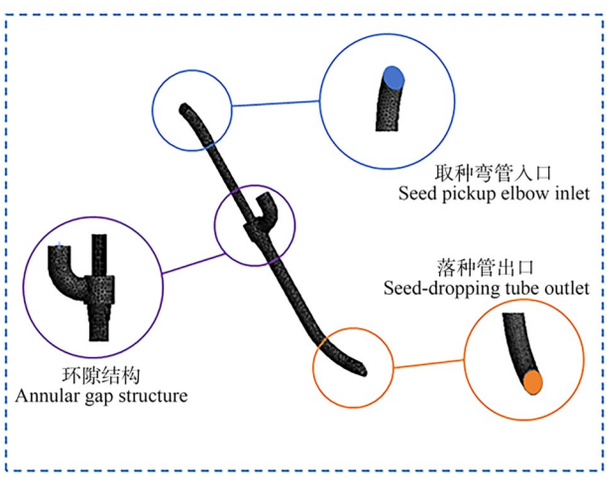


图 4　导种装置的网格划分

Fig. 4　Mesh generation of the seed guiding device

3.2　单因素仿真试验

3.2.1　试验条件与方法

选取环隙进口宽度 D_5、环隙出口宽度 D_6 和环隙长度 L 为试验变量，先后开展单因素仿真和正交试验仿真。单因素仿真阶段，首先固定环隙出口宽度 D_6 为 1.2 mm、环隙长度 L 为 20 mm，以 1 mm 为步长，在 2～6 mm 范围内变化环隙进口宽度 D_5，研究其对气流速度及各因素气流量的影响。在确定环隙进口宽度 D_5 的最优范围后，取其中间值固定，改变环隙出口宽度 D_6 进行进一步的研究，分别设置为 0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 mm，以评估其对气流速度及气流量的影响。同理，在确定 D_6 的最优范围基础

上取其中间值为固定水平，进一步对环隙长度L进行仿真测试，长度分别设置为14、17、20、23和26 mm，研究环隙长度L对气流速度及气流量的影响。利用SolidWorks 2019软件建立基于环隙引射原理的高速气流导种装置三维模型，导入Fluent 2022软件对导种装置的气流场进行仿真分析。以环隙出口平均速度、进气管入口、取种弯管入口、下出口段出口的气流量为评价指标，采用仿真分析软件分析气流的均匀性和稳定性。单因素试验因素及水平如表1所示。

表1 环隙结构参数单因素仿真试验设计

Table 1 Single-factor simulation design for annular-gap structural parameters

试验阶段 Testing phase	因素 Factor	固定参数/mm Fixed parameter/mm	水平取值/mm				
			1	2	3	4	5
Ⅰ	环隙进口宽度D_5/mm Annular inlet width	D_6=1.2 L=20.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Ⅱ	环隙出口宽度D_6/mm Annular outlet width	D_5=D_5* L=20.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
Ⅲ	环隙长度L/mm Annular length	D_5=D_5* D_6=D_6*	14.0	17.0	20.0	23.0	26.0

注：D_5*和D_6*分别为上一阶段单因素仿真确定的较优值；每个阶段仅改变“因素”，其余结构参数保持固定；水平1～5表示该因素的五个取值等级，不表示试验组合编号。下同。

Note: D_5* and D_6* are the optimal values determined by the single-factor simulation in the previous stage, respectively. In each stage, only the selected “factor” is varied, while the other structural parameters are kept constant. Levels 1-5 indicate the five value levels of the corresponding factor, rather than the numbers of experimental combinations. The same below.

3.2.2 *单因素仿真分析*

根据以上对基于环隙引射原理的高速气流导种装置的结构与工作原理分析，环隙进口宽度D_5、环隙出口宽度D_6、环隙长度L对导种装置的气流场均匀性产生较大的影响。

1）环隙进口宽度对气流场的影响。环隙进口宽度D_5对气流场的影响仿真结果如图5所示，随着环隙进口宽度的不断增大，导种管内气流速度呈上升趋势，气流裹挟能力得到提升；当进口宽度较小时，气流通道狭窄，局部压降显著，造成管内气流速度不足，难以形成稳定高效的输送流场；当环隙进口宽度逐渐增大，气流可沿环隙通道进入出口段，管内气流速度明显提升，种子运动轨迹更加稳定。然而，当环隙进口宽度超过一定临界值后，气流速度进一步增加，因气压释放过快，局部区域存在涡流叠加趋势，易引发流场紊乱。得到环隙进口宽度对各指标的影响分析，如图6所示。因此，确定环隙进口宽度为3～5 mm。

2）环隙出口宽度对气流场（气流均匀性）的影响。环隙出口宽度D_6对气流场的影响分析仿真动压云图如图7所示，随着环隙出口宽度的增大，导种管内气流速度明显上升。在环隙出口宽度较小时，气流通道狭窄，空间流量受限，导致气体通过能力有限，导种管内的气流速度普遍较低，流场较为均匀但缺乏足够的动能，不利于有效裹挟和推动种子向下输送。当环隙出口宽度增至0.8 mm与1.6 mm时，气流释放能力增强，管内形成较高速度的流场，气流贴附管壁向下发展，速度分布相对均匀，有助于形成稳定的输运路径和良好的种子控制效果。进一步增大环隙出口宽度2.0 mm时，管内气流速度进一步提升，局部区域速度超过50 m/s，但由于出口面积过大，气压释放过快，气流难以充分沿圆周扩散，速度分布出现明显不均，环隙出口截面形成速度集中区域，进而在导种管内部诱发局部高速冲击与涡流扰动，影响流场稳定性，降低种子运动轨迹一致性。环隙出口宽度以1.2 mm为宜，故选取0.8、1.2、1.6 mm作为后期正交试验的因素水平，得到环隙出口宽度对各指标的影响分析，如图8所示。因此，选取环隙出口宽度为0.8～1.6 mm。

3）环隙长度对气流场均匀性的影响。环隙长度仿真结果如图9所示。环隙出口平均速度随环隙长度的增加呈先提高后降低的趋势：环隙长度为14 mm时，环隙出口速度最低，23 mm时最高。由气流速度迹线图及环隙截面速度分布可知，环隙长度过短时，通道紧凑，气体在进入环隙后迅速抵达出口，周向扩散不充分，出口处速度分布不均，一侧速度高、另一侧

