

玉米播种机高速射流导种装置设计与试验

林东洪¹ 冯锦涛^{1,2} 刘立晶^{1,2} 刘忠军^{1,2} 王春雷^{1,3} 刘冲¹

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;

2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083; 3. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

摘要: 玉米高速播种已成为当前玉米播种的发展趋势, 针对高速作业条件下, 传统重力式导种装置存在明显局限性, 种子与导种管之间的碰撞加剧, 导致播种均匀性下降、甚至发生重播和漏播问题, 本文设计一种可应用于播种机高速作业的射流导种装置。通过对种子导种全过程的运动分析, 确定该装置的主要结构与参数。运用 DEM - CFD 耦合仿真技术, 模拟种子在气流裹挟下的导种过程, 并对设计参数进行优化。利用排种器性能试验台验证高速射流导种装置性能。台架试验结果表明: 作业速度为 12 km/h、株距为 25 cm、气流速度 80 m/s 时, 粒距合格率达到 93.2%, 粒距变异系数不高于 14.72%。与重力式导种装置相比, 高速射流导种装置在高速作业条件下具有更好的播种性能, 粒距合格率提高 8.1 个百分点, 粒距变异系数降低 6.48 个百分点。田间试验结果表明: 该高速射流导种装置可适配 12.37 km/h 及以下中高速播种作业, 能够满足玉米高速精密播种的作业要求。

关键词: 玉米播种机; 种子运动分析; DEM - CFD 耦合; 高速射流导种装置

中图分类号: S233.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)21-0190-13

OSID:



Design and Experiment of High-speed Jet Seed Guide Device for Corn Seeder

Lin Donghong¹ Feng Jintao^{1,2} Liu Lijing^{1,2} Liu Zhongjun^{1,2} Wang Chunlei^{1,3} Liu Chong¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: High-speed corn seeding has become the current trend in corn planting. Under high-speed operation conditions, the traditional gravity-based seed guiding device has obvious limitations. The collision between the seeds and the seed guiding tube intensifies, resulting in decreased seeding uniformity and even re-seeding and missed seeding phenomena, which have adverse effects on crop yield. To address these challenges, a jet seed guiding device that can be applied to high-speed operation of the seeder was designed. Through kinematic analysis of the entire seed guiding process, the main structure and parameters of the device were determined. Using DEM - CFD coupled simulation technology, the seed guiding process under the influence of air flow was simulated, and the design parameters were optimized. This simulation provided a basis for optimizing the key design parameters, thereby improving the stability of seed flow and seeding uniformity. The performance of the high-speed jet seed guiding device was verified by using the seed distributor performance test bench. Compared with the traditional gravity-based seed guiding device, the high-speed jet seed guiding device showed significant improvement in seeding performance under high-speed operation conditions. The results showed that when the operating speed was 12 km/h, the plant spacing was 25 cm, and the air flow speed was greater than 80 m/s, the qualified particle spacing reached 93.2%, and the coefficient of variation of particle spacing was no more than 14.72%. Compared with the gravity-based seed guiding device, the high-speed jet seed guiding device had better seeding performance under high-speed operation conditions, with an increase of 8.1 percentage points in the qualified particle spacing and a reduction of 6.48 percentage

收稿日期: 2025-07-21 修回日期: 2025-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500403-1)和工信部高质量发展项目(2023ZY02009)

作者简介: 林东洪(1999—),男,硕士生,主要从事农业机械装备设计及理论研究,E-mail: linDH1999@126.com

通信作者: 刘忠军(1983—),男,正高级工程师,主要从事种植机械装备研究,E-mail: liuzj655@163.com

points in the coefficient of variation of particle spacing. This device had important practical application value in promoting the high-quality and efficient development of corn seeding operations and provides strong technical support for the advancement of high-speed precision seeding technology. Field test results showed that the high-speed jet seed guiding device was adaptable to medium-and-high-speed seeding operations at or below 12.37 km/h and could satisfy the operational requirements of high-speed precision seeding for corn.

Key words: maize seeding machine; seed movement analysis; DEM – CFD coupling; high speed jet seed guide

0 引言

玉米精密播种技术是根据农艺要求,将定量的玉米种子,按照一定株行距和播种深度将种子投入种沟,并进行适当的覆土镇压。决定玉米播种质量的过程包括单粒种子被排种器从种群分离、导种管顺利捕获种子并实现有序运移以及离开导种管平稳落入种沟^[1-3]。农业生产向规模化和集约化发展的趋势对精密播种技术提出更高要求,即高速精密播种技术。国内外诸多学者已针对精密排种器开展大量深入研究^[4-11],研究成果表明,精密排种器在高速作业条件下(12~16 km/h)能够维持良好的工作性能。然而,与之配合作业的导种技术相关研究却相对匮乏,无法有效实现有序导种,致使播种质量欠佳^[12-15]。

为提高种子离开排种器至投种落地过程中的稳定性。意大利 Maschio 公司采用气流介入导种管,利用气流进行辅助投种,显著提高种子在导种管内的运移速度,同时有效降低种子与管壁之间的碰撞概率^[16]。美国 Precision Planting 公司的 Speed Tube 输送带式导种装置,通过输送带的隔间实现种子单粒有序运移,同时种子随输送带运动至种沟上方,进行低位投种,消除种子在导种过程中的碰撞以及落地弹跳问题^[17]。国内学者同样在提高导种过程稳定性方面进行深入探索。刘瑞等^[18]基于文丘里原理设计一种正压气流辅助投种装置,分析气流辅助输种的性能并实现零速投种,当作业速度为 8~16 km/h、粒距为 20~25 cm 时,合格指数不小于 85.7%。Jia 等^[15]设计一种收敛槽式导种管,基于考虑摩擦的最速降线原理设计导种管曲线,采用离散元方法(DEM)模拟并优化参数,通过台架与田间试验验证优化后的导种管可显著降低种子横向分散范围、角速度及株距变异系数,提升高速作业下的播种均匀性。Tang 等^[19]对气吹排种器导种管进行研究,采用 DEM – CFD 耦合模拟方法对导种管进行优化设计,并分析不同工作压力、工作速度下导种管的性能,通过台架试验验证优化后的导种管能够降低投种变异系数。衣淑娟等^[20]针对玉米品字形播种

机高速作业导种不均、品字形率低的问题,设计正压气流导槽式导种装置,优化得到最优结构参数,田间作业速度 12~16 km/h 时品字形合格指数不低于 85.1%。上述研究为高速导种提供了一定的理论依据,但依然面临气流运输式导种装置内部流场分析不明确,气流强度对投种过程影响研究不足等问题。

重力式导种系统在高速作业工况下受机械振动等因素影响,种子投种时具有不同大小方向的初速度,种子与管壁碰撞加剧,在导种管内滞留时间增加,导致粒距均匀性降低甚至发生重播漏播^[21]。针对种子在导种管内保持单粒有序运移能力差的问题,本研究设计一种高速射流导种装置。该装置通过构建高压区与低压区协同作用的气流场环境,使种子在运移全程被定向气流作用。利用 DEM – CFD 耦合仿真技术,对导种装置进行优化,并结合台架试验,确定最优工作参数。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

