中国农业大学学报 2026,31(12):267-285
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

孟祥乐,于华丽,赵晓顺,王家忠,高振,边双印.基于DEM-CFD耦合方法的气流辅助导种装置的设计与参数优化[J].中国农业大学学报,2026,31(12):267-285.

MENG Xiangle, YU Huali, ZHAO Xiaoshun, WANG Jiazhong, GAO Zhen, BIAN Shuangyin. Design and parameter optimization of an airflow-assisted seed guiding device based on the DEM-CFD coupling method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 267-285.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.20

基于DEM-CFD耦合方法的气流辅助导种装置的设计与参数优化

孟祥乐[1] 于华丽[1] 赵晓顺[1*] 王家忠[1] 高 振[1] 边双印[2]

(1.河北农业大学 机电工程学院,河北 保定 071001;
2.河北峥嵘农机有限公司,河北 任丘 062550)

摘 要 针对玉米播种机高速作业时种子剧烈碰撞引起的粒距均匀性差、能量损失大等问题,基于文丘里效应设计了一种正压气流引射辅助输种的导种装置,明确了装置的主要结构与关键参数;采用离散元软件与流体动力学软件(Computational fluid dynamics-discrete element method,EDEM-Fluent)耦合方法对导种装置工作过程进行仿真,解析其内部气固两相流动力学特性;通过响应面法优化气流辅助导种装置结构参数,将种子平均碰撞次数和出口平均水平速度作为评价指标,获得最优参数为出种口弯曲半径30 mm、收缩-膨胀角80°、竖直种管与倾斜气流管交点距出种口137.5 mm;开展"有气流工况"与"无气流工况"仿真对比分析,结果表明:1)气流辅助使玉米种子出口水平速度较无气流工况提升78.5%;2)种子运动轨迹的随机性显著降低,速度稳定性明显增强;3)气流的拖曳与推送作用减轻种子与管壁的碰撞损耗,使种子出口速度和运动轨迹更加稳定。仿真结果表明,所设计的气流辅助导种装置可改善导种阶段种子的出口运动特性,可为后续样机试制与台架试验提供结构参数参考。

关键词 高速播种;气流辅助导种;文丘里效应;DEM-CFD;玉米种子

中图分类号 S24 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0267-19 **文献标志码** A

Design and parameter optimization of an airflow-assisted seed guiding device based on the DEM-CFD coupling method

MENG Xiangle[1], YU Huali[1], ZHAO Xiaoshun[1*], WANG Jiazhong[1], GAO Zhen[1], BIAN Shuangyin[2]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;
2. Hebei Zhengrong Agricultural Machinery Co., Ltd., Renqiu 062550, China)

Abstract To address the issues of poor seed spacing uniformity and significant energy loss caused by intense seed collisions during high-speed maize planting, a seed guiding device using positive pressure airflow induction was designed based on the Venturi principle. The main structure and key parameters were determined. The gas-solid two-phase flow dynamics inside the device were investigated via EDEM-Fluent coupled simulations. Response surface methodology was employed to optimize the structural parameters, with the average number of seed collisions and mean horizontal outlet velocity serving as evaluation indicators. The optimal parameters

收稿日期:2026-03-28;接受日期:2026-07-30
基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(254Z7201G);河北省重大科技支撑计划项目(242N7201Z);河北省农机研发制造推广应用一体化项目(202504)
第一作者:孟祥乐(ORCID:0009-0008-5962-5036),硕士研究生,E-mail:1291523859@qq.com
通讯作者:赵晓顺(ORCID:0000-0001-9569-3505),副教授,主要从事精量播种技术及智能装备方面研究,E-mail:zhao_xsh@126.com

were identified as: seed outlet bend radius of 30 mm, contraction-expansion angle of 80°, and distance from the intersection of the vertical seed tube and the inclined airflow tube to the seed outlet of 137.5 mm. A comparative simulation between "airflow" and "no-airflow" conditions showed that: 1) the horizontal outlet velocity of seeds increased by 78.5% under airflow assistance; 2) the randomness of seed trajectories was reduced and velocity stability was enhanced; 3) the drag and propulsion of the airflow mitigated collision losses with the tube wall, resulting in more stable outlet velocity and trajectories. The simulation results demonstrate that the proposed device improves seed outlet motion characteristics during the guiding stage, providing structural parameter references for subsequent prototype fabrication and bench tests.

Keywords high-speed seeding; air-assisted seed guidance; venturi effect; DEM-CFD; maize seeds

玉米精量播种是玉米生产的主导种植模式,是增产增效的农业工程技术,其核心装备主要由高速精量排种装置和导种装置组成[1-5]。高速排种装置精确拾取单粒种子,并将种子流有序投送入导种装置,导种装置承接排种器排出的种子流,确保种子维持单粒有序状态落入种沟[6-10]。精量播种技术提高了播种效率,减少了种子的浪费和损失,均匀的播种间距和播种深度保障了种子的合理分布和充分的生长空间,有利于提高玉米产量稳定性和总体产量[11-16]。然而,随着作业速度的提高,种子在导种过程中与装置壁面的碰撞效应增强,其运动轨迹的随机性和紊乱程度显著加剧,在高速播种工况下确保播种均匀性仍是亟待解决的关键问题[17-20]。

借助气流辅助可加速种子在导种管内的运动,提高其出口速度。文丘里效应在此类应用中较为常见:气体流经管道收缩段时流速增加、压力降低,产生的抽吸与拖曳作用可带动种子加速,最大限度地减少种子在导种管中的碰撞,从而提高播种精度与效率。Jia 等[21]针对玉米种子不规则形状及种管结构导致种子落地时滚动和弹跳的问题,基于考虑摩擦的缓时线曲线(Brachistochrone curve considering friction,BCCF)原理设计了一种收敛沟引导(Converging groove-guided,CGG)种子管,得出在沟槽角 111.34°、管子倾斜角 1.56°、作业速度 7.2 km/h的条件下,播种性能达到最优。Tang 等[22]设计了一种气吹式玉米排种器配套气流辅助导种管,通过分析种子在导种管内的运动机理,结合计算流体力学方法研究了不同结构参数与气流速度对导种性能的影响,结果表明该导种管使种子下落时间趋于均匀,合格指数提高 1.06%,变异系数降低 1.17%,最佳工况下最低变异系数为 9.58%,合格指数为 96.56%。Li 等[23]基于文丘里效应设计了一种高速玉米播种机的气动输种系统,利用外部风机产生的气流加速导种管内种子,减少了种子间的碰撞,实现了种子的稳定运输。Tang 等[24]还提出了一种气动式高速玉米精量播种装置,分析了玉米种子在充种、清种和导种过程中的运动机理,探究了前进速度、排种器负压和种子导流管正压对播种性能的影响。Zhang 等[25]为提高种子引导装置的作业质量提出了一种环周气流辅助(Encircled air-blowing-assisted,EABA)导种方法,对玉米受力情况进行分析并确定了 EABA 种子引导装置的关键结构参数,模拟了环周气流作用下玉米的下降过程。Li 等[26]提出了一种用于油菜籽的新型气力输送辅助种管,采用 DEM-CFD 模拟方法对进气口高度、收缩角、扩散角和喉部直径进行了单因子模拟测试,确定了气流辅助种子导管的参数,增强了种子移动,减少了种子与管壁间的无规则碰撞。Liu 等[27]研发了一种约束导流-气流吹送的导种装置,采用耦合的流体动力学软件(Computational fluid dynamics,CFD)和离散元软件(Discrete element method,DEM)方法确定了导种装置的各项参数,使种子粒距变异系数达到 8.9%,平均粒距为 24.5 cm。现有研究虽提及气流加速可匹配播种机前进速度,但未定量分析种子出种水平速度与播种机前进速度的匹配关系,也未通过结构参数优化实现精准的"零速投种"。

针对玉米播种机在高速作业工况下种子因剧烈碰撞导致粒距均匀性差、能量损失大的突出问题,基于文丘里效应设计了一种利用正压气流引射辅助输种的导种装置。采用气固两相流理论,分析了进口气压及导种管各段参数对种子加速与输送过程的影响。利用 DEM-CFD 耦合方法,将离散元法与计算流体动力学相结合,探究了气流速度与压力对种子加速和输送性能的影响,以揭示气力输种过程的气动力学机理,为装置结构优化与后续试验