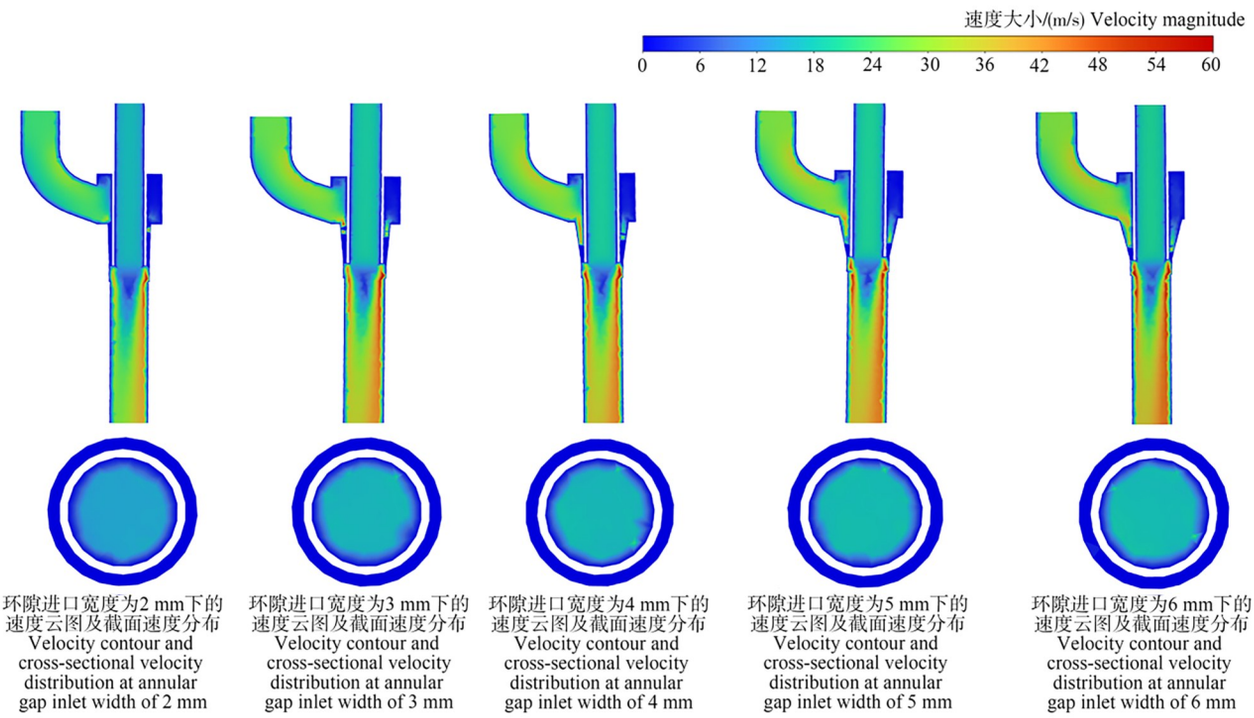


图 5　环隙进口宽度仿真速度云图

Fig. 5　Simulated velocity distribution at the annular gap inlet

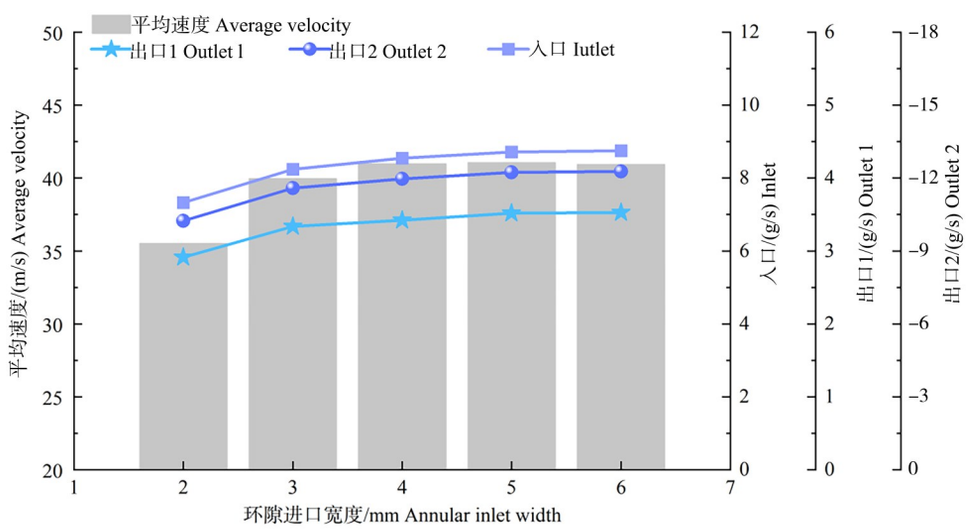


图 6　环隙进口宽度对各指标的影响分析

Fig. 6　Analysis of the influence of annular inlet width on various indicators

较低，流场不稳定，易形成偏流。环隙长度在 17～23 mm 时，气流在环隙内有更充分的扩展与引导空间，速度沿圆周均匀分布，进入导种管时形成较稳定的高速环形流场，速度主轴方向性更强，有助于种子沿中心轴向输送，稳定性显著提升。进一步增大环隙长度至 26 mm 后，速度分布仍维持均匀状态，但由于流阻增大，气流加速空间变长，管内平均气流速度略有下降，流动效率边际提升减弱。得到环隙长度对各指标的影响分析，如图 10 所示。因此，选取环隙长度为 17～23 mm。