高速精密排投种系统由气吸式排种器、高速射流导种装置、高压气泵组成,如图 1 所示。

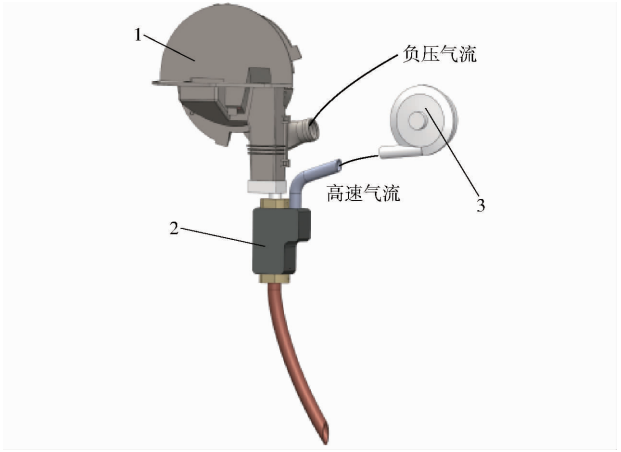


图 1 高速精密排投种系统结构示意图

Fig. 1 High-speed precision seeding system structure diagram

1. 气吸式排种器 2. 高速射流导种装置 3. 高压气泵

高速射流导种装置由定位投种器、过渡接口、进种件、混合件、壳体、气流管道、导种管拼接组成,高

速射流导种装置内部可划分为进气腔、进种腔、锥形环缝、加速腔 4 个区域,如图 2、3 所示。

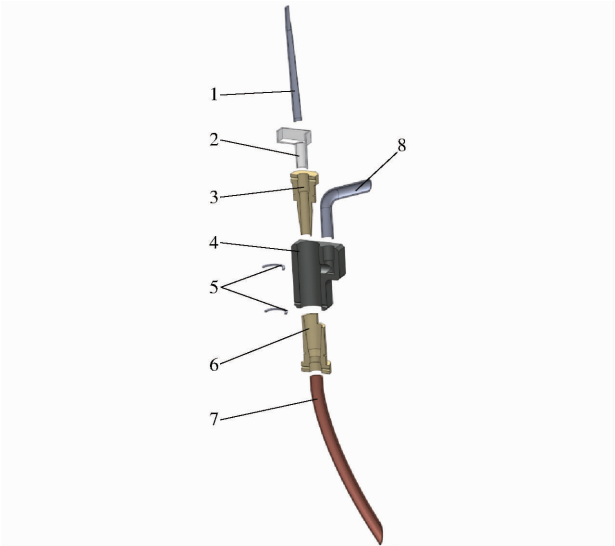


图 2 高速射流导种装置结构图

Fig. 2 Structure of high speed jet seed guide device

1. 定位投种器 2. 过渡接口 3. 进种件 4. 壳体 5. 密封圈
6. 混合物 7. 导种管 8. 气流管道

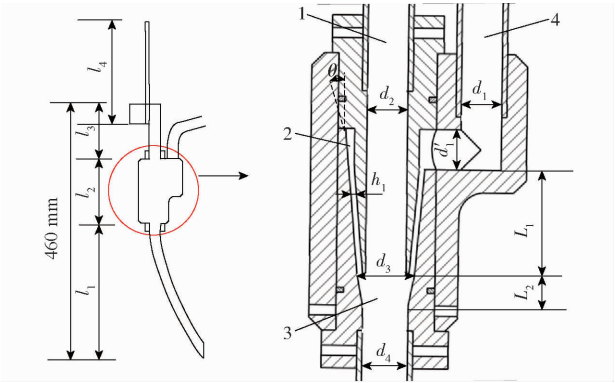


图 3 高速射流导种装置内部示意图

Fig. 3 Internal diagram of high-speed jet seed guide device

1. 进种腔 2. 锥形环缝 3. 加速腔 4. 进气腔

1.2 高速射流导种装置工作原理

将种子投种划分为 5 个过程:重力投种、负压吸种、气流投种、投种出射以及压种(图 4)。种子脱离排种器后,受到定位投种器的约束作用,限制种子水平方向的运动,以接近垂直向下方向进入高速射流导种装置,在重力作用下进行投种。高速气流从气流管道进入,经过锥形环缝形成涡流进入加速腔,高速气流使加速腔气压低于大气压、进种腔气压高于加速腔,气流从进种腔流向加速腔。种子在进种腔受到重力和气流吸附力双重作用下,快速进入加速腔。当种子进入加速腔后,受到气流裹挟作用,在导种管内快速移动至导种管末端,并进行投种出射。由于受到气流加速作用,种子离开导种管时具有较高的速度,落入种沟后,压种轮进行压种,防止种子

发生弹跳。

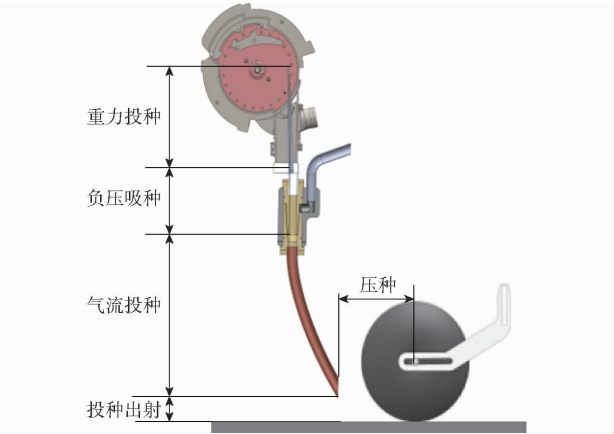


图 4 投种过程示意图

Fig. 4 Schematic of seed sowing process

2 高速射流导种装置关键参数设计

高速射流导种装置关键参数设计主要有进气腔直径 d_1 、进种腔直径 d_2 、锥形环缝宽度 h_1 、环缝长度 L_1 、加速腔长度 L_2 、锥形环缝倾斜角度 θ 、导种管长度 l_1 ,以及定位投种器和过渡接口设计。

2.1 定位投种器和过渡接口设计

在排种作业过程中,种子随排种盘运动至卸种区后脱离。为分析种子脱离排种盘后的运动特性,建立以水平方向为 x 轴、竖直方向为 y 轴的直角坐标系。种子在投种位置受到负压吸力和摩擦力等因素的影响,导致种子无法及时进行投种并跟随排种盘转动,脱离排种盘时会产生额外的水平方向分速度,如图 5 所示,导致种子与导种管壁发生碰撞的概率增加。种子脱离排种盘时瞬时速度为

$$\begin{cases} v_0 = 2\pi nr \\ v_y = v_0 \cos\alpha \\ v_x = v_0 \sin\alpha \\ n = \frac{10\,000v_B}{6LZ} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 v_0 ——种子脱离排种盘的瞬时速度, m/s
 v_y ——种子竖直方向速度, m/s
 v_x ——种子水平方向速度, m/s
 α ——种子投种角度, $(^\circ)$
 n ——排种盘转速, r/min
 v_B ——播种机前进速度, km/h
 L ——理论株距, cm
 Z ——排种盘吸孔个数
 r ——排种盘半径, mm

为解决该问题,设计一种定位投种器和过渡接口,如图 6 所示。定位投种器下端安装于过渡接口,上端与排种盘吸孔相切。定位投种器为厚度 2 mm

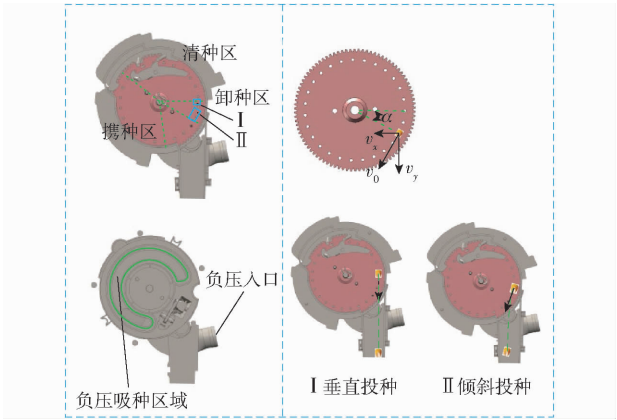


图 5 投种过程分析

Fig. 5 Analysis of seed delivery process

的薄壁结构,其上端为 21 mm × 2 mm 的矩形截面,下端为内径 16 mm、外径 20 mm 的半圆柱形,能够与过渡接口连接,定位投种器逐渐收缩,对种子运动轨迹进行约束。结合导种装置在播种机上的实际安装位置和排种器结构,取定位投种器长度 l_4 为 190 mm。