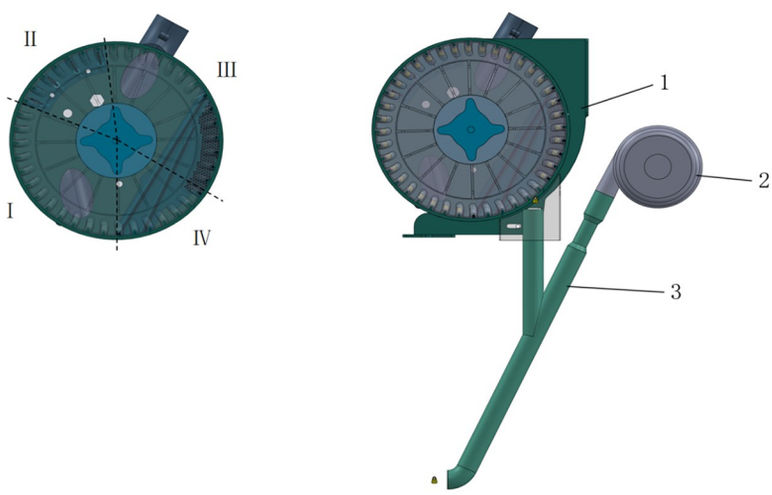
验证提供依据。

1　气流辅助导种装置与工作原理

1.1　总体结构及工作原理

玉米精量播种系统主要由气吹式玉米排种器、气流辅助导种装置和风机组成，如图1所示。气流辅助导种装置利用收缩段和膨胀段来对气流进行加速和稳流，气流可保障种子输送并使其维持较低的着地绝对速度，减少种子与种沟土壤的碰撞，有助于改善导种阶段的运动稳定性；气吹式玉米排种器采用电驱动和气流吹压实现精确的充种与投种，防止重播和漏播；电动风机为播种系统的稳定运行提供动力。

作业时，气吹式排种器将种子排进导种装置，风机在气流辅助导种装置中产生稳定的气流，收缩段与膨胀段将从风机吹出的气流转化为高速射流，种子依靠自身重力下落，由无气流的低速区域进入有压缩气流的高速射流区，在竖直管与倾斜管交汇处实现气种混合，在导管内形成相对稳定的气固耦合输送过程。在气流拖曳与导向作用下，种子被加速射出。



1. 气吹式排种器；2. 风机；3. 气流辅助导种装置；I. 种子填充区；II. 种子清理区；III. 种子运输区；IV. 种子卸载区

1. Air-blowing seed metering device; 2. Fan; 3. Airflow-assisted seed guiding device; I. Seed filling area; II. Seed cleaning area; III. Seed transportation area; IV. Seed unloading area

图1　整体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram

1.2　交汇处理论分析

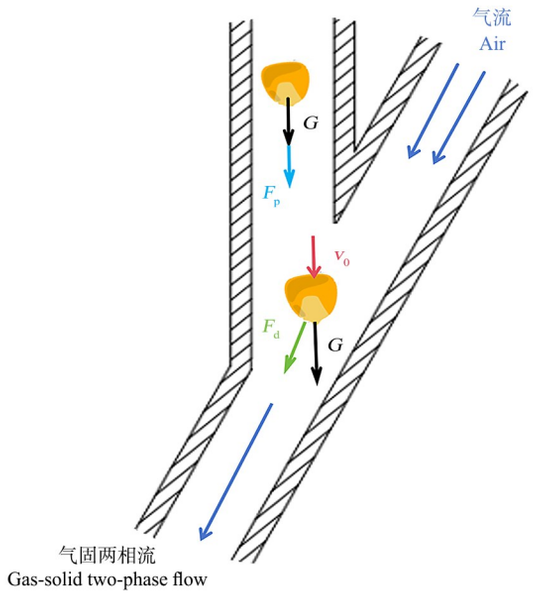
为深入分析种子在装置内的运动特性，对交汇区种子进行了受力分析，种子在该区域的主要受力如图2所示。根据伯努利原理，在理想条件下，同一流管内任一截面处单位体积流体的动能、势能与压力能之和保持恒定。定常流动时，流速升高伴随流体静压下降，理想定常流动中总机械能可视为守恒。计算得出，在气流辅助导种装置进风口压力为4 000 Pa时，在竖直导种管与倾斜气流管的交汇处会形成400 Pa的压差。若按照种子长11 mm，宽9 mm，估算迎风投影面积A_p≈99 mm^2，质量取0.25 g，则静压差作用力F_p= $\Delta p \times A_p$≈3.96×10^{-2} N，种子自身重力为$G=mg$=2.5×10^{-4}×9.81=2.45×10^{-3} N，理论估算表明气流作用力大于单粒种子重力，可促使种子由竖直管进入倾斜气流管并开始加速。

种子通过交汇处后，在倾斜气流管内继续受到气流的持续拖曳与推送。为分析种子颗粒动力学特性，将倾斜气流管简化为等截面直管，受力情况参见图2。标准状况下，空气密度ρ约为1.225 kg/m^3，气体流速v_a=15 m/s，颗粒直径d=11 mm，空气的动力黏度为μ=1.81×10^{-5} kg/(m·s)。雷诺数公式见式(1)：

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho v_a d}{\mu} \tag{1}$$

式中：Re为雷诺数；ρ为空气密度，kg/m^3，本研究取ρ=1.225 kg/m^3；v_a为空气流速，m/s；d为颗粒直径，m；μ为空气的动力黏度，kg/(m·s)，本研究取μ=1.81×10^{-5} kg/(m·s)，下同。

计算得出空气的雷诺数Re=11 167，说明该工况下惯性效应占优，流动处于湍流范围。理论估算



G为重力；F_P为静压差；F_D为气动力；v_0为玉米种子进入倾斜气流管的初始速度。

G is gravity; F_P is static pressure difference; F_D is aerodynamic force; v_0 is the initial speed of the maize seed entering the inclined airflow tube.

图 2 种子受力分析图

Fig. 2 Force analysis of seed

时将玉米种子简化为等效球体，参考玉米颗粒DEM建模研究[23]及球形颗粒阻力系数经验值，取近似值C_d=0.44。根据气动力（主要是气流对种子的拖曳力）公式（2）：

$$F_d=\frac{1}{2}C_d\rho A_p v_a^2 \tag{2}$$

式中：F_d为种子在管道内受到的空气拖曳力，N；C_d为阻力系数，本研究取C_d=0.44；A_p为迎风投影面积，m^2。

计算得到所受气动力F_d约为0.006 N，此气动力可促进种子沿气流方向运动。迎风面积A_p取种子长、宽方向的最大投影面积估算，用于量级分析；在DEM模型中，种子几何形态由多球颗粒填充表达。气动力公式表明种子受力与气流速度、迎风面积和阻力系数有关。调节文丘里管入气口气体流速可影响出口的最终水平速度分量。设玉米种子进入倾斜气流管的初始速度为v_0，方向竖直向下；倾斜气流管与水平线夹角为θ，则沿倾斜气流管轴线的初始速度分量可表示为$v_{x1}=v_0\sin\theta$，t时刻轴向速度为v_{x2}，出口水平分速度为$v_t=v_{x2}\cos\theta$。为进一步建立气体流量、气动力与种子运动状态之间的关系，分别引入气体流量与气流速度关系式、圆形管道截面流量表达式、气动阻力公式、种子加速度公式以及位移-速度关系式，详见式（3）～式（7）：