3.3　多因素仿真分析

3.3.1　试验方案

在单因素分析的基础上，基于 DEM-CFD 耦合原理进行仿真试验，分析玉米在高速气流导种装置中

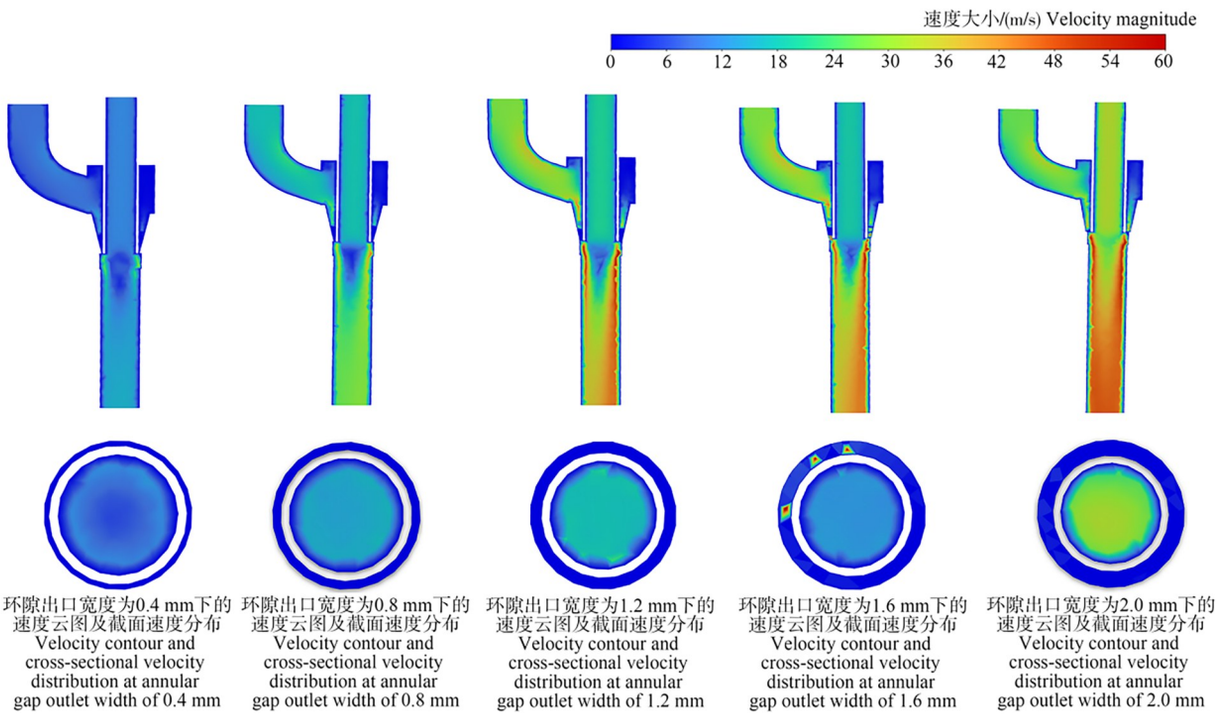


图 7 环隙出口宽度仿真速度云图

Fig. 7 Simulated velocity distribution at the annular gap outlet

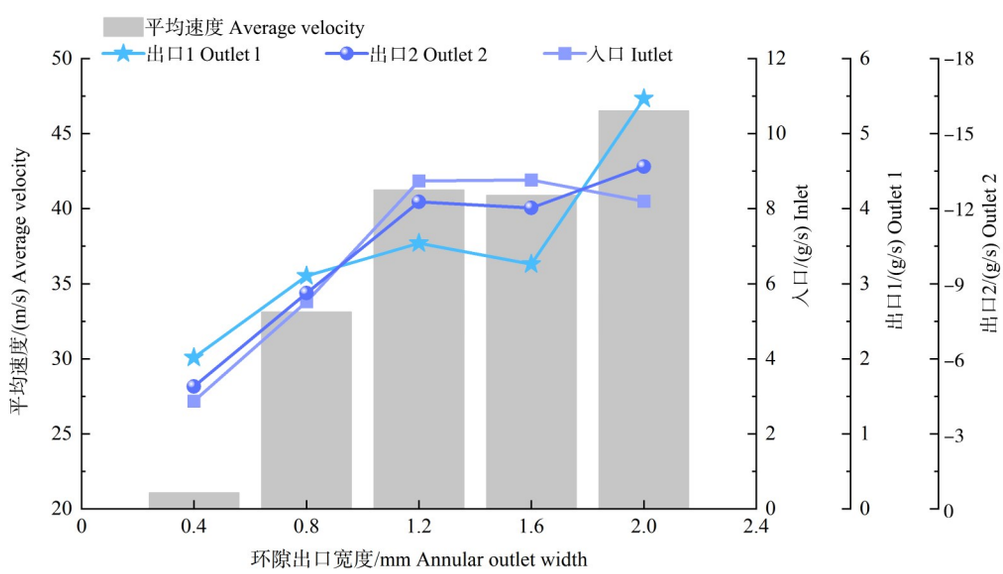


图 8 环隙出口宽度对各指标的影响分析

Fig. 8 Analysis of the influence of annular gap outlet width on various indicators

的加速运移性能。玉米种子经气吸式高速精量排种器卸种进入导种管内，通过耦合仿真模拟导种管内玉米种子的运动过程。为简化仿真复杂性并减少仿真时间，重点研究玉米种子在导种装置内的加速运动性能。本研究所选用的种子为‘郑单 958’品种，将所得模型导入 EDEM 软件中，通过自动填充建立玉米种子的离散元模型，如图 11 所示。

为了确定最适合的参数组合，在理论分析与单因素仿真试验的基础上，选取环隙进口宽度，环隙出口宽度以及环隙长度 3 个因素，采用 Box-Behnken 试验设计原理进行二次正交旋转组合试验，设计的试验因素编码表如表 2 所示。