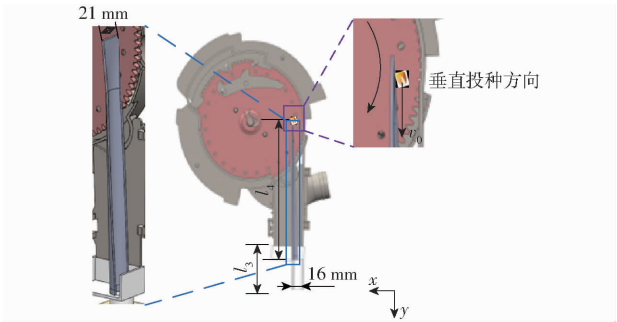


图 6 定位投种器和过渡接口结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of positioning seed feeder and transition interface

种子吸附于排种盘上随排种盘转动,如图 5 所示,若种子在卸种区 I 未进行投种,种子将继续吸附于排种盘上并跟随排种盘转动。当排种盘继续转动时,种子跟随排种盘运动的瞬间,受到定位投种器的约束作用,种子与定位投种器碰撞,种子开始投种,此时排种盘在该位置的线速度方向接近垂直向下,种子运动方向与排种盘线速度方向相同,保证种子能够进行直线投种。

过渡接口和进种件共同构成进种腔,气流在加速腔形成高速低压区,进种腔内产生负压,由于气流吸附力是一个压力梯度力,距离加速腔越远,气流吸附力越小。过长的过渡接口影响种子受到吸附力的作用,综合考虑并结合播种机实际安装需求,设计过渡接口长度 l_3 为 90 mm。

当前定位投种器和过渡接口设计适用于 Precision Planting 气吸式排种器,通过改变定位投种器和过渡接口设计,高速射流导种装置可适配多种类型排种器。

2.2 进种腔

玉米种子的特征尺寸根据品种的不同而存在细微变化,但基本都处在一个微小的范围,为提高导种装置的适用性,根据文献[22],玉米种子的长度 l_z 最大不超过 13 mm,宽度 w_z 最大不超过 10 mm,厚度 t_z 最大不超过 9 mm。

玉米种子当量直径 d_c 计算公式为

$$d_c = \frac{2l_z w_z}{l_z + w_z} \tag{2}$$

为减少种子进入导种装置时,当导种管尺寸过小时,种子与管壁反复碰撞,严重影响种子下落过程,进种腔直径应该满足

$$d_2 \geq 1.4d_c \tag{3}$$

结合式(2)、(3),确定 d_2 取 16 mm。

2.3 进气管道

基于高速射流导种装置的工作原理,流经进气腔的气体流速是影响玉米种子能否被气流有效裹挟并输送的关键因素。为满足装置对高速气流的性能要求,本研究选用最大风量为 75 m³/h 的直流无刷鼓风机作为气源。针对进气腔直径的设计,需结合风机性能参数进行。同时,为保障后续试验能覆盖较宽的气流速度范围,设定进气腔处风速的可调节范围为 0 ~ 100 m/s。

则进气腔直径计算公式为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4Q_z}{3600v\pi}} \tag{4}$$

式中 Q_z ——风机最大风量, m³/h
 v ——气流速度, m/s

由式(4)可知,当气流速度为 100 m/s 时,进气腔直径 $d_1 \approx 16.28$ mm。进气腔直径越小,产生的气流速度就越大,向下取整仍能满足最大气流要求,同时为了便于加工,取 $d_1 = 16$ mm。为减少管道变径产生的气流损耗,设计进气腔管道直径与管道折弯后的管道内径 d'_1 尺寸相同,取 $d'_1 = d_1 = 16$ mm。

2.4 导种管

根据农艺要求,选择玉米播种株距为 25 cm,作业速度范围为 8 ~ 16 km/h 时,测量种子千粒质量为 411.68 g,为简化计算取玉米单粒种子质量为 0.411 g。导种管直径 d_4 计算公式为

$$d_4 = \sqrt{\frac{4\dot{m}_z}{\pi e \rho v_d}} \tag{5}$$

式中 $\dot{m}_z$ ——单位时间内种子运输质量, g/s
 e ——导种管内种子与气流质量比
 ρ ——气流密度, kg/m³
 v_d ——导种管内气流速度, m/s

气流裹挟种子进行投种,气固两相流状态为稀

相流, e 的取值为 $0.1 \sim 1$, 本文取 $0.4^{[23]}$ 。经过计算, 管道直径取值范围为 $15.9 \sim 18.3$ mm, 取 d_4 为 18 mm。

为确保低位投种, 取投种高度离地面 $3 \sim 5$ cm, 综合考虑高速射流导种装置各部分长度, 取导种管长度 $l_1 = 270$ mm。

合理的导种管末端曲线能减少种子在导种管内的碰撞, 本研究采用最速降线进行导种管末端曲线设计, 如图 7 所示, 导种管水平长度由开沟器和排种器的空间位置决定, 取导种管出口平面距离中心线 110 mm。

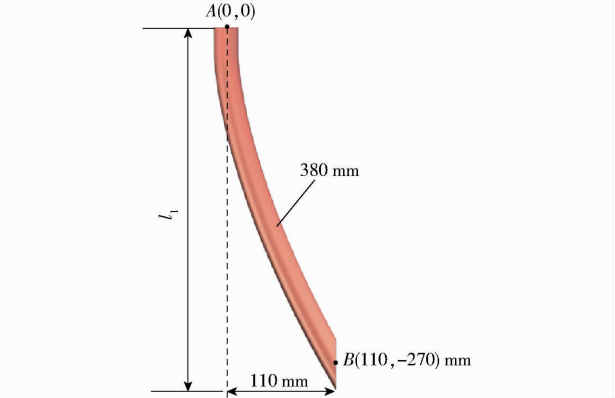


图 7 导种管设计图

Fig. 7 Design drawing of seed guide tube

种子下落过程中减少的势能等于增加的动能, 即

$$v(y) = \sqrt{2gh} \tag{6}$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2

h ——下落高度, m

种子沿曲线下滑所需时间 T 为路径积分, 即

$$T(y) = \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_0^{x_1} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{y}} dx \tag{7}$$

在点 A 处 $y(0) = 0$, 在点 B 处 $y(x_1) = y_1$, 求最速降线即确定种子从点 A 运动到点 B 点时使 T 取最小值。

由于 $T(y)$ 不显含 x , 根据 Beltrami 恒等式简化得

$$F - y' \frac{\sigma F}{\sigma y'} = C \tag{8}$$

式中 F ——变分泛函被积函数

C ——Beltrami 恒等式求解的积分常数

代入 $F = \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2gy}}$, 计算并简化得微分方程

$$y(1+y'^2) = \frac{1}{2gC^2} \tag{9}$$

解微分方程式(9)可得到摆线方程

$$\begin{cases} x = r_1(\theta - \sin\theta) \\ y = r_1(1 - \cos\theta) \end{cases} \tag{10}$$

式中 r_1 ——摆线生成圆的半径

代入起点 $A(0,0)$, 终点 $B(110,-270)$ mm, 解 $\theta \approx 1.22^\circ$, 对应半径 $r \approx 380$ mm。

2.5 关键参数设计

为明确其他关键参数对气流流场和种子运移的影响。固定进气腔直径 d_1 为 16 mm、进种腔直径 d_2 为 16 mm、导种管直径 d_4 为 18 mm 以及气流速度设定为 50 m/s。研究锥形环缝宽度 h_1 、锥形环倾斜角度 θ 、锥形环缝长度 L_1 、加速腔长度 L_2 对气流流场的影响, 以流场混乱程度、气流管道、进种腔气流量进行评价。基于 Fluent 软件进行单因素仿真分析试验^[24-25], 根据前人对环缝结构的研究^[26-27], 各因素取值范围及梯度如表 1 所示。