$$Q=Sv_a \tag{3}$$

$$Q=\pi\cdot R^2 v_a \tag{4}$$

$$F_d=\frac{1}{2}C_d\rho A_p v_a^2 \tag{5}$$

$$F_d=ma-mg\sin\theta \tag{6}$$

$$v_{x2}^2-v_{x1}^2=2aL \tag{7}$$

$$v_t=v_{x2}\cos\theta \tag{8}$$

经联立求解公式（3）～（8），可得到玉米种子被引射入倾斜气流管并受气流加速后，出口水平速度与气体流量的关系为：

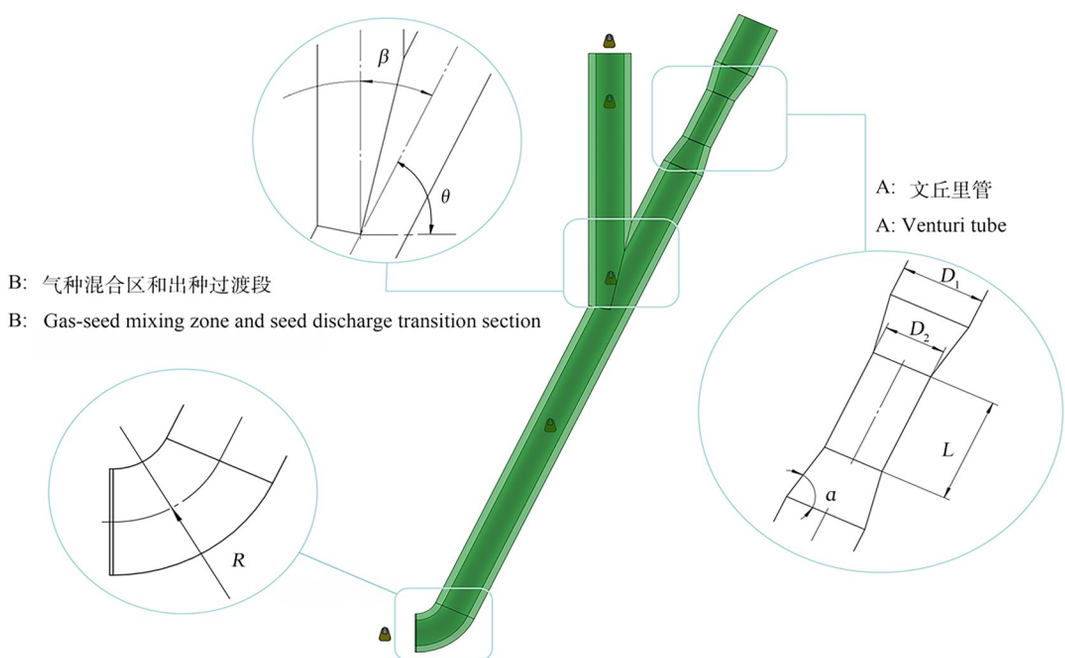
$$v_t=\cos\theta\sqrt{(v_0\sin\theta)^2+\frac{C_d\rho A_p Q^2 L}{m\pi^2 R^4}+2gL\sin\theta} \tag{9}$$

式中：Q为气体流量，m^3/s；S为管道的横截面积，m^2；R为管道半径，m；m为玉米种子的质量，kg；L为种子沿管道方向的位移，m；a为种子的加速度，m/s^2；θ为倾斜气流管与水平线夹角，（°）；v_{x1}为种子沿倾斜气流管轴线的速度分量，m/s；v_{x2}为种子在倾斜气流管运动t秒后的轴向速度，m/s；v_t为经过t秒后的水平分速度，m/s；v_0为玉米种子进入倾斜气流管的初始速度，m/s。

1.3 关键结构参数设计

气流辅助导种装置设计如图3所示。图3中A部分为实现文丘里效应的主要部分，D_1为文丘里管的进气口直径，D_2为文丘里管的喉部直径。

气流经进气口进入喉部，随着直径减小，气流速度增大、局部静压降低；a 为收缩段和膨胀段相对于文丘里管横截面的角度，会影响气流速度、压力恢复及局部能量损失，合理的收缩-膨胀角可减小气体分离和流动损失。L 为喉部长度，影响流动稳定性、颗粒加速时间和结构紧凑性，喉部过短可能导致种子加速不足，过长则可能增加沿程损失。图 3 中 B 部分为气种混合及出种过渡段，文丘里收缩喉部布置在混合段前部，可在交汇区域形成局部低压和高速射流，使种子从竖直管进入倾斜气流管后受到气流拖曳并加速；R 为出种口弯曲半径，该参数影响管道曲率、种子与壁面碰撞次数及出口速度方向，进而影响种子水平速度和能量损耗。本研究以降低平均碰撞次数、提高平均出口水平速度为优化目标，为后续播种性能试验提供结构参数依据。



D_1为文丘里管的进气口直径；D_2为文丘里管的喉部直径；L 为喉部长度；a 为收缩段和膨胀段相对于文丘里管横截面的角度；R 为出种口弯曲半径；β 为两管夹角；θ 为倾斜气流管与水平线夹角。

D_1 is the inlet diameter of the Venturi tube; D_2 is the throat diameter of the Venturi tube; L is the throat length; a is the angle of the converging and diverging sections relative to the cross-section of the Venturi tube; R is the bending radius of the outlet; β is the angle between the two tubes; θ is the angle between the slanted airflow tube and the horizontal line.

图 3　气流辅助导种装置结构图

Fig. 3　Schematic diagram of an airflow-assisted seed guiding device

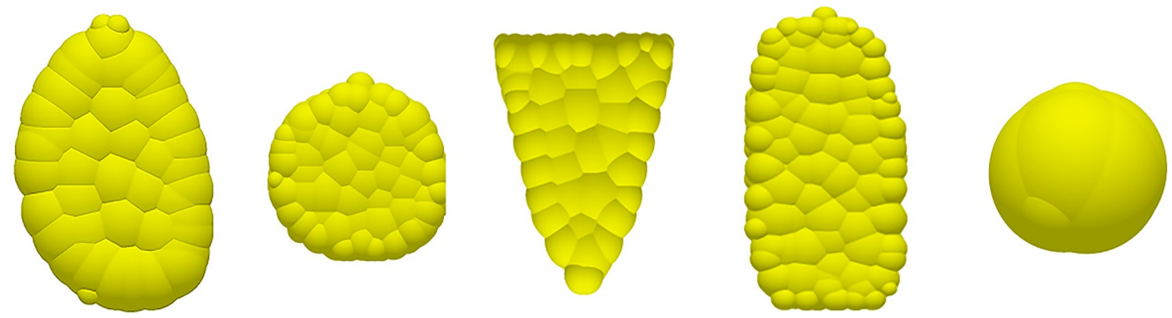
2　材料与方法

2.1　DEM 和 CFD 数学建模

为验证理论分析的有效性，采用数值仿真进行检验。使用SolidWorks对5种常见玉米种子外形进行三维建模，将模型转化为 .stl 文件导入到EDEM2020软件中，并利用EDEM多球填充功能对玉米种子进行球形颗粒填充，如图 4 所示。玉米种子的尺寸测量如表 1 所示。多球填充以种子长、宽、厚尺寸和外形轮廓为约束，基于颗粒数收敛性分析并参考玉米颗粒建模方法，后续仿真适当减少了球形填充颗粒数量[28]。将气流辅助导种装置的模型以相同的方式导入到EDEM中，颗粒间接触采用Hertz-Mindlin无滑移模型（H-M no-slip model）和标准滚动摩擦模型（Standard rolling friction，SRF model）。导种装置材料为亚克力，玉米与气流辅助导种装置的物料参数及接触参数（种-种、种-管）如表 2 所示。

表 2 所列密度、泊松比、剪切模量及接触参数用于建立DEM接触模型，参数取值参考已有玉米颗粒DEM建模研究[23]和同类亚克力材料接触参数设置，并结合本研究仿真对象统一确定。本研究未开

展物性参数标定试验，所得结果主要用于结构参数相对优选与气固耦合机理分析。CFD侧采用入口压力4 kPa、出口压力0 Pa的边界条件，气相参数按标准空气选取，EDEM与Fluent通过交换颗粒位置、速度、受力及流场速度/压力信息实现双向耦合。



(a) 椭圆形粒 (a) Ellipsoidal particle　(b) 圆形粒 (b) Round particle　(c) 三角形粒 (c) Triangular particle　(d) 矩形粒 (d) Rectangular particle　(e) 球形粒 (e) Spherical particle

图4 EDEM填充玉米种子颗粒

Fig. 4 EDEM multi-sphere modeled maize seeds

表1 种子尺寸

Table 1 Seed size mm

种子分类 Seed classification	参数 Parameter	长度 Length	宽度 Width	厚度 Thickness
椭圆形粒 Ellipsoidal particle	平均值	11.48	9.12	5.23
	标准差	0.66	0.62	0.65
圆形粒 Round particle	平均值	10.78	7.92	5.65
	标准差	0.56	0.31	0.62
三角形粒 Triangular particle	平均值	11.23	8.89	5.78
	标准差	0.51	0.51	0.61
矩形粒 Rectangular particle	平均值	10.27	8.83	6.87
	标准差	0.72	0.56	0.69
球形粒 Spherical particle	平均值	8.30	8.60	7.50
	标准差	0.61	0.59	0.61