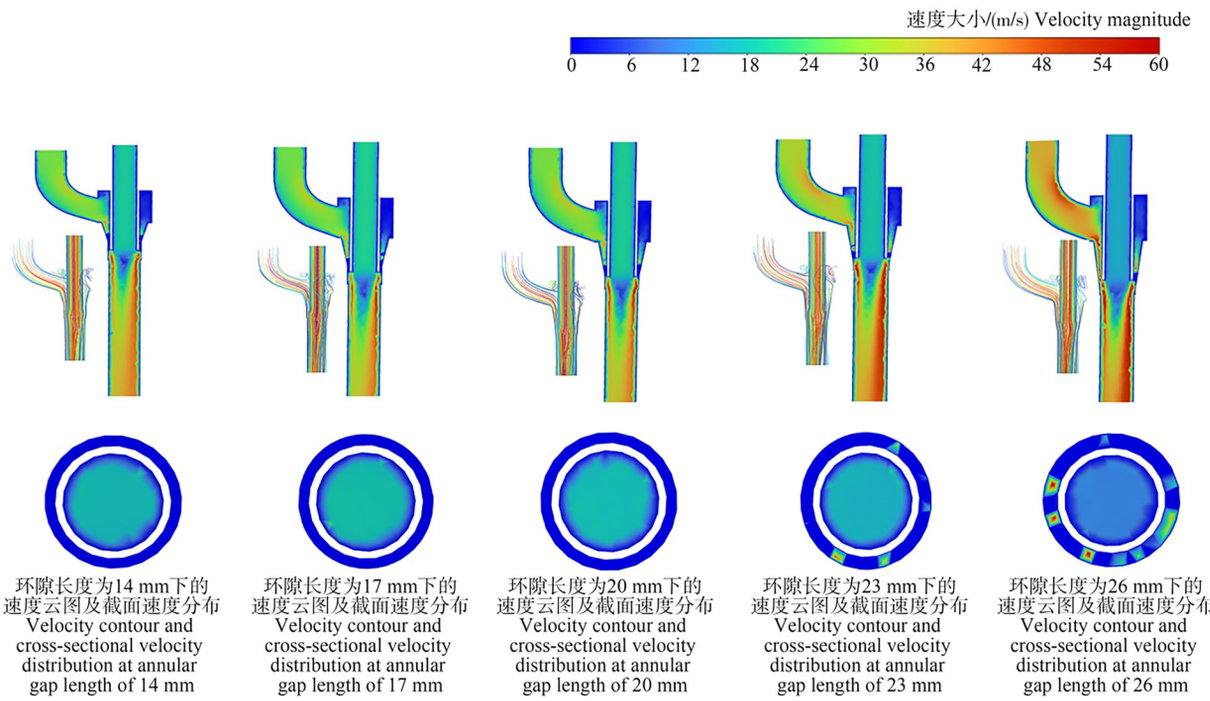


图 9　环隙长度仿真速度云图

Fig. 9　Simulated velocity distribution at different annular gap lengths

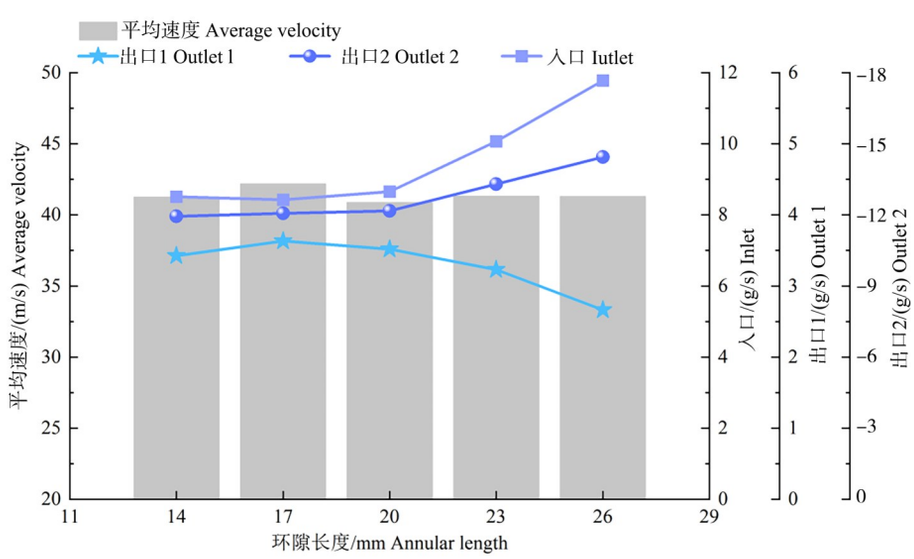


图 10　环隙长度对各指标的影响分析

Fig. 10　Analysis of the influence of annular length on various indicators

导种一致性变异系数是影响播种株距一致性的关键指标。因此，选择导种一致性变异系数 Y 为评价指标，导种装置的加工采用3D打印技术，材料为透明光敏树脂，玉米种子选取‘郑单 958’玉米种子。透明光敏树脂物理特性参数和相关力学特性参数通过查阅相关文献并进行标定[29-30]，该材料表面光洁度高、摩擦系数稳定，对种子运动及碰撞损失的影响可忽略不计，可满足仿真与台架试验的对比验证要求，材料属性及接触参数如表3、表4所示。设置Fluent时间步长为EDEM的整数倍，EDEM时间步长为 2×10^{-6} s、Fluent时间步长为 1×10^{-4} s，设置EDEM中数据保存间隔为每0.01 s保存一次，仿真总时长为1 s，正交试验方案与结果如表5所示。导种一致性变异系数试验方式如图12所示，由

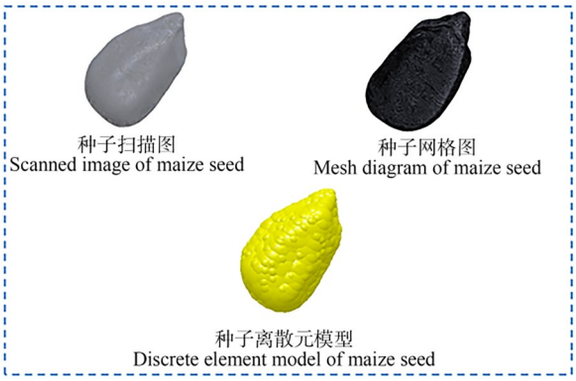


图 11 玉米种子模型

Fig. 11 Maize seed model

表 2 试验编码表

Table 2 Test coding table

水平 Level	因素 Factor		
	环隙进口宽度/mm Annular inlet width	环隙出口宽度/mm Annular outlet width	环隙长度/mm Annular length
1	3.0	0.8	17.0
0	4.0	1.2	20.0
−1	5.0	1.6	23.0

注:表中水平编码1、0、−1分别对应各因素的低水平、中心水平和高水平。

Note: The level codes 1, 0, and −1 in the table correspond to the low level, center level, and high level of each factor, respectively.

表 3 仿真模型材料参数

Table 3 Material parameters of simulation model

参数 Parameter	材料 Material	
	玉米种子 Maize seed	透明光敏树脂 Transparent photosensitive resin
泊松比 Poisson's ratio	0.40	0.35
剪切模量/Pa Shear modulus	1.37×10^{8}	1.77×10^{8}
密度/(kg/m^3) Solids density	1 197	1 200

于DEM-CFD仿真的计算量大且耗时长,因此,颗粒工厂生成100粒玉米种子进行耦合仿真,记录每粒种子从取种口到落种口的时间,重复3次仿真试验并进行统计分析,计算导种时间差变异系数。

3.4 仿真结果分析与回归模型建立

对表5中的试验数据进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,建立导种一致性变异系数 Y 的回归模型,获取玉米高速气流导种装置的最优结构参数组合。

表 4　仿真模型材料接触参数

Table 4　Contact parameters of simulation model materials

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
玉米种子-玉米种子 Maize seed-maize seed	静摩擦因数 Coefficient of Static Friction	0.200 0
	滚动摩擦因数 Coefficient of Rolling Friction	0.078 2
	碰撞恢复系数 Coefficient of Restitution	0.182 0
玉米种子-透明光敏树脂 Maize seed-transparent photosensitive resin	静摩擦因数 Coefficient of Static Friction	0.410 9
	滚动摩擦因数 Coefficient of Rolling Friction	0.025 0
	碰撞恢复系数 Coefficient of Restitution	0.156 6

表 5　试验方案与结果

Table 5　Test scheme and results

序号 Serial number	环隙进口宽度 D_5/mm Annular inlet width	环隙出口宽度 D_6/mm Annular outlet width	环隙长度 L/mm Annular length	导种时间差变异系数 Y/% Represents the coefficient of variation of seed guiding time difference
1	1	1	0	12.98
2	0	0	0	9.05
3	0	0	0	8.83
4	1	0	−1	11.96
5	0	1	−1	10.72
6	1	0	1	11.64
7	−1	0	1	9.71
8	0	0	0	8.90
9	−1	1	0	10.97
10	1	−1	0	11.01
11	0	0	0	8.65
12	0	−1	1	9.32
13	−1	−1	0	10.33
14	0	1	1	11.41
15	−1	0	−1	10.62
16	0	0	0	8.61
17	0	−1	−1	11.51

注：D_5为环隙进口宽度、D_6为环隙出口宽度、L为环隙长度、Y为导种时间差变异系数。下同。

Note: D_5 annular inlet width, D_6 annular outlet width, L annular length, Y represents the coefficient of variation of seed guiding time difference. The same below.