表 1 关键参数单因素仿真试验因素水平
Tab. 1 Factor levels of single-factor simulation test for key parameters

因素	水平					
	1	2	3	4	5	6
锥形环缝宽度 h_1/mm	1	2	3	4	5	6
锥形环缝倾斜角度 $\theta/(^\circ)$	5	10	15	20	25	30
锥形环缝长度 L_1/mm	15	25	35	45	55	65
加速腔长度 L_2/mm	5	10	15	20	25	30

2.5.1 单因素仿真模型建立

为简化仿真时间, 使用 SpaceClaim 体积抽取功能提取导种装置流场区域, 设置种子进口为 inlet1、气流进口为 inlet2、导种管出口为 outlet1、其余面设置为 wall, 边界条件如下: inlet1 设定为 pressure-inlet、inlet2 设定为 velocity-inlet、outlet1 设定为 pressure-outlet 以及 wall 设定为 wall, 如图 8 所示。

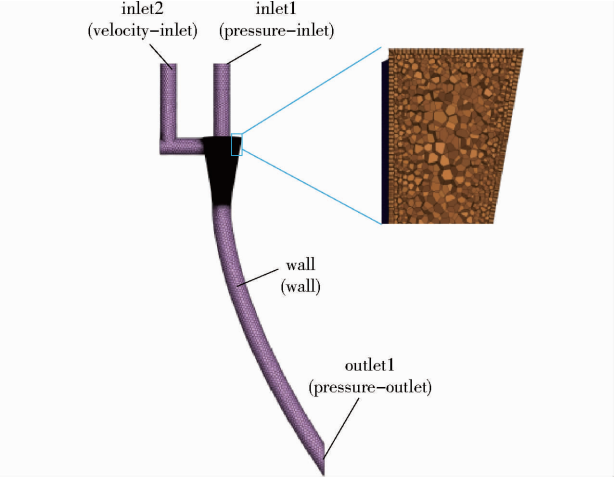


图 8 仿真模型建立及网格划分

Fig. 8 Simulation model establishment and meshing

进行网格无关性验证, 以导种管出口 (outlet1)

气流质量为试验指标,采用 0.01 mm 和 0.005 mm 进行网格划分,0.01 mm 网格划分 outlet1 气流质量为 11.41 g/s,0.005 mm 网格划分 outlet1 气流质量为 11.91 g/s, outlet1 气流质量相对变化量小于 4.19%,因此选取网格尺寸为 0.01 mm,网格划分示意图如图 8 所示。

2.5.2 锥形环缝宽度影响分析

根据锥形环缝宽度单因素试验(图 9),随锥形环缝宽度的增大,进种腔(inlet1)气流流向由向下运动变为向上运动,并且在加速腔区域气流混乱,不利于种子下落。当锥形环缝宽度取 1、2 mm 时,进种室能够产生向下运动的气流,对种子具有吸附作用。因此设定锥形环缝宽度为 1~2 mm。

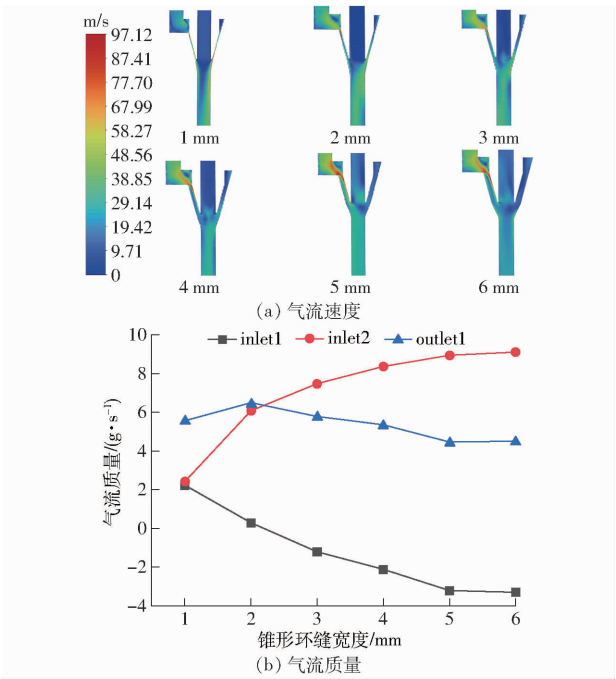


图 9 锥形环缝宽度单因素试验结果

Fig. 9 Single factor results of conical ring seam width

2.5.3 锥形环缝倾斜角度影响分析

根据锥形环缝倾斜角度单因素试验(图 10),随倾斜角度的增大进种腔(inlet1)气流质量逐渐下降,气流管道(inlet2)呈缓慢上升趋势,当倾斜角度大于 15°时,加速腔流场混乱程度加剧,且进种腔(inlet1)气流方向发生改变。倾斜角度越小,加速腔区域内部流场越均匀,倾斜角度为 5°时,流场相对均匀,因此固定倾斜角度为 5°。

2.5.4 锥形环缝长度影响分析

根据锥形环缝长度单因素试验(图 11),随锥形环缝长度的增加,进种腔(inlet1)、气流管道(inlet2)气流质量呈现先缓慢上升后下降的趋势,但锥形环缝长度小于 35 mm 时,锥形环缝气流出现明显的偏斜,当锥形环缝长度大于 35 mm 时,锥形环缝内气