2.2 气固耦合仿真

采用DEM-CFD耦合方法描述种子在导种管内的运动状态及参数。气固耦合仿真基于ANSYS Fluent 2021、EDEM 2020和Visual Studio 2019三款软件：Fluent负责流体域抽取、网格划分及流场求解，EDEM负责模型建立、颗粒填充及离散元计算，Visual Studio用于编译耦合接口程序。图5为DEM-CFD双向耦合流程图，首先建立气流辅助导种装置几何模型并抽取流体域，然后完成CFD网格划分与边界条件设置；同时在EDEM中设置颗粒模型及接触参数，并在Fluent中设置湍流模型和求解参数。在完成EDEM时间步长、耦合界面和耦合时间步长设置后，Fluent与EDEM通过耦合接口进行流场信息和颗粒信息交换，实现气固两相流双向耦合计算。

CFD流体域采用非结构化网格，因各方案结构差异，网格数量在56 676～60 568。入口边界设为压力入口，入口压力设置为4 kPa；出口边界为压力出口，出口压力设置为0 Pa；壁面为无滑移边界。由1.2节计算得气流雷诺数Re=11 167，流动处于湍流范围，Fluent中选用realizable k-ε湍流模型及标准壁面函数。EDEM时间步长取1×10^{-6} s，耦合求

表 2　DEM 材料及接触参数

Table 2　DEM material and contact parameters

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
玉米种子 Maize seed	泊松比	0.357
	密度/(kg/m³)	800
	剪切模量/Pa	1.5×10^{8}
气流辅助导种装置 Airflow-assisted seed guiding device	泊松比	0.41
	密度/(kg/m³)	1 080
	剪切模量/Pa	1.77×10^{8}
种子与种子 Seeds-seeds	恢复系数	0.39
	静摩擦系数	0.286
	滚动摩擦系数	0.056
种子与导种装置 Seeds-Seed guiding device	恢复系数	0.621
	静摩擦系数	0.459
	滚动摩擦系数	0.093

解时 Fluent 时间步长取 EDEM 步长的 100 倍，即 1×10^{-4} s，耦合总步数 16 000 步。

计算过程中，EDEM 向 Fluent 传递颗粒位置、速度及相互作用力，Fluent 则将流速、压力及气固作用力反馈给 EDEM，实现流固双向耦合。流体运动遵循连续性方程、伯努利方程和动量守恒，控制方程如下：

$$S_1v_1\rho_1=S_2v_2\rho_2 \tag{10}$$

$$P_1+\frac{1}{2}\rho_1v_1^2+\rho_1gh_1=P_2+\frac{1}{2}\rho_2v_2^2+\rho_2gh_2 \tag{11}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\nabla v\right)=-\nabla P+\mu\nabla^2v+\rho f \tag{12}$$

式中：S_1、S_2为流道截面面积，m²；v_1、v_2为对应截面气流速度，m/s；ρ_1、ρ_2为对应截面空气密度，kg/m³；P_1、P_2为对应截面静压，Pa；h_1、h_2为对应截面高度，m；v为气流速度，m/s；P为压力，Pa；f为体积力项，N/kg。

在理论推导环节，为突出压力梯度和惯性项对颗粒运动的主导作用，可在理想流动条件下将 Navier-Stokes 方程简化为欧拉方程。该简化以 Re=11 167 所反映的惯性效应占优为依据，仅用于理论分析说明，见式(13)：

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\nabla v\right)=-\nabla P \tag{13}$$

式中：t为时间，s；∇P为压力梯度，Pa/m。

DEM-CFD 耦合中，种子颗粒的运动由动量守恒和牛顿运动方程共同描述。颗粒在气流中所受主要作用力包括重力、曳力(阻力)和浮力，其受力关系可表示为式(14)～(15)：

$$F=ma \tag{14}$$

$$F=G+F_d+F_b \tag{15}$$

式中：F为种子总受力，N；G为种子所受重力，N；F_b为浮力，N。

气流与颗粒存在相对运动时，颗粒受气流阻力作用。低雷诺数条件下，阻力主要由黏性力决定，可采用斯托克斯阻力模型描述；本研究工况下颗粒雷诺数较高，惯性效应占主导，因此高雷诺数阻力模型更适用于气流辅助导种过程，相关表达式详见式(16)～(17)：

$$F_d=\frac{1}{2}C_d\rho A_p(v_a-v_p)\left|(v_a-v_p)\right| \tag{16}$$

$$F_b=-\rho V_pg \tag{17}$$

式中：v_p为颗粒速度，m/s；V_p为颗粒体积，m³。

结合上述方程，得到粒子的运动学方程如下式(18)：

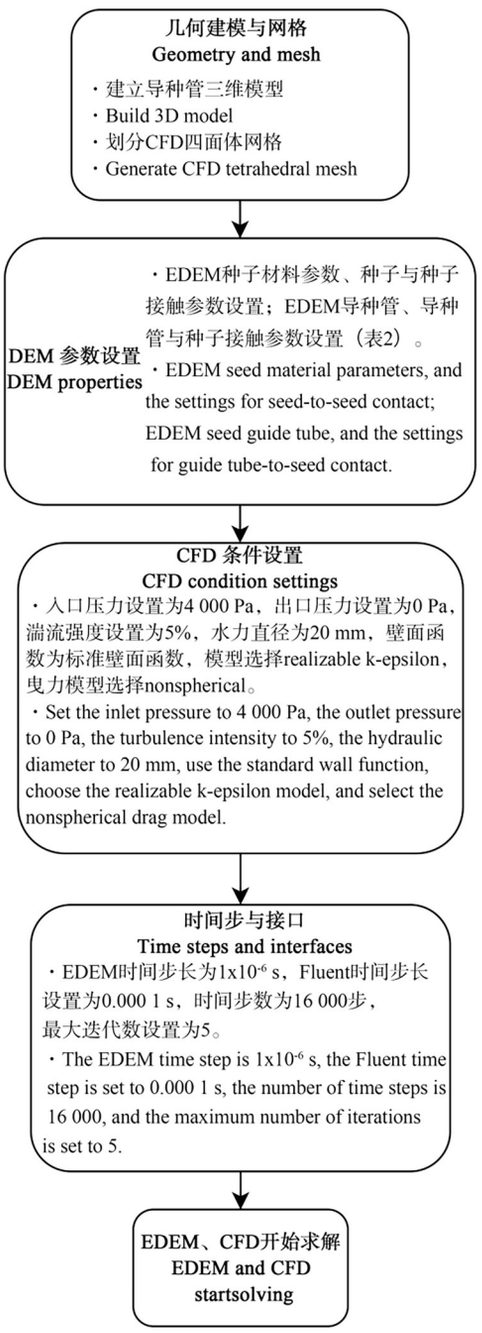


图 5 DEM-CFD 双向耦合流程图

Fig. 5 DEM-CFD bidirectional coupling flowchart

$$m\frac{dv_p}{dt}=mg+F_d-\frac{4}{3}\rho\pi r^3 g \qquad (18)$$

式中：r为玉米种子的等效半径，m。

2.3 响应面试验设计

Design-Expert是一款由Stat-Ease研发的试验设计软件[29]，可提供普拉克特-伯曼试验设计（Plackett-burman，PB）和博克斯-贝肯试验设计（Box-behnken design，BBD）。根据所设计气流辅助导种装置的结构，设置5个候选因素：竖直种管与倾斜气流管夹角、收缩-膨胀角、出种口弯曲半径、竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置（指沿倾斜气流管中心线方向，由出种口截面向上游交汇点测得的轴向距离）以及喉部长度。各结构参数取值范围根据玉米种子尺寸、导种装置安装空间、文丘里管气流加速特性及预仿真结果确定。竖直种管与倾斜气

流管夹角过小时，种子进入倾斜气流管后易与下侧壁面接触；夹角过大时，种子进入交汇区的姿态变化增大，取25～45°。收缩-膨胀角过小时气流加速作用较弱，过大时易增大局部流动损失，取45～80°。出种口弯曲半径过小会增大弯曲段曲率和壁面碰撞，过大则增加装置尺寸，取15～30 mm。交点距出种口位置过短会缩短种子受气流加速距离，过长会增加导种路径和碰撞概率，取135～140 mm。喉部长度过短不利于形成稳定高速气流，过长会增加沿程损失，取10～40 mm。本研究首先采用PB试验对候选因素进行筛选，分析各因素对种子平均碰撞次数和平均水平速度的影响；随后将PB试验筛选出的主要因素用于BBD响应面优化。PB试验的5个因素上、下水平设置如表3所示，PB试验结果如表4所示。

表3　PB试验因子水平表

Table 3　Table of experimental factor levels

水平 Level	因素A Factor A	因素B Factor B	因素C Factor C	因素D Factor D	因素E Factor E
－1	25	45	15	－1	10
1	45	80	30	1	40

注：A为竖直种管与倾斜气流管夹角，(°)；B为收缩-膨胀角，(°)；C为出种口弯曲半径，mm；D为竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置（编码值）；E为喉部长度，mm。其中，D表示沿倾斜气流管中心线方向，由出种口截面向上游交汇点测得的轴向距离；PB试验中D采用编码值表示，－1和1分别代表该因素的低水平（135 mm）和高水平（140 mm）。下同。

Note: A is the angle between the vertical seed tube and the inclined airflow tube, B is the contraction-expansion angle, C is the bending radius of the seed outlet, D is the distance from the intersection of the vertical seed tube and the inclined airflow tube to the seed outlet, and E is the length of the throat. Among them, D represents the axial distance measured along the centerline of the inclined airflow tube from the seed outlet cross-section to the upstream intersection point; in the PB test, D is represented by coded values, with －1 and 1 representing the low level (135 mm) and high level (140 mm) of this factor, respectively. The same below.