3.4.1　导种一致性变异系数

在试验基础上，使用Design-Expert13.0软件对试验结果进行多元回归拟合分析，得出导种一致性变异系数Y的回归方程为：

$$\begin{aligned}Y = {} & 8.81 - 0.745D_5 - 0.488\,7D_6 + \\ & 0.341\,2L + 0.332\,5D_5D_6 + \\ & 0.147\,5D_5L + 0.72D_6L + \\ & 1.38D_5^2 + 1.14D_6^2 + \\ & 0.796L^2\end{aligned} \tag{6}$$

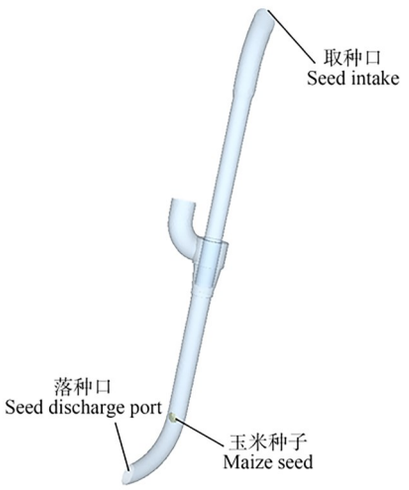


图 12 导种一致性变异系数定义

Fig. 12 Definition of coefficient of variation of seed guiding uniformity

导种时间差变异系数回归模型方差分析如表 6 所示，导种一致性变异系数回归模型的 $P<0.01$，表示该模型极显著，其模型的失拟项的 $P>0.05$（$P=0.181\ 5$），表示该模型的失拟项不显著。从各系数项的 P 值可以看出，模型中的环隙进口宽度、环隙出口宽度、环隙长度、环隙出口宽度与环隙长度的交互作用对导种一致性变异系数有极显著的影响，环隙进口宽度与环隙出口宽度的交互作用对导种一致性变异系数的影响显著，其余各项不显著。各因素对试验指标的主次影响顺序为环隙进口宽度、环隙出口宽度和环隙长度。回归模型中各项的 F 值表示导种一致性变异系数受到各因素影响的强弱，F 值越大，影响程度越强。

3.4.2 导种一致性变异系数响应面的因素交互作用分析

响应曲面形状越陡峭，对导种一致性变异系数的影响越大，从图 13 可看出在试验范围内导种一致性变异系数受环隙出口宽度的影响较大。由响应面图可知，导种一致性变异系数 Y 随环隙进口宽度 D_5 的增大先减小后增大，随环隙出口宽度 D_6 的增大

表 6 导种一致性变异系数回归模型方差分析

Table 6 Analysis of variance for regression model of coefficient of variation of seed guiding uniformity

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	27.760 0	9	54.34	<0.000 1
D_5	4.440 0	1	78.22	<0.000 1
D_6	1.910 0	1	33.67	0.000 7
L	0.931 6	1	16.41	0.004 9
D_5D_6	0.442 2	1	7.79	0.026 9
D_5L	0.087 0	1	1.53	0.255 6
D_6L	2.070 0	1	36.53	0.000 5
D_5D_5	8.000 0	1	140.95	<0.000 1
D_6D_6	5.430 0	1	95.72	<0.000 1
$L*L$	2.670 0	1	47.00	0.000 2
残差 Residual	0.397 4	7		
失拟项 Lack of fit	0.265 7	3	2.69	0.181 5
误差 Pure error	0.131 7	4		
总和 Total	28.160 0	16		
决定系数 Coefficient of determination		$R^2=0.985\ 9$		

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

Note: $P<0.01$ indicates a highly significant effect and $0.01\leqslant P<0.05$ indicates a significant effect.

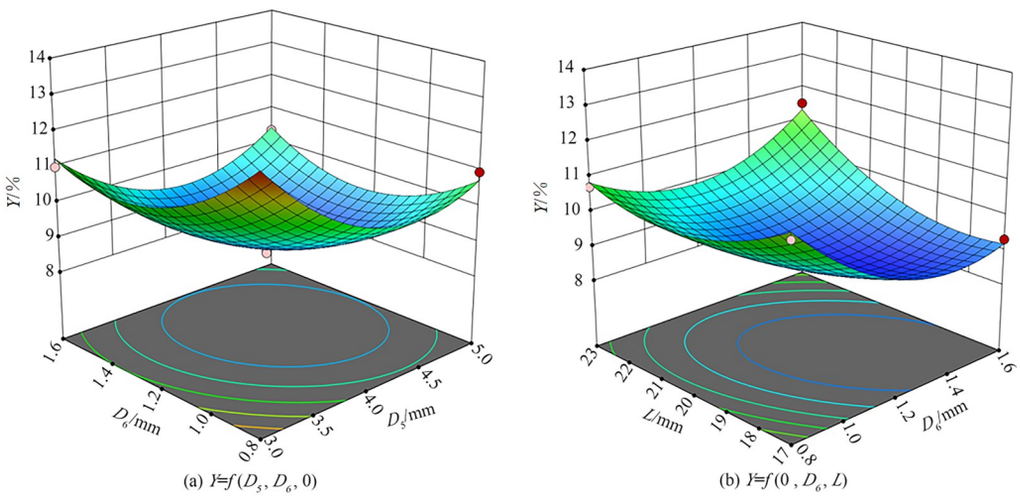


图 13　各因素交互作用对导种一致性变异系数的等高线和响应面图

Fig. 13　Contour and response surface plots of the interaction effects of factors on the coefficient of variation of seed delivery uniformity

先减小后增大，随环隙长度L的增大先减小后增大；可知，环隙进口宽度、环隙出口宽度、环隙长度的增大，气固两相流通畅性增强，气流扰动减弱，种子随气流呈均匀线性分布，导种一致性变异系数降低，当环隙尺寸过大时，通道过宽导致局部气速下降、气固分离增强，部分种子脱离主气流通道而发生沉积或紊乱，导致不一致现象加剧。