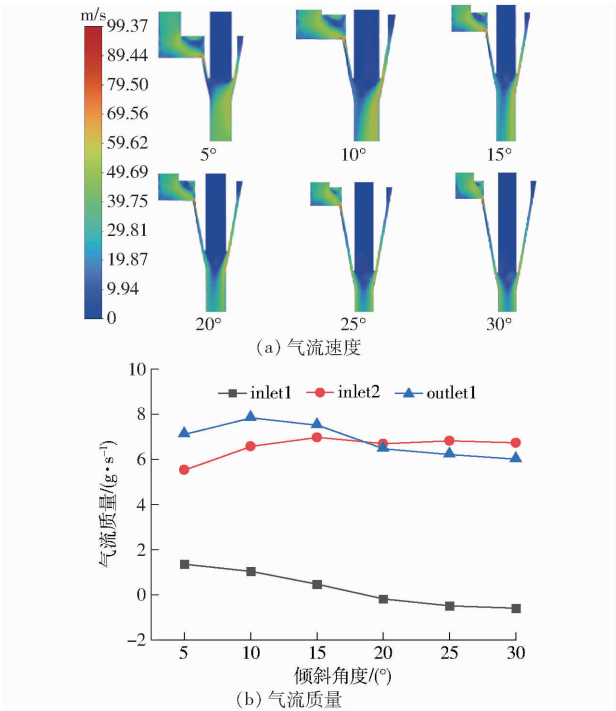


图 10 倾斜角度单因素试验结果

Fig. 10 Single factor results of tilt angle

流流场均匀性逐渐提升,但过长的锥形环缝长度会导致气流与管壁的摩擦损耗增大因此取锥形环缝长度范围为 35~65 mm。

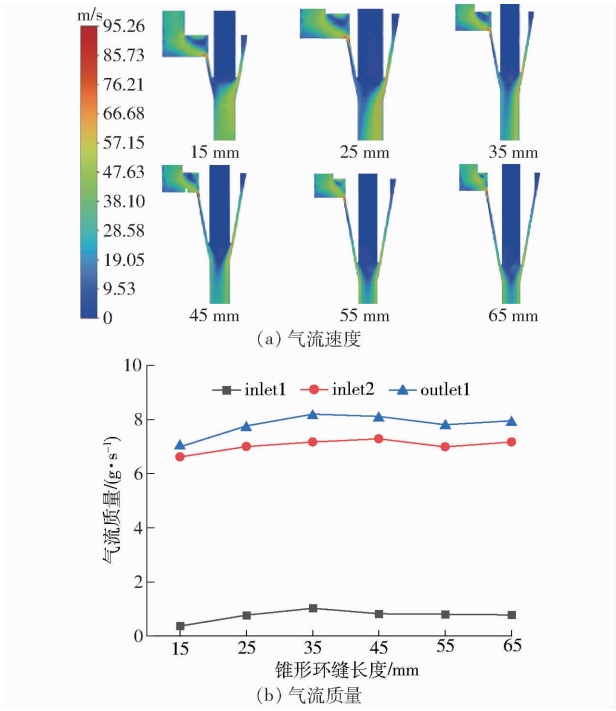


图 11 锥形环缝长度单因素试验结果

Fig. 11 Single factor results of conical ring seam length

2.5.5 加速腔长度影响分析

根据加速腔长度单因素试验(图 12),随加速腔长度的增大,进种腔(inlet1)气流质量呈现缓慢下降趋势、气流管道(inlet2)气流呈现缓慢上升趋势,出

口 (outlet1) 气流质量变化不明显, 根据流场分析图, 随加速腔长度的增加, 气流流场均匀性逐渐下降, 出现一侧气流速度大于另一侧的情况, 加速腔长度过短, 进种室和导种管衔接不顺畅。因此取加速腔长度范围为 5 ~ 15 mm。

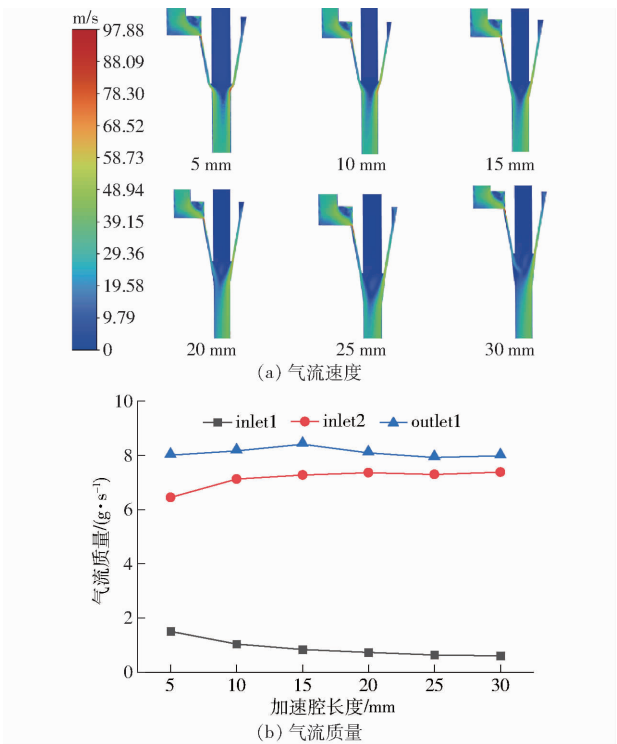


图 12 加速腔长度单因素试验结果

Fig. 12 Single factor results of accelerating cavity length

3 基于 Fluent – Rocky 联合仿真试验

Fluent – Rocky 联合仿真试验能够模拟颗粒在导种装置内的运动过程、投种速度等情况^[28], 其仿真结果能够有效指导农业机械部件的设计并节约大量时间金钱成本。本研究基于 Fluent – Rocky 联合仿真试验, 分析不同结构参数下导种装置内部流场以及气流对玉米种子的运动影响, 并获得流场最为均匀的导种装置结构。试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab. 2 Experimental factors codes mm

编码	试验因素		
	锥形环缝宽度 X_1	锥形环缝长度 X_2	加速腔长度 X_3
1	2.0	65	15
0	1.5	50	10
-1	1.0	35	5

3.1 仿真模型与参数设置

为简化仿真时间, 利用 SpaceClaim 抽取导种装置流场区域, 投种装置划分与 2.5.1 节相同。选择瞬态进行计算, 设置黏性模型为 K – omega 中的 SST 模型, 该模型具有较好的预测能力和适应性, 能够在

复杂条件下有效处理湍流^[29-30]。设置气流进口 inlet1 气流流速为 50 m/s, 种子入口 inlet2、出口 outlet1 压力为 0 Pa, 设置时间步长为 0.001 s, 导出 case 和 cas. h5 文件; 在 rocky 中导入导种装置模型和种子模型, 种子从 inlet2 进入导种装置, 通过计算得出 mass flow rate 为 6.57 g/s。在 CFD Coupling 中导入 cas. h5 文件, 使用 2 – way – Fluent 实现双向耦合, 设置 Fluent outputs Multiplier 为 1, 此时时间间隔为 0.001 s, 与 Fluent 中时间步长保持一致。仿真总时间为 1 s。

导种装置的加工采用 3D 打印技术, 材料为透明光敏树脂, 玉米种子选取德玉 18。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测量^[31-32], 得到参数如表 3 所示。

表 3 Fluent – Rocky 联合仿真物料特性及互作参数
Tab. 3 Fluent – Rocky coupling simulation of material characteristics and interaction parameters

项目	参数	数值
玉米种子	泊松比	0.4
	杨氏模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	4.89×10^7
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 197
透明光敏树脂	泊松比	0.35
	杨氏模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	2.7×10^9
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 200
玉米种子-透明	静摩擦因数	0.410 9
	滚动摩擦因数	0.025
光敏树脂	碰撞恢复系数	0.156 6

3.2 仿真结果分析与优化

3.2.1 仿真结果

根据前期单因素试验, 固定锥形环倾斜角度为 5°, 以锥形环缝宽度、锥形环缝长度、加速腔长度为试验因素, 以投种速度为评价指标, 获取最佳的设计参数组合。更高的投种速度可有效缩短种子在装置内的运移时间, 削弱碰撞对种子运动的影响。仿真试验方案与结果如表 4 所示, 表中 x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

3.2.2 回归模型建立

根据表 4 中的仿真数据, 通过 Design-Expert 13 软件建立投种速度 Y_1 的多元回归模型, 方差分析见表 5。投种速度的回归模型 $P < 0.000 1$, 表明该模型显著, 模型失拟项 $P \geq 0.05$, 失拟项不显著, 无其他因素影响投种速度。其中锥形环缝宽度、加速腔长度对指标影响显著, 锥形环缝长度对指标影响不显著, 除锥形环缝宽度的平方项对指标影响显著, 其余交互项对指标影响不显著。如图 13 所示, 随着因

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental scheme and results

序号	因素			投种速度 $Y_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
	锥形环缝宽 度 x_1	锥形环缝长 度 x_2	加速腔长度 x_3	
1	-1	-1	0	6.07
2	1	-1	0	6.96
3	-1	1	0	5.93
4	1	1	0	6.98
5	-1	0	-1	5.82
6	1	0	-1	6.91
7	-1	0	1	6.00
8	1	0	1	6.89
9	0	-1	-1	6.65
10	0	1	-1	6.49
11	0	-1	1	6.81
12	0	1	1	6.73
13	0	0	0	6.74
14	0	0	0	6.72
15	0	0	0	6.68

素 x_1 水平的增大,最大投种速度呈现快速上升趋势,因素 x_1 对最大投种速度具有显著正向影响;随着因素 x_2 水平的增大,最大投种速度呈现缓慢下降趋势,因素 x_2 对最大投种速度具有负向影响;随着因素 x_3 水平的增大,最大投种速度呈现缓慢上升趋势,因素 x_3 对最大投种速度具有正向影响。去除不显著的交互项,得到锥形环缝宽度、锥形环缝长度、加速腔长度对投种速度影响的回归方程为

$$Y_1 = 6.69 + 0.4896x_1 - 0.0447x_2 + 0.0707x_3 - 0.2422x_1^2 \quad (11)$$

表 5 投种速度方差分析

Tab.5 Analysis of velocity variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.19	4	0.5482	123.11	<0.000 1
x_1	1.92	1	1.92	430.68	<0.000 1**
x_2	0.016 0	1	0.016 0	3.60	0.087 2
x_3	0.039 9	1	0.039 9	8.97	0.013 5*
x_1^2	0.219 0	1	0.219 0	49.18	<0.000 1**
失拟项	0.042 3	8	0.005 3	4.79	0.184 3
误差	0.002 2	2	0.001		
总和	2.24	14			