表4　PB试验结果表

Table 4　PB test results table

试验项目 Test project	因素A Factor A	因素B Factor B	因素C Factor C	因素D Factor D	因素E Factor E	指标1/次 Metric 1	指标2/(m/s) Metric 2
1	1	1	－1	1	1	2.00	1.37
2	－1	1	1	－1	1	1.40	1.51
3	1	－1	1	1	－1	1.90	1.07
4	－1	1	－1	1	1	2.10	1.26
5	－1	－1	1	－1	1	1.00	1.06
6	－1	－1	－1	1	－1	2.40	1.02
7	1	－1	－1	－1	1	2.30	0.88
8	1	1	－1	－1	－1	1.82	1.16
9	1	1	1	－1	－1	1.10	1.30
10	－1	1	1	1	－1	0.90	1.76
11	1	－1	1	1	1	1.83	1.13
12	－1	－1	－1	－1	－1	2.50	0.87

注：指标1代表种子在导种过程中平均碰撞次数，指标2代表种子在导种装置出口处的平均水平速度；试验项目中1～12代表PB试验的试验序号，是12组不同参数组合的仿真试验。下同。

Note: Metric 1 represents the average number of collisions the seed experiences during the seeding process, and Metric 2 represents the average horizontal velocity of the seed at the outlet of the seeding device. In the test items, 1-12 represent the test numbers of the PB experiments, which are 12 sets of simulation tests with different parameter combinations. The same below.

BBD试验采用三因素三水平设计，包含12组析因组合点和3组中心点重复，中心点重复用于估计试验误差和检验模型稳定性；考虑DEM-CFD耦合仿真计算量较大，本研究采用3组中心点重复进行响应面模型拟合与优化分析，共15组仿真试验。BBD试验因素水平如表5所示，试验结果如表6所示。

表5 BBD试验因子水平表

Table 5 BBD experimental factor level table

水平 Level	因素B 收缩-膨胀角/(°) Factor B Contraction-expansion angle	因素C 出种口弯曲半径/mm Factor C Bending radius of the seed outlet	因素D 交点距出种口位置/mm Factor D Intersection distance from the seed outlet position
−1	45.0	15.0	135.0
0	62.5	22.5	137.5
1	80.0	30.0	140.0

表6 BBD试验结果表

Table 6 BBD test results table

试验项目 Test project	因素B Factor B	因素C Factor C	因素D Factor D	指标1/次 Metric 1	指标2/(m/s) Metric 2
1	−1	−1	0	1.70	0.95
2	1	−1	0	1.56	1.08
3	−1	1	0	1.00	1.42
4	1	1	0	0.56	1.61
5	−1	0	−1	2.72	1.17
6	1	0	−1	1.56	1.37
7	−1	0	1	2.30	1.20
8	1	0	1	1.11	1.47
9	0	−1	−1	1.50	1.03
10	0	1	−1	0.60	1.42
11	0	−1	1	1.00	1.18
12	0	1	1	0.50	1.47
13	0	0	0	0.80	1.25
14	0	0	0	1.01	1.31
15	0	0	0	0.96	1.17

注：试验项目中的1～15为BBD试验运行序号，用于区分15组仿真方案，其中1～12为不同因素水平组合的仿真试验，13～15为中心点重复试验。

Note: In the experimental items, numbers 1 to 15 are the BBD experiment run numbers, used to distinguish the 15 sets of simulation schemes. Numbers 1 to 12 are simulation tests with different factor level combinations, and 13 to 15 are repeated tests at the central points.

3 结果与讨论

3.1 响应面结果及讨论

3.1.1 PB试验结果和分析

选取种子平均碰撞次数和出口平均水平速度作为两个性能指标。种子平均碰撞次数(次)为种子在气流辅助导种装置内与壁面碰撞次数的均值，用以表征导种过程的碰撞损耗；出口平均水平速度(m/s)反映种子离开导种装置时的水平运动状态。较高且稳定的出口水平速度有利于同播种机前进速度进行匹配，但种子入沟后的实际运动仍受出口角度、离地高度、土壤条件及排种稳定性等因素影

响，因此本研究仅从仿真层面探讨导种装置的出口运动特性，不直接以此评判田间粒距质量或零速投种效果。

PB试验中的种子平均碰撞次数和种子平均水平速度的方差分析如表7和表8所示。表7中模型P=0.026 5(P<0.05)，模型整体显著，出种口弯曲半径(C)和收缩-膨胀角(B)对种子平均碰撞次数有显著影响，其余因素(A、D、E)影响不显著。表8中模型P=0.004 5，模型高度显著，出种口弯曲半径(C)和收缩-膨胀角(B)对种子平均水平速度有显著影响；竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置(D)的P=0.064 7，虽按P<0.05标准未达显著水平，但其接近显著水平且具有明确结构意义。综合指标1、指标2及导种结构布置要求，PB试验确定将收缩-膨胀角、出种口弯曲半径和竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置3个因素纳入后续BBD响应面优化。

表7　PB试验指标1方差分析表

Table 7　ANOVA table for PB test index 1

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	2.760	5	0.550	5.84	0.026 5	*
A-A	0.035	1	0.035	0.37	0.564 4	ns
B-B	0.570	1	0.570	5.99	0.049 9	*
C-C	2.080	1	2.080	21.91	0.003 4	**
D-D	0.085	1	0.085	0.90	0.380 0	ns
E-E	8.333×10^{-6}	1	8.333×10^{-6}	8.80×10^{-5}	0.992 8	ns
残差 Residual	0.570	6	0.095			—
校正总和 Cor total	3.330	11				—

注：Model表示整体回归模型；A-A、B-B、C-C、D-D和E-E分别表示因素A、B、C、D和E的主效应；Residual表示残差，即模型未能解释的变异部分，可反映随机误差、未考虑因素或模型拟合不足造成的误差；Cor total表示校正总和，即扣除均值影响后的总变异量，为模型项与残差项平方和之和，可用于衡量模型对总变异的解释程度。*表示影响显著(P<0.05)，**表示影响极显著(P<0.01)，“ns”表示影响不显著(P≥0.05)；“—”表示该项不进行显著性判断。下同。

Note: Model refers to the overall regression model; A-A, B-B, C-C, D-D, and E-E represent the main effects of factors A, B, C, D, and E, respectively; Residual refers to the residual, which is the part of the variation that the model fails to explain, reflecting random error, unconsidered factors, or model fit issues; Cor total refers to the corrected total, which is the total variation after removing the effect of the mean, equal to the sum of squares of the model and residual terms, and can be used to gauge how much of the total variation the model explains. “*” indicates a significant effect (P<0.05), “**” indicates a highly significant effect (P<0.01), and “ns” indicates a non-significant effect (P≥0.05); “—” means no significance test is conducted for that item. The same below.