3.5　响应面优化

为了优化高速气流导种装置的参数组合，以导种一致性变异系数最小为优化目标，对环隙进口宽度、环隙出口宽度、环隙长度进行多目标优化求解，最终的目标函数与约束条件如式(7)所示：

$$\begin{cases} \min\ Y(D_5, D_6, L) \\ s.t. \begin{cases} 3\ \text{mm} \leqslant D_5 \leqslant 5\ \text{mm} \\ 0.8\ \text{mm} \leqslant D_6 \leqslant 1.6\ \text{mm} \\ 17\ \text{mm} \leqslant L \leqslant 23\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{7}$$

采用 Design-Expert 13.0 软件求解的最优参数组合为环隙进口宽度为 4.16 mm，环隙出口宽度为 1.34 mm，环隙长度 19.17 mm，导种一致性变异系数为 8.60%。结合单因素试验与正交试验结果，环隙出口宽度为 1.2 mm 左右时是单因素最好的环隙结构；在正交试验中，序号 16 的仿真效果最好，且导种一致性变异系数最小，因此选择的因素为环隙进口宽度 4 mm，环隙出口宽度为 1.2 mm，环隙长度 20 mm，作为后期导种装置试制的参数。

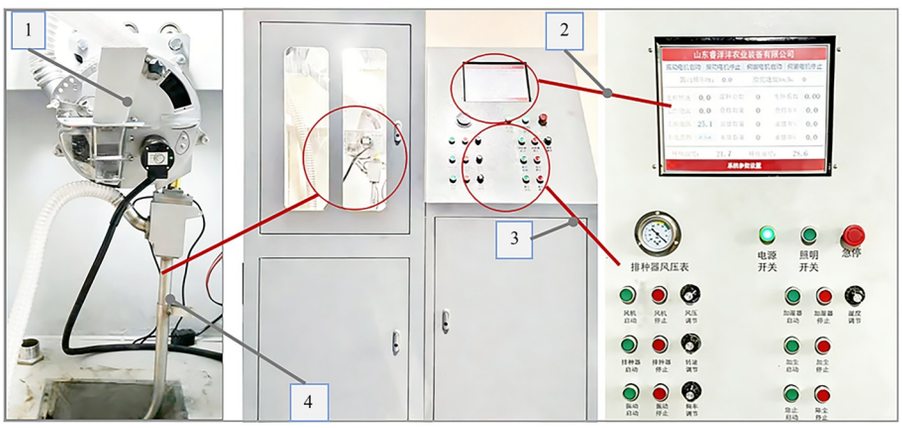
4　台架试验

4.1　试验设备与材料

试验地点为山东睿泽沣农业装备有限公司的排种性能试验室，试验材料为‘郑单 958’玉米种子，通过人工筛选处理保证试验种子形状均匀且无损伤，开展台架试验。自制试验台架主要包括自研的气吸式精量排种器（种盘直径 235 mm、型孔数 35 个）、玉米高速气流导种装置、排种性能监测面板、试验操控台等。将气吸式精量排种器安装在试验台架上，排种器下方装有玉米高速气流导种装置，如图 14 所示。本次台架试验，进气压力作为固定工况参数，根据前期预试验结果，设置为 5 kPa 并保持恒定，以保证不同环隙结构参数下试验条件的一致性，突出结构参数对导种性能的影响规律。所有工况参数均依据田间实际作业条件设定，保证台架试验与田间试验数据规律一致，提升试验整体严谨性与可靠性。

4.2　速度适应性试验

为验证最优参数组合下的高速气流导种装置对作业速度的适应性，开展作业速度适应性台架试验，以合格率、漏播率及株距变异系数为评价指标，参照 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》[31]实施，每组试验重复 3 次，取平均值作为试验结果。选择环隙进口宽度为 4 mm，环隙出口宽度为 1.2 mm，环隙长度为 20 mm 作为导种装置试制



1. 气吸式精量排种器;2. 排种性能监测面板;3. 试验操控台;4. 玉米高速气流导种装置

1. Pneumatic precision seed-metering device; 2. Seed metering performance monitoring panel; 3. Test control console; 4. High-speed airflow seed guiding device for maize

图 14 台架试验

Fig. 14 Bench test

的参数,验证不同作业速度下的导种性能,作业速度适应性试验结果如表 7 所示。

作业速度适应性试验结果表明:当作业速度≤14 km/h 时,最优参数组合下的高速气流导种装置的合格率均在 95.9% 以上,漏播率在 1.8% 以下,株距变异系数在 14.7% 以下,高速气流导种装置对作业速度具有较好的适应性。

4.3 品种适应性试验

为验证优化后高速气流导种装置对不同玉米品种的适应性,选取应用较广的玉米品种开展适应性试验。试验采用与前期一致的台架试验方法,以合格率、漏播率和株距变异系数为评价指标,检验高速气流导种装置对不同品种种子的适配能力,品种适应性试验结果如表 8 所示。品种适应性试验结果可知:在作业速度 8~16 km/h 时,'先玉 335'、'良玉 99'和'郑单 958'玉米种子的合格率均大于 95.7%,漏播率均小于 2.2%,株距变异系数均小于 15.9%,同样满足精量播种要求。这表明,针对不同品种的玉米种子,优化后的高速气流导种装置仍能保持良好的导种效果,装置对不同品种种子具有良好的适应性。

表 7 作业速度适应性试验结果

Table 7 Results of operation speed adaptability test

作业速度/(km/h) Working speed	合格率/% Qualification rate	漏播率/% Miss-seeding rate	株距变异系数/% Plant spacing variation coefficient
8	98.1	0.7	11.1
10	97.2	1.2	12.6
12	96.6	1.5	13.5
14	95.9	1.8	14.7
16	94.8	2.5	15.3

5 田间试验

5.1 试验设备及方法

为了进一步验证玉米高速气流导种装置的田间作业性能,于 2025 年 6 月 26 日在山东省青岛市胶南进行玉米播种试验。试验材料为台架试验选用的'郑单 958'玉米种子,玉米播种单体由河北农哈哈机械集团有限公司研制,如图 15 所示。机具型号为 2BYFSF-6C 玉米免耕施肥精播机,外形尺寸为 1 700 mm×3 300 mm×1 260 mm,整机重量为 1 200 kg,配套动力为 73.5~110.3 kW,行距为 0.6 m,可播种 6 行,试验田长 60 m,宽 20 m。本研究配套的高速气流导种装置工作风压约为 5 000 Pa,单台风机风量为 1.5 m^3/min,经计算风机