注：* 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)，** 表示影响非常显著 ($P < 0.01$)。下同。

3.2.3 参数优化

投种速度影响种子在导种管内的运动时间和离开导种管后的运动轨迹,在高速作业条件下,种子运动的速度越快,种子在导种管内停留的时间越短,能减少外界对投种稳定性的影响。对各参数进行优化得到最佳参数为:锥形环缝宽度为 2 mm,锥形环缝

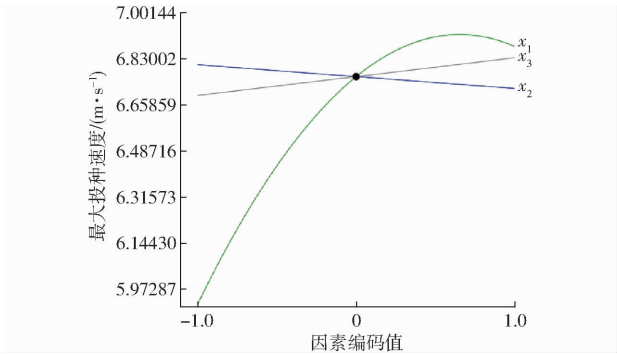


图 13 因素水平扰动图

Fig. 13 Factor level perturbation diagram

长度为 45 mm,加速腔长度为 12 mm。优化后投种速度平均值为 6.78 m/s。优化后结果如图 14 所示,导种装置内负压吸种阶段能够产生向下运动的气流,导种管内流场分布均匀。

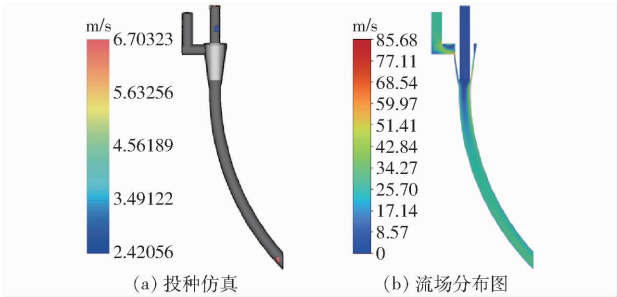


图 14 优化结果仿真验证

Fig. 14 Simulation verification of optimization results

4 台架试验

4.1 试验环境

为验证玉米射流导种装置的性能,开展台架试验。采用 3D 打印技术制作导种装置,打印材料为透明光敏树脂,试验材料选德玉 18 玉米种子,试验设备主要包含 Precision Planting 气吸式排种器、正压风机(山东伟捷机电设备有限公司)、负压风机(南京锚点流体科技有限公司)、高速摄像机(AOS Technologies AG 公司,图像后处理软件为 TEMA Classic,瑞士),在中国农业机械化科学研究院集团有限公司自研的智能化排种器性能试验台进行试验,如图 15 所示。

4.2 性能验证试验

为验证气流投种技术可应用于高速导种,并检验仿真优化的真实性,进行台架性能验证试验。气流速度通过流速计德图 testo512 测定,并调节气流速度为 50 m/s,作业速度为 12 km/h。记录 10 粒种子,计算其平均出射速度,并重复 5 次。每次试验使用高速摄像机记录投种过程,并导入运动分析软件 TEMA Classic。通过 TEMA Classic 软件跟踪种子运动过程并计算出射速度(图 16)。试验表明,在气流

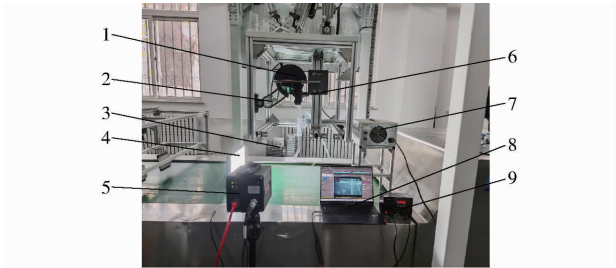


图 15 台架试验装置

Fig. 15 Bench test device

1. 排种器 2. 传动系统 3. 正压风机 4. 光源 5. 高速摄像机
6. 负压风机 7. 移动电源 8. 计算机 9. 光源控制器

速度为 50 m/s 条件下,实测种子平均出射速度为 6.47 m/s,而仿真结果为 6.78 m/s,相对误差为 4.79%。此误差水平表明仿真试验结果可靠。

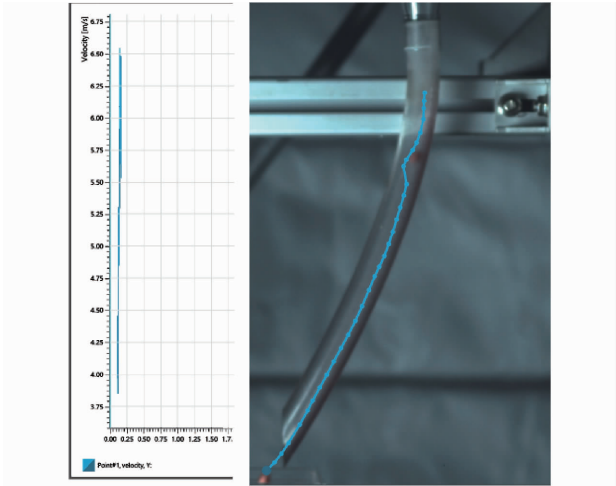


图 16 TEMA Classic 后处理

Fig. 16 Post-processing of TEMA Classic

4.3 最优工作参数试验

最优工作参数试验指标参考 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》,结合实际玉米免耕播种作业要求,选择粒距合格率和粒距变异系数为试验指标,同时计算种子投种出射速度,探究气流流速与投种速度关系。

设定种子株距为 25 cm,选取作业速度为 12、14、16 km/h,设定气流流速为 20~100 m/s。通过高速摄像机获取种子在导种阶段的运移时间、出射速度,可计算出每颗种子落地位置以及每粒种子之间的株距,进而计算出粒距合格率。株距计算公式为

$$S_n = X_n - X_{n-1} \tag{12}$$

其中 $X_n = v_B [t_n + (n - 1)c] - v'_x t'$ (13)

式中 X_n ——第 n 粒种子与落地的距离

S_n ——第 n 粒种子与第 $n - 1$ 粒种子之间的株距

t_n ——第 n 粒种子在导种装置内运移的时间

c ——每颗种子的投种时间间隔

t' ——种子离开导种管末端至落地的时间

v'_x ——种子离开导种管末端 x 轴方向上的速度

为更好地探究气流-气压与投种速度之间的关系,并且在实际工况中,采集压力值更有利于实际中的操作和控制。使用流速计德图 testo512 同时测定气流速度和气压,对应关系如表 6 所示。

表 6 气流速度-气压关系表

Tab. 6 Airflow velocity – air pressure relationship

气流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	气压/kPa
20	0.35
40	1.18
60	2.63
80	4.18
100	6.01

最优工作参数试验结果如表 7、8 所示。由表 7 可知,粒距合格率随气流速度的增大而增大,当作业速度为 12 km/h,粒距为 25 cm,随气流速度的增大,粒距合格率呈现先快速上升、后增速放缓的上升趋势。由表 8 可知,气流速度保持 80 m/s 的情况下,随作业速度的提高,粒距变异系数呈现逐渐上升的趋势。当固定作业速度时,随气流速度的提升,投种出射速度呈快速上升的趋势;当气流速度固定,改变作业速度,投种出射速度表现为缓慢上升趋势,分析其原因,提升作业速度,种子在进入高速射流导种装置时的初速度提高,但高速气流对种子具有明显的加速作用,作业速度对种子出射速度的影响小于气流速度对其的影响。