3.1.2　BBD试验结果与分析

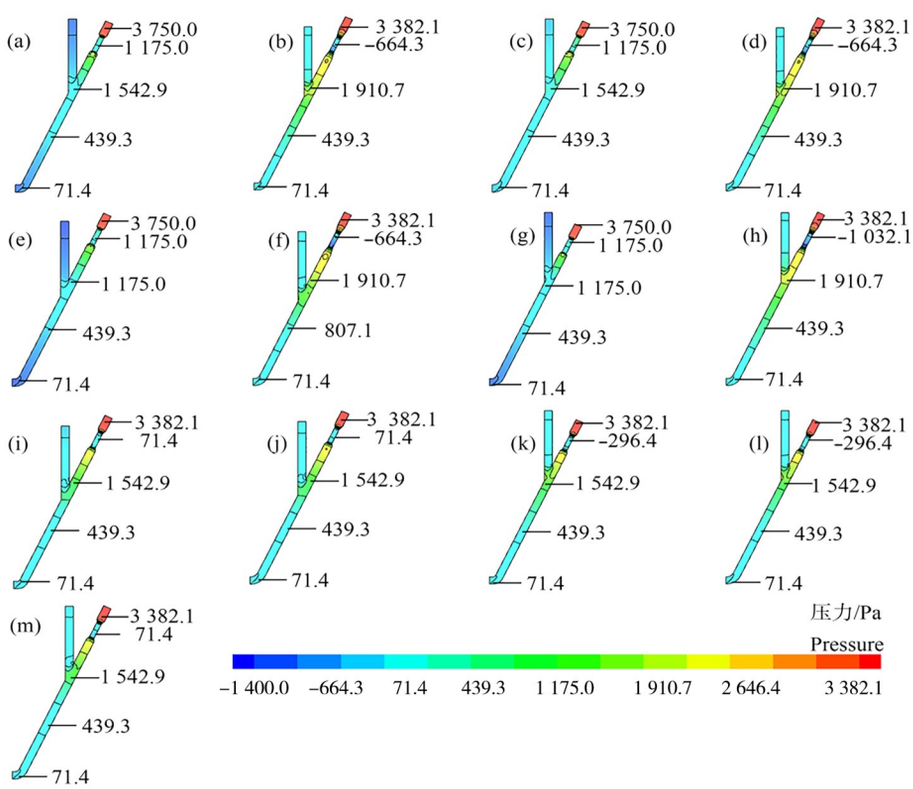
PB试验结果表明，收缩-膨胀角和出种口弯曲半径对2个指标均有显著影响，交点距出种口位置对平均水平速度呈边际影响。据此，将竖直种管与倾斜气流管夹角固定为25°、喉部长度固定为40 mm、倾斜气流管长度固定为400 mm，进口气压设定为4 000 Pa，出口压力为0 Pa。BBD试验选取收缩-膨胀角(B)、出种口弯曲半径(C)和竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置(D)3个因素。编码值与实际值按xi=(Xi-X0)/ΔXi换算，B的中心值X0=62.5°、步长ΔX=17.5°；C的中心值X0=22.5 mm、步长ΔX=7.5 mm；D的中心值X0=137.5 mm、步长ΔX=2.5 mm。仍以种子平均碰撞次数和出口平均水平速度作为性能指标。

BBD模拟试验结果表明，不同结构参数条件下气流辅助导种装置的压力和速度分布存在差异，图6为气流导种装置的压力分布图，图7为气流导种装置的速度分布图。由图6可知，导种装置内压力自入口至喉部降低，在膨胀段逐步恢复，局部压力损失主要集中在收缩-喉部及弯曲过渡区域。收缩-膨胀角影响气流加速与压力恢复过程，出种口弯曲半径影响弯曲段局部流动损失和种子碰撞概率，交点位

表 8 PB试验指标 2 方差分析表

Table 8 ANOVA table for PB test index 2

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P*-value	显著性 Significance
模型 Model	0.670	5	0.130	11.930	0.004 5	**
A-A	0.027	1	0.027	2.410	0.171 8	ns
B-B	0.450	1	0.450	40.200	0.000 7	**
C-C	0.130	1	0.130	11.940	0.013 5	*
D-D	0.057	1	0.057	5.100	0.064 7	ns
E-E	7.500×10^{-5}	1	7.500×10^{-5}	6.665×10^{-3}	0.937 6	ns
残差 Residual	0.068	6	0.011			—
校正总和 Cor total	0.740	11				—



（a）～（m）为不同BBD试验参数组合下的压力云图，其中（m）为中心点参数组合。下同。

(a)-(m) are pressure contours under different BBD experimental parameter combinations, among which (m) represents the center-point parameter combination. The same below.

图 6 不同 BBD 试验参数组合下的压力云图

Fig. 6 Pressure contours under different BBD experimental parameter combinations

置决定种子进入高速射流区的时机与受加速距离。由图 7 可知，喉部区域气流速度达到峰值，膨胀段速度下降；过渡不合理或曲率过小会增大局部速度梯度和回流风险，加剧种子与壁面接触。综合压力、速度分布及种子运动响应，可进一步优化导种装置结构，使种子加速过程更平稳，降低碰撞损失。

由表 6 可知，第 4 组仿真方案的种子碰撞次数低且出种水平速度高，其仿真压力云图和速度矢量

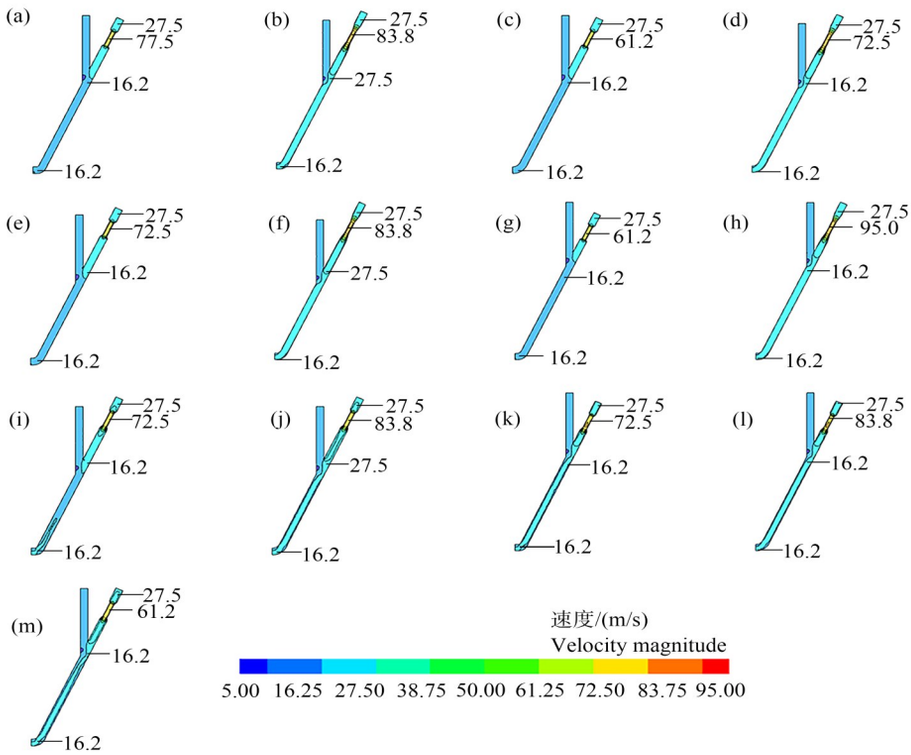
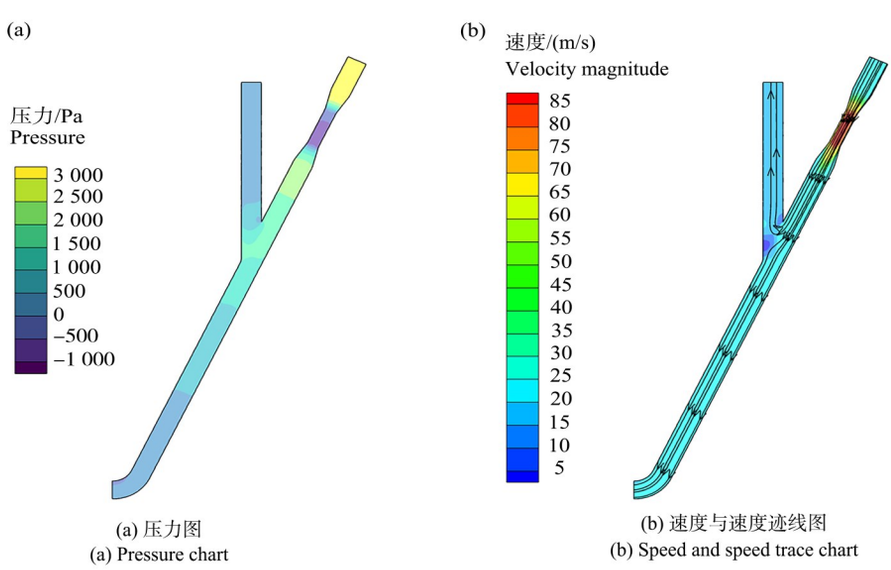


图 7　不同 BBD 试验参数组合下的 Fluent 速度云图

Fig. 7　Fluent velocity contours under different BBD experimental parameter combinations

图如图 8 所示。该组参数为：收缩-膨胀角 80°、出种口弯曲半径 30 mm、竖直种管与倾斜气流管交点距出种口 137.5 mm。图 8(a)为导种装置压力云图，文丘里管喉部压力最低、气体流速快，与伯努利原理相符。压力从入口急剧下降至喉部，经膨胀段逐渐回升，装置内压力范围约－1 340～3 750 Pa，这种



图(a)为压力分布云图，用于反映管道不同位置处的压力变化；图(b)为速度大小分布及流线图，用于反映流体在管道内的流动方向和速度变化。

Figure (a) is a pressure distribution contour map, showing how pressure changes at different points in the pipe; Figure (b) shows the speed distribution and streamlines, showing the direction and speed changes of the fluid flow inside the pipe.