表 8　品种适应性试验结果

Table 8　Results of variety adaptability test

品种 Variety	作业速度/(km/h) Working speed	合格率/% Qualification rate	漏播率/% Miss-seeding rate	株距变异系数/% Plant spacing variation coefficient
先玉 335 Xianyu 335	8	98.1	0.8	10.8
	10	97.8	1.4	11.9
	12	97.3	1.6	13.5
	14	96.9	1.8	14.3
	16	96.4	2.1	15.3
良玉 99 Liangyu 99	8	98.0	0.9	11.1
	10	97.4	1.2	11.7
	12	97.8	1.8	12.8
	14	97.3	2.0	14.3
	16	96.1	2.2	15.9
郑单 958 Zhengdan 958	8	97.9	0.8	11.3
	10	97.5	1.1	11.8
	12	97.2	1.5	12.3
	14	96.5	1.7	13.7
	16	95.7	1.9	15.6



(a) 试验机具
(a) Testing equipment

(b) 高速气流导种装置及安装位置
(b) High-speed airflow seed delivery device and installation position

图 15　田间试验

Fig. 15　Field test

轴功率约为 0.22 kW，考虑安全系数后，整机附加功耗不超过 0.5 kW，仅占拖拉机动力输出的 0.4%～0.7%，对整机动力消耗影响极小，在常规农用拖拉机的动力裕度范围内。以最优参数组合进行试验。试验数据统计参照 GB/T6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》[31]，每组试验重复 3 次，取平均值作为试验结果。

5.2　试验结果

田间试验结果如表 9 所示。田间实际播种作业中，当作业速度 8～14 km/h 时，高速气流导种装置的合格率为 95.2%～97.5%，漏播率为 0.9%～2.4%，株距变异系数为 14.5%～21.9%；重力式导种装置的合格率为 92.4%～96.9%，漏播率为 1.8%～4.8%，株距变异系数为 18.1%～26.1%。

随作业速度提升，2种装置的播种性能均呈下降趋势，但高速气流导种装置在高速工况下仍保持较好的播种均匀性，而重力式导种装置播种均匀性较差，高速工况下种子投种轨迹易紊乱，株距分布离散程度更高。对比可知，在相同作业速度下，高速气流导种装置的合格率更高、漏播率更低、株距变异系数更小，各项指标均优于重力式导种装置。试验表明，在玉米播种农艺要求及播种机正常工作速度区间内，玉米高速气流导种装置田间工作稳定、试验结果可靠。

表9 田间试验结果

Table 9 Results of field test

作业速度/（km/h） Working speed	高速气流导种装置 High-speed airflow seed guiding device			重力式导种装置 Gravity-type seed guiding device		
	合格率/% Qualification rate	漏播率/% Miss-seeding rate	株距变异系数/% Plant spacing variation coefficient	合格率/% Qualification rate	漏播率/% Miss-seeding rate	株距变异系数/% Plant spacing variation coefficient
8	97.5	0.9	14.5	96.9	1.8	18.1
10	97.1	1.5	16.5	96.3	2.7	21.4
12	96.1	1.9	19.4	95.2	4.2	25.4
14	95.2	2.4	21.9	92.4	4.8	26.1

6 结 论

1）为实现平稳有序输种，设计了玉米高速气流导种装置，在不破坏种子原有运移轨迹的前提下，通过环隙结构向导种装置引入辅助气流。对高速气流导种装置中气流场和种子运移过程进行了理论分析，确定环隙出口宽度、环隙进口宽度、环隙长度为影响种子运移状态的关键参数。

2）合理的气流场分布是实现稳定投种的基础，通过单因素流场仿真揭示了环隙关键参数对流场的影响机制，确定环隙进口宽度、环隙出口宽度和环隙长度的较优参数范围为3～5 mm、0.8～1.6 mm、17～23 mm。为进一步确定最优参数组合，在气固耦合仿真的基础上进行了多因素回归分析，明确了关键结构因素对指标的交互影响规律，优化后得到最优参数组合：环隙进口宽度为4 mm，环隙出口宽度为1.2 mm，环隙长度为20 mm。

3）对优化后的玉米高速气流导种装置进行了台架试验。选取优化后的高速气流导种装置环隙结构为试验因素，开展环隙结构对不同作业速度的适应性试验，试验结果表明：当作业速度≤14 km/h时，最优参数组合下的高速气流导种装置的合格率均在95.9%以上，漏播率在1.8%以下，株距变异系数在14.7%以下，高速气流导种装置的环隙结构对作业速度具有较好的适应性。

4）以河北农哈哈播种单体开展田间试验。结果表明，在作业速度为8～14 km/h时，高速气流导种装置的合格率在95.2%～97.5%，漏播率在0.9%～2.4%，株距变异系数在14.5%～21.9%；重力式导种装置的合格率在92.4%～96.9%，漏播率在1.8%～4.8%，株距变异系数在18.1%～26.1%，高速气流导种装置在各项性能指标上均优于重力式导种装置。结合现有同类气力导种装置相关研究文献分析，该装置摒弃传统单侧气流弹射输种方案，依托环隙引射原理构建周向均匀环绕气流场，从流场作用机制层面改善种子输送稳定性。

参考文献 References

[1] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2018
Tang H. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[2] 李衍军，刘瑞，刘春晓，刘立晶. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：54-61，133
Li Y J, Liu R, Liu C X, Liu L J. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumatic seed metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 54-61, 133 (in Chinese)

[3] 王龙宝，杨翰瑜，王庆杰，卢彩云，王超，何进．小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]．农业机械学报，2024，55(6)：111-120
Wang L B，Yang H Y，Wang Q J，Lu C Y，Wang C，He J. Design and experiment of an air-assisted linear seeding device for wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2024，55(6)：111-120 (in Chinese)

[4] 姜萌，刘彩玲，魏丹，都鑫，蔡培原，宋建农．小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]．农业机械学报，2019，50(11)：53-62
Jiang M，Liu C L，Wei D，Du X，Cai P Y，Song J N. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2019，50(11)：53-62 (in Chinese)

[5] 雷小龙，廖宜涛，张闻宇，李姗姗，王都，廖庆喜．油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]．农业机械学报，2017，48(3)：57-68
Lei X L，Liao Y T，Zhang W Y，Li S S，Wang D，Liao Q X. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2017，48(3)：57-68 (in Chinese)

[6] 许瑾．玉米免耕播种机环形气吹辅助导种装置设计与试验[D]．合肥：安徽农业大学，2022
Xu J. Design and test of annular air blowing auxiliary seed guiding device for maize no-till planter[D]. Hefei：Anhui Agricultural University，2022 (in Chinese)

[7] 杨文彩，张效伟，仲广远，郑嘉鑫，蒲望，马永敢．三七育苗播种机导种管设计与试验[J]．华南农业大学学报，2022，43(1)：120-132
Yang W C，Zhang X W，Zhong G Y，Zheng J X，Pu W，Ma Y G. Design and experiment of seed tube of seedling planter for *Panax notoginseng*[J]. *Journal of South China Agricultural University*，2022，43(1)：120-132 (in Chinese)