表 7 作业速度 (12 km/h) 单因素试验结果

Tab. 7 Single-factor experiment results on work speed (12 km/h)

气流速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	粒距合格率 $Y_2/\%$	粒距变异系 数 $Y_3/\%$	投种出射速 度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
20	76.5	26.32	3.61
40	82.4	18.54	5.52
60	85.6	16.63	7.59
80	93.2	14.72	9.69
100	94.3	13.94	10.85

表 8 气流速度 (80 m/s) 单因素试验结果

Tab. 8 Single-factor experiment results on airflow velocity (80 m/s)

作业速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	粒距合格率 $Y_2/\%$	粒距变异系 数 $Y_3/\%$	投种出射速 度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
8	98.3	9.79	9.17
10	95.6	12.85	9.48
12	93.2	14.72	9.69
14	88.7	17.32	9.90
16	82.6	19.30	10.31

根据单因素试验,选取气流速度范围为 40 ~ 80 m/s,作业速度 8 ~ 16 km/h,进行正交试验,探究气流速度与作业速度对粒距合格率和粒距变异系数的影响。试验因素编码如表 9 所示,试验结果如表 10 所示,方差分析见表 11、12,表中 x_5 、 x_6 为因素编码值。

表 9 正交试验因素编码

编码	试验因素	
	气流速度 $X_5/(m \cdot s^{-1})$	作业速度 $X_6/(km \cdot h^{-1})$
2	88.28	17.65
1	80	16
0	60	12
-1	40	8
-2	31.71	6.34

表 10 正交试验方案与结果

序号	气流速度 x_5	作业速度 x_6	粒距合格率 $Y_2/\%$	粒距变异系数 $Y_3/\%$
1	-1	-1	84.7	15.54
2	1	-1	98.3	9.79
3	-1	1	72.8	28.89
4	1	1	82.6	19.36
5	-2	0	77.2	24.10
6	2	0	93.7	13.30
7	0	-2	93.3	9.98
8	0	2	73.9	26.18
9	0	0	85.6	16.60

表 11 粒距合格率方差分析

Analysis of variance for particle spacing qualification rate					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	661.03	5	132.21	19 624.19	<0.000 1 **
x_5	273.01	1	273.01	40 525.12	<0.000 1 **
x_6	378.62	1	378.62	55 620.2	<0.000 1 **
$x_5 x_6$	3.611	1	3.60	535.85	<0.000 1 **
x_5^2	0.003 9	1	0.003 9	0.582 4	0.470 3
x_6^2	5.651	1	5.65	838.73	<0.000 1 **
失拟项	0.047 2	3	0.005 1	0.631 6	0.632 3
误差	0.032 0	4	0.008		
总和	661.08	12			

利用 Design-Expert 13 软件建立粒距合格率和粒距变异系数的多元回归模型。其 x_5 、 x_6 、 $x_5 x_6$ 、 x_5^2 对粒距合格率影响显著, x_5 、 x_6 、 $x_5 x_6$ 、 x_5^2 、 x_6^2 对粒距变异系数影响显著。

粒距合格率 Y_2 的回归方程为

$$Y_2 = 85.44 + 5.84x_5 - 6.88x_6 - 0.95x_5x_6 + 0.0238x_5^2 - 0.9012x_6^2$$

(14)

粒距变异系数 Y_3 的回归方程为

表 12 粒距变异系数方差分析

Analysis of variance for particle spacing coefficient of variation					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	392.86	5	78.57	3.29×10^5	<0.000 1 **
x_5	116.69	1	116.69	4.90×10^5	<0.000 1 **
x_6	262.55	1	262.55	1.10×10^6	<0.000 1 **
$x_5 x_6$	3.57	1	3.57	14 998.65	<0.000 1 **
x_5^2	7.54	1	7.54	31 668.74	<0.000 1 **
x_6^2	3.72	1	3.72	15 618.97	<0.000 1 **
失拟项	0.001 7	3	0	0.055 9	0.980 3
误差	0.001 6	4	0.000 4		
总和	392.87	12			

$$Y_3 = 16.62 - 3.82x_5 + 5.73x_6 - 0.945x_5x_6 + 1.04x_5^2 + 0.7312x_6^2$$

(15)

通过表 11、12 可得,气流速度和作业速度存在交互影响,为更加直观了解各交互因素对试验指标的影响,得到各因素交互效应对粒距合格率和粒距变异系数影响的响应曲面,如图 17 所示。

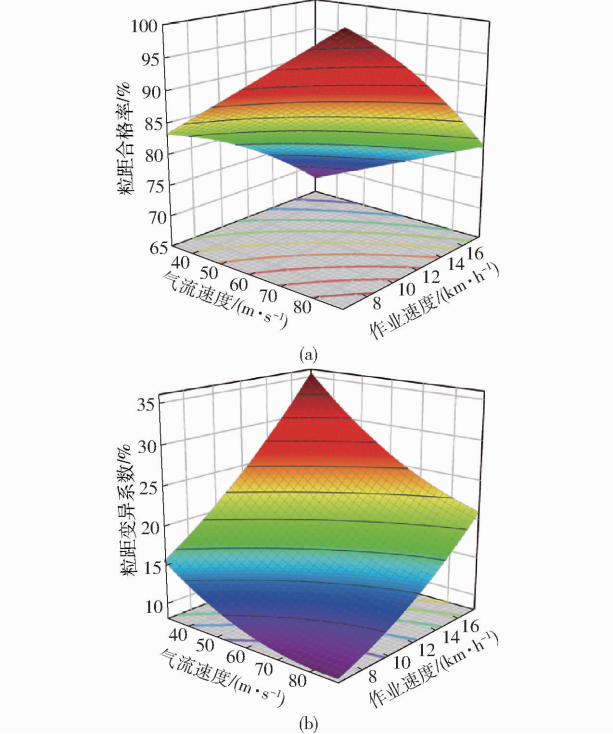


图 17 因素交互作用对粒距合格率、粒距变异系数影响的响应曲面

Fig. 17 Response surfaces of interaction effect of factors on qualified rate of particle distance and coefficient of particle distance variation

如图 17a 所示,气流速度大于 80 m/s、作业速度低于 12 km/h 时,高速射流导种装置具有较高的粒距合格率,高速气流能够有效裹挟种子下落,从而提高了粒距合格率。如图 17b 所示,当气流速度越大而作业速度越小时,具有最小的粒距变异系数,这是

由于低速作业条件下,投种时间间隔长,高速气流裹挟种子运动,能够抵消种子碰撞引起的滞留,因此降低粒距变异系数。

选取重力式导管进行对比试验(图 18),当株距为 25 cm 时,试验结果如图 19 所示。与重力式导种装置相比,采用高速射流导种装置能够显著提升粒距合格率和降低粒距变异系数。当作业速度为 12 km/h,与重力式导种装置相比,高速射流导种装置使粒距合格率提升 8.1 个百分点,粒距变异系数降低 6.48 个百分点。