图 8　最优组云图

Fig. 8　Contour plots of the optimal configuration

压差有利于种子从竖直管被引入倾斜气流管并实现气流加速输送。图 8(b)速度流线分布显示了管内气流路径和速度变化:入口区域流速较低,进入喉部后显著增大,膨胀段速度逐渐降低,有利于压力恢复和流场稳定。与不合理参数组合相比,该结构可削弱局部回流与速度波动,降低碰撞损耗。

BBD 方差分析结果见表 9 和表 10。由表 9,指标 1 模型的 $F=6.67$、$P=0.025\ 1$($P<0.05$),回归关系显著;B(收缩-膨胀角)、C(出种口弯曲半径)及 B^2 的 P 值均小于 0.05,是影响碰撞次数的显著项;D(交点距出种口位置)、各交互项以及 C^2、D^2 均不显著;失拟项 $P=0.081\ 6$($P>0.05$),不显著,模型可充分反映数据变化。所得回归方程为:

$$Y_1 = 0.92 - 0.37B - 0.39C - 0.18D - 0.075BC - 0.007\ 5BD + 0.100CD + 0.65B^2 - 0.37C^2 + 0.35D^2 \quad (19)$$

表 9 BBD 试验指标 1 方差分析表

Table 9 BBD test indicator 1 variance analysis table

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F 值 F value	P 值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	5.230	9	0.580	6.67	0.025 1	*
B-B	1.070	1	1.070	12.31	0.017 1	*
C-C	1.200	1	1.200	13.77	0.013 8	*
D-D	0.270	1	0.270	3.10	0.138 7	ns
BC	0.022	1	0.022	0.26	0.633 1	ns
BD	2.250×10^{-4}	1	2.250×10^{-4}	2.58×10^{-3}	0.961 5	ns
CD	0.040	1	0.040	0.46	0.528 3	ns
B^2	1.570	1	1.570	18.00	0.008 1	**
C^2	0.510	1	0.510	5.81	0.060 8	ns
D^2	0.440	1	0.440	5.10	0.073 5	ns
残差 Residual	0.440	5	0.087			—
失拟项 Lack of fit	0.410	3	0.140	11.41	0.0816	ns
纯误差 Pure error	0.024	2	0.012			—
校正总和 Cor total	5.670	14				—

注:B 为收缩-膨胀角,C 为出种口弯曲半径,D 为竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置。B-B、C-C 和 D-D 分别表示因素 B、C 和 D 的主效应;BC、BD 和 CD 分别表示对应两因素间的交互作用;B^2、C^2 和 D^2 分别表示对应因素的二次项;Lack of fit 表示失拟项,用于检验回归模型与试验数据之间的拟合程度;Pure error 表示纯误差,主要来源于中心点重复试验。下同。

Note: B is the contraction-expansion angle, C is the bending radius of the seed outlet, and D is the distance from the intersection of the vertical seed tube and the inclined airflow tube to the seed outlet. B-B, C-C, and D-D represent the main effects of factors B, C, and D, respectively; BC, BD, and CD represent the interactions between the corresponding two factors; B^2, C^2, and D^2 represent the quadratic terms of the corresponding factors; Lack of fit represents the lack-of-fit term, used to check how well the regression model fits the experimental data; Pure error represents the pure error, mainly coming from repeated experiments at the center points. The same below.

式中:Y_1 为种子平均碰撞次数;B、C、D 分别为收缩-膨胀角、出种口弯曲半径和竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置。下同。

由表 10,指标 2 模型的 $F=9.70$、$P=0.011\ 1$($P<0.05$),回归关系显著;B 和 C 的 P 值均小于 0.05,是影响出口水平速度的关键因素,其中 C 的 F 值更大,表明出种口弯曲半径对速度的影响强于收缩-膨胀角;D 及各交互项、二次项均不显著;失拟项 $P=0.509\ 6$($P>0.05$),不显著,模型有效。回归方程为:

表 10　BBD试验指标2方差分析表

Table 10　BBD test indicator 2 variance analysis table

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squares	F 值 F value	P 值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	0.460	9	0.051	9.700	0.011 1	*
B-B	0.078	1	0.078	14.950	0.011 8	*
C-C	0.350	1	0.350	67.610	0.000 4	**
D-D	0.014	1	0.014	2.610	0.167 2	ns
BC	9.000×10^{-4}	1	9.000×10^{-4}	0.170	0.695 1	ns
BD	1.225×10^{-3}	1	1.225×10^{-3}	0.230	0.648 5	ns
CD	2.500×10^{-3}	1	2.500×10^{-3}	0.480	0.519 7	ns
B^2	2.231×10^{-3}	1	2.231×10^{-3}	0.430	0.542 0	ns
C^2	3.141×10^{-5}	1	3.141×10^{-5}	6.019×10^{-3}	0.941 2	ns
D^2	4.416×10^{-3}	1	4.416×10^{-3}	0.850	0.399 8	ns
残差 Residual	0.026	5	5.218×10^{-3}			—
失拟项 Lack of fit	0.016	3	5.408×10^{-3}	1.100	0.509 6	ns
纯误差 Pure error	9.867×10^{-3}	2	4.933×10^{-3}			—
校正总和 Cor total	0.480	14				—

$$Y_2 = 1.24 + 0.099B + 0.21C + 0.041D + 0.015BC + 0.017BD - 0.025CD + 0.025B^2 - 2.917\times10^{-3}C^2 + 0.035D^2 \quad (20)$$

式中：Y_2为种子平均出口速度，m/s。

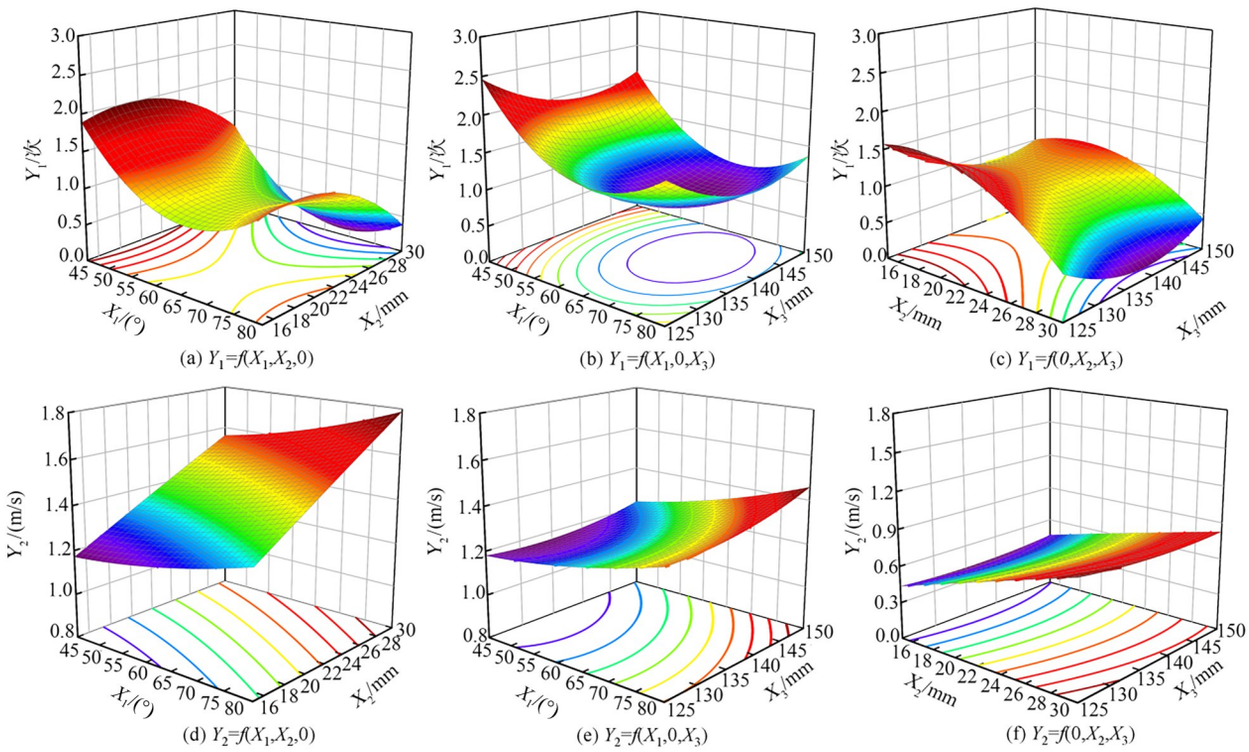
响应面如图9所示。种子碰撞次数响应面表明，B和C的主效应较明显，随B、C水平增大，平均碰撞次数整体降低；但由表9可知BC交互项P=0.633 1，交互作用不显著，D在考察范围内影响较小。出口水平速度响应面表明，B和C主效应显著，C对种子水平速度的提升作用强于B；BC交互项P=0.695 1，也不显著。表6中第4组（B=80°、C=30 mm、D=137.5 mm）表现为低碰撞次数和高水平速度。模型给出的连续最优组合为B=78°、C=30 mm、D=135 mm，预测平均碰撞次数0.60次，平均水平速度1.58 m/s。综合考虑已仿真离散水平中的最优组合及其响应值与预测值的接近程度，本研究推荐最终结构参数为收缩-膨胀角80°、出种口弯曲半径30 mm、竖直种管与倾斜气流管交点距出种口137.5 mm。

4　有/无气流仿真对比分析

为探明气流辅助对导种装置内种子运动特性的调控作用，采用EDEM-Fluent耦合方法，在相同结构参数下对比有气流与无气流两种工况的仿真结果。各工况重复仿真4次，取平均值以降低随机误差。

有气流与无气流工况对比基于数值仿真，重点分析气流辅助对种子出口速度、运动轨迹和碰撞损耗的影响。图10为2种工况下种子从导种管出口射出瞬间的速度状态。采用后处理软件提取速度标识，有气流工况下种子瞬时出口水平速度为1.96 m/s，无气流工况为1.03 m/s，二者相差0.93 m/s。无气流工况中，种子主要依靠重力下落，与管壁的刚性碰撞消耗大量动能，导致出口速度较低且稳定性差；有气流工况中，文丘里收缩段使气流加速，交汇区形成的压力梯度将种子引入气流场，持续的气流拖曳与导向作用减轻了壁面碰撞动能损耗，最终使种子出口水平速度显著提高。

图11为2种工况下的平均水平射出速度对比。无气流工况下4次重复仿真得到的平均水平速度在

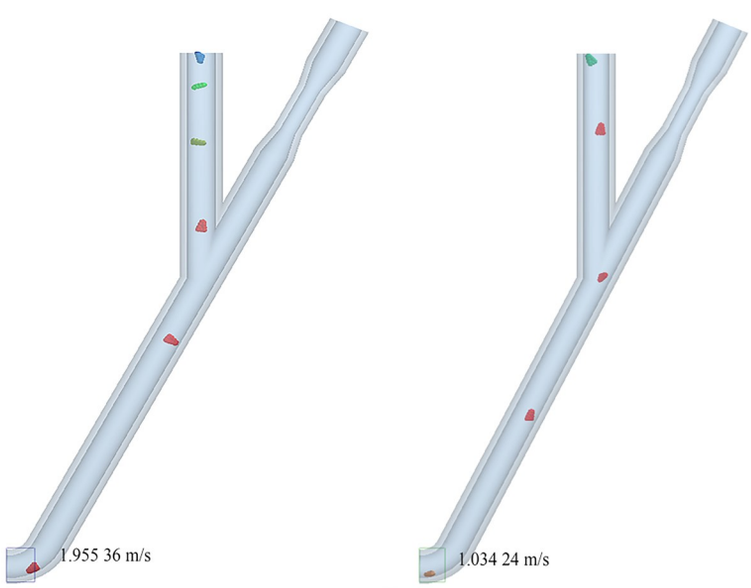


X_1,X_2,X_3分别为收缩-膨胀角(°)、出种口弯曲半径(mm)、竖直种管与倾斜气流管交点距出种口距离(mm);Y_1为种子平均碰撞次数、Y_2为出口平均水平速度(m/s)。

X_1, X_2, and X_3 are the contraction-expansion angle (°), the bending radius at the seed outlet (mm), and the distance from the intersection of the vertical seed tube and the inclined airflow tube to the seed outlet (mm), respectively; Y_1 is the average number of seed collisions, and Y_2 is the average horizontal speed at the outlet (m/s).

图 9 响应面图

Fig. 9 Response surface plot



(a) 有气流工况
(a) Condition with airflow

(b) 无气流工况
(b) Condition without airflow

图 10 玉米种子仿真速度图

Fig. 10 Simulated velocity distribution of maize seeds

0.8～1.0 m/s，波动范围较大；有气流工况下平均水平速度稳定在1.4～1.6 m/s，始终保持较高水平，重复间差异小，表明气流对种子加速及辅助导种具有促进作用。无气流工况的标准差在0.10～0.25间波动，有气流工况的标准差保持在0.18～0.20，前者个体差异明显、稳定性较差，后者数据更为集中统一，出口速度一致性增强。

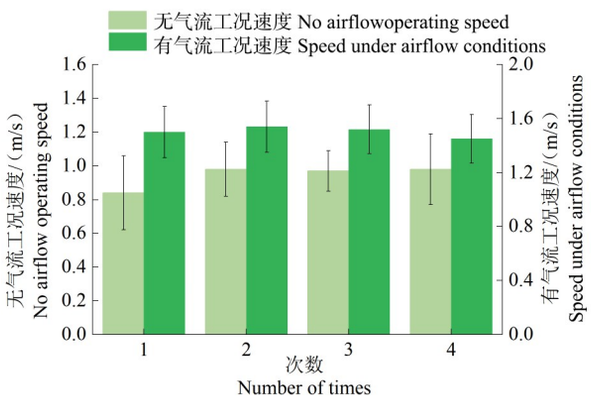


图11　有气流工况和无气流工况的平均水平速度和标准差图像

Fig. 11　Comparison of mean horizontal velocity under airflow and no-airflow conditions

5　结　论

采用DEM-CFD耦合方法模拟了不同结构气流辅助导种装置内的种子运动、速度及流场变化，通过PB试验和BBD响应面分析筛选出显著影响因素并确定了推荐参数，同时与无气流工况进行了对比，主要结论如下：

1）在常规导种管基础上增设文丘里管，设计了气流辅助导种装置。PB试验筛选表明，收缩-膨胀角、出种口弯曲半径和竖直种管与倾斜气流管交点距出种口位置是影响种子平均碰撞次数和出口水平速度的重要因素。采用DEM-CFD耦合方法分析了玉米种子在气流作用下的运动特性，并经Box-Behnken design（BBD）试验优化获得推荐参数组合：竖直种管与倾斜气流管夹角25°、喉部长度40 mm、出种口弯曲半径30 mm、收缩-膨胀角80°、交点距出种口137.5 mm。该组合下种子平均碰撞次数较少，加速效果显著。

2）对推荐参数组合进行了流场分析。结果表明，文丘里喉部形成低压、高速气流区，有利于种子进入倾斜气流管并加速运动；膨胀段压力恢复，局部回流减弱，流场相对稳定。在进口气压4 kPa条件下，导种装置出口气流速度约27 m/s，种子平均水平速度约1.56 m/s。

3）有气流与无气流工况对比表明，相同结构条件下气流辅助可使种子出口水平速度提升至1.5 m/s以上，较无气流工况提高78.5%，种子轨迹稳定性增强。但实际播种质量仍需结合台架与田间试验进一步验证。

本研究基于DEM-CFD耦合仿真对气流辅助导种装置进行了结构参数优化，所得结果可为样机设计提供参考。考虑到实际播种过程受排种稳定性、作业速度、离地高度和土壤条件等多因素影响，后续将结合样机加工、高速摄像观测、台架试验和田间试验，对粒距