[8] 王宪良，雷云帆，魏忠彩，程修沛，姬江涛，李慧，耿端阳，张祥彩．交错螺旋槽轮式小麦精量集排器设计与试验[J]．农业工程学报，2025，41(14)：51-60
Wang X L，Lei Y F，Wei Z C，Cheng X P，Ji J T，Li H，Geng D Y，Zhang X C. Design and experiment of the staggered helical groove wheel precision centralized wheat metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2025，41(14)：51-60 (in Chinese)

[9] 孙文胜，衣淑娟，齐海龙，王淞，李衣菲，戴智博．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 W S，Yi S J，Qi H L，Wang S，Li Y F，Dai Z B. 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)

[10] Gao X J，Xie G F，Li J，Shi G S，Lai Q H，Huang Y X. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed metering device for maize[J]. *Biosystems Engineering*，2023，227：161-181

[11] Precision Planting. Speed Tube seed delivery system[EB/OL].[2026-03-02]. https://www.precisionplanting.com/products/speedtube/

[12] Kinze. Brush wheel belt seed meter delivery system[EB/OL].[2026-04-02]. https://www.kinze.com/products/precision-seed-meters/

[13] John Deere. Belt-type seed delivery deviceseed guiding device with brush wheel pickup [EB/OL]. [2026-04-02]. https://www.deere.com/en/agricultural-equipment/seeding/planter-components/

[14] Vaderstad Group. Tempo planter[EB/OL].[2026-04-25]. https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/

[15] KVERNELAND. A-DRILL [EB/OL]. [2026-04-25]. https://ien.kverneland.com/Seeding-Equipment/other-seed-drills/kverneland-a-d-drill

[16] Horsch. Pneumatic metering system ensures precise seed rate and optimum seed distribution across the working width of the pneumatic seed drill [EB/OL].[2026-04-25]. https://www.horsch.com/en/products/single-grain-seed-drills/maestro/airvac-and-airspeed-metering-devices

[17] 陈学庚，钟陆明．气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]．农业工程学报，2012，28(22)：8-15
Chen X G，Zhong L M. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2012，28(22)：8-15 (in Chinese)

[18] 王超，李洪文，何进，王庆杰，卢彩云，王景旭．稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]．农业机械学报，2020，51(5)：43-53
Wang C，Li H W，He J，Wang Q J，Lu C Y，Wang J X. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2020，51(5)：43-53 (in Chinese)

[19] 刘瑞，刘云强，刘忠军，刘立晶．玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]．农业机械学报，2023，54(7)：156-166
Liu R，Liu Y Q，Liu Z J，Liu L J. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of maize high-speed precision planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2023，54(7)：156-166 (in Chinese)

[20] Tang H，Xu F D，Xu C S，Zhao J L，Wang Y J. 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

[21] 高筱钧，徐杨，杨丽，张东兴，李玉环，崔涛．基于DEM-CFD耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]．农业机械学报，2018，49(S1)：92-100
Gao X J，Xu Y，Yang L，Zhang D X，Li Y H，Cui T. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2018，49(S1)：92-100 (in Chinese)

[22] 韩丹丹，张东兴，杨丽，李克鸿，张天亮，王云霞，崔涛．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 D D，Zhang D X，Yang L，Li K H，Zhang T L，Wang Y X，Cui T. EDEM-CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2017，33(13)：23-31 (in Chinese)

[23] Martin C L，Bouvard D，Shima S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the Discrete Element Method[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*，2003，51(4)：667-693

[24] Lu M，McDowell G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. *Granular Matter*，2006，9(1)：69-80

[25] 耿端阳，孙延成，王振伟，王建凤，崔亦鹏，于琦明，康云友．玉米播种机播种质量影响因素分析与试验[J]．农业工程学报，2025，41(7)：56-63
Geng D Y，Sun Y C，Wang Z W，Wang J F，Cui Y P，Yu Q M，Kang Y Y. Analysis and experiment of the factors affecting the sowing quality of maize sowing machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2025，41(7)：56-63 (in Chinese)

[26] 衣淑娟，张淯朋，戴智博，孔冷童，孙文胜，许磊．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 S J，Zhang Y P，Dai Z B，Kong L T，Sun W S，Xu L. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize delta-row high-speed precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2025，56(2)：261-274 (in Chinese)

[27] 李玉环，李贤，杨丽，刘尊民，李宝刚，杨发展，宋泉，颜世斌．基于弯管负压取种的高速气流导种装置研制[J]．农业工程学报，2025，41(16)：46-54

Li Y H, Li X, Yang L, Liu Z M, Li B G, Yang F Z, Song Q, Yan S B. Development of a high-speed air flow seed guide device based on negative pressure seed-suction bend tube technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(16): 46-54 (in Chinese)

[28] 姜萌. 小麦精量播种关键技术及播施量检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2022.
Jiang M. Research on Key Technology of Wheat Precise Planting and Detection Method of Sowing-Fertilizing Amount [D]. Beijing: China Agricultural University, 2022 (in Chinese)

[29] 张思豪. 气流辅助导种条件下的种子高速稳定运移机理及部件研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
Zhang S H. Study on the mechanism and components of high-speed and stable seed transportation under airflow-assisted seed guiding conditions[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2024 (in Chinese)

[30] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 崔涛, 史嵩, 李克鸿, 杨丽. 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 Y X, Liang Z J, Zhang D X, Cui T, Shi S, Li K H, Yang L. Calibration method of contact characteristic parameters for maize seeds based on EDEM [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 36-42 (in Chinese)

[31] GB/T 6973—2005. 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
GB/T 6973—2005. Testing methods of single seed drills(precision drills)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006 (in Chinese)

责任编辑: 梁芷健



第一作者简介: 李玉环,博士,副教授,硕士生导师。主要从事机械设计制造及其自动化、智能农机装备领域的研究与教学工作。主持国家重大专项子课题、山东省自然科学基金青年项目等各类项目多项,参与国家级科研项目数项;在国内外重要期刊及会议发表论文及申请专利累计50余篇/项,研制的高速智能播种机与精量排种器获多项行业认可与媒体报道;担任多个权威期刊审稿人。



通讯作者简介: 谢锐,博士,副研究员。主要从事作物耕作栽培与配套农机装备领域的研究工作。先后主持和参加国家自然科学基金、国家重点研发计划、内蒙古自然基金、内蒙古自治区科技计划等国家、省部级项目15项;获内蒙古自治区科技进步奖特等奖1项,内蒙古自治区农牧业丰收奖二等奖2项;发表论文26篇,参编著作6部;制定地方标准23项,授权专利28件,登记软件著作权16项。