图 18 重力式导种管

Fig. 18 Gravity seed guide tube

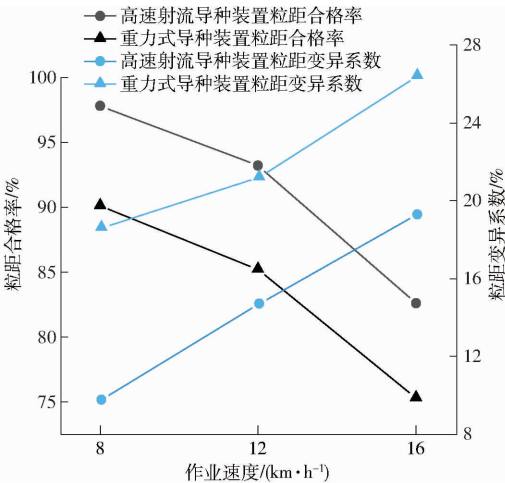


图 19 对比试验结果

Fig. 19 Comparative test results

5 田间试验

为进一步验证高速射流导种装置工作性能,2025 年在吉林省双辽试验田进行田间试验,试验配套动力为山东巨明 JM2004-B 型拖拉机,试验装置为中国农业机械化科学研究院集团有限公司自研的 5 行气吸式播种机,负压风机由拖拉机动力输出轴(PTO)驱动,高速射流导种装置气流由直流无刷涡轮风机提供,试验地土壤类型为风沙土,土壤含水率

为 7.66% ~ 9.29%,秸秆覆盖量较小,为 0.2 ~ 0.5 kg/m²。田间试验现场如图 20 所示。



图 20 田间试验

Fig. 20 Field test

试验时设定理论株距为 25 cm,气流速度设定为 80 m/s(气压为 4.18 kPa)。作业速度由地轮编码器测定,当作业速度达到预定值,且速度波动范围较小时,取 20 m 作为数据采集区。试验为单因素试验,每个速度水平重复 3 次,取平均值,试验结果如表 13 所示。

表 13 田间试验结果

Tab. 13 Field test results

作业速度/(km·h ⁻¹)	粒距合格率 Y ₂ /%	粒距变异系数 Y ₃ /%
7.94	97.8	13.67
10.21	94.1	15.48
12.37	93.7	17.56
14.76	85.1	26.20

通过田间试验结果可知,当作业速度不高于 12.37 km/h 时,粒距合格率不低于 93.7%,粒距变异系数不高于 17.56%,高速射流导种装置能够适用于中高速条件下的精密播种需求。

6 结论

(1)设计一种高速射流导种装置,在排种盘吸孔切线方向安装定位投种器,限制投种方向,强制种子实现垂直投种。外加高速气流在导种装置内部形成高压区和低压区,确保种子运移全程受到气流的作用力,降低碰撞对种子稳定运动的影响。

(2)采用 DEM-CFD 耦合仿真模拟种子在导种管内的运动,通过单因素、多因素仿真试验,确定和优化高速射流导种装置的设计参数。优化后的高速射流导种装置能够对进种腔形成吸附作用,同时导种管内部流场分布均匀,种子在导种管内能够快速移动。

(3)台架试验结果表明:在试验室条件下,作业速度为 12 km/h、株距为 25 cm、气流速度大于 80 m/s 时,粒距合格率达到 93.2%,粒距变异系数粒距变异系数不高于 14.72%。田间试验表明:当作业速度为 12.37 km/h 时,粒距合格率为 93.7%,粒距变异系数为 17.56%。

参 考 文 献

[1] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020,51(12):1-14.

- Liao Yitao, Li Chengliang, Liao Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)
- [2] 王云霞, 张文毅, 严伟, 等. 气流辅助高速投种精量播种机压种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 69–76.
- Wang Yunxia, Zhang Wenyi, Yan Wei, et al. Design and experiment of seed pressing device for precision seeder based on air flow assisted seed delivery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 69–76. (in Chinese)
- [3] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38–48.
- Yang Li, Yan Bingxin, Zhang Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38–48. (in Chinese)
- [4] 史嵩, 周纪磊, 刘虎, 等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 61–70.
- Shi Song, Zhou Jilei, Liu Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61–70. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 王伟韦, 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)
- [8] Tang H, Guan T, Xu F, et al. Test on adsorption posture and seeding performance of the high-speed precision dual-chamber maize metering device based on the seed characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108471.
- [9] Li J, Lai Q, Zhang H, et al. Suction force on high-sphericity seeds in an air-suction seed-metering device[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 125–140.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 杨文彩, 张效伟, 仲广远, 等. 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 Wencai, Zhang Xiaowei, Zhong Guangyuan, et al. 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)
- [13] 刘立晶, 杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 40–45.
- Liu Lijing, Yang Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 40–45. (in Chinese)
- [14] Du X, Liu C. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 1–17.
- [15] Jia X, Zhu J, Guo G, et al. Design and test of a novel converging groove-guided seed tube for precision seeding of maize[J]. Biosystems Engineering, 2024, 245: 36–55.
- [16] 意大利 Maschio 公司产品介绍[EB/OL]. [2025–09–10]. <https://www.maschiogaspardo.com/zh/web/china/%E6%88%91%E7%9A%84maschio-gaspardo>.
- [17] 美国 Precision Planting 公司产品介绍[EB/OL]. [2025–09–10]. <https://www.precisionagriservices.com/brands/precision-planting/speedtube>.
- [18] 刘瑞, 刘云强, 刘忠军, 等. 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 Rui, Liu Yunqiang, Liu Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):156–166. (in Chinese)

[19] 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.

[20] 衣淑娟,张清朋,戴智博,等. 玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(2):261–274.

Yi Shujuan,Zhang Yupeng,Dai Zhibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding 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)

[21] 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)

[22] 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 modelling for the DEM simulation of sowing process[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(14):14–22. (in Chinese)

[23] 邢金龙. 基于 CFD–DEM 耦合的气流一阶集排式排种系统仿真与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

Xing Jinlong. Simulation and test of the one-step centralized pneumatize seeding system based on CFD–DEM coupling method [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[24] 江涛,吴崇友,伍德林. 基于 Fluent 的联合收割机风筛选流场仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2015,36(3):26–29.

Jiang Tao, Wu Chongyou, Wu Delin. Simulation analysis of wind screen flow field for combine harvester based on Fluent[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015,36(3):26–29. (in Chinese)

[25] 郑嘉鑫,郭海宇,胡池,等. 气吸式黄精种子精密排种器设计与仿真[J]. 中国农机化学报, 2024,45(12):1–8.

Zheng Jiaxi, Guo Haiyu, Hu Chi, et al. Design and simulation of air-suction type precision seed metering device for polygonatum seeds[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(12):1–8. (in Chinese)

[26] 李建龙,赵艺,孙泽文,等. 环形缝隙喷嘴改进导流内锥式除尘滤筒脉冲喷吹性能的数值模拟[J]. 南昌大学学报(工科版), 2023,45(1):9–15.

Li Jianlong, Zhao Yi, Sun Zewen, et al. Numerical simulation of improved pulse jet performance by annular slit nozzle for the filter cartridge with an inner cone deflector[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2023,45(1): 9–15. (in Chinese)

[27] 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 Meng. Research on key technology of wheat precise planting and detection method of sowing-fertilizing amount[D]. Beijing: China Agricultural University,2022. (in Chinese)

[28] 鲍国丞,张振东,杨晓微,等. 基于康达效应的玉米小区收获机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10):234–243.

Bao Guocheng, Zhang Zhendong, Yang Xiaowei, et al. Design and experiment of separating impurities device for corn plot test harvester based on Coanda effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(10):234–243. (in Chinese)

[29] Elemam M A, Han C, Dong S W, et al. ROCKY DEM–CFD simulation for realistic granular flow in an aerodynamic separating device[C]//ASABE Annual International Meeting, 2019.

[30] 李祖吉,宋少云,李志方,等. 碾米过程中的气固两相流耦合仿真初探[J]. 粮食与饲料工业, 2015(11):1–4.

Li Zuji, Song Shaoyun, Li Zhifang, et al. Preliminary exploration of gas-solid two-phase flow coupling simulation in rice whitening[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(11):1–4. (in Chinese)

[31] 颜丙新,武广伟,付卫强,等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2020,51 (增刊2):47–54.

Yan Bingxin, Wu Guangwei, Fu Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(S2):47–54. (in Chinese)

[32] 王云霞,张东兴,梁志杰,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, Zhang Dongxing, Liang Zhijie, 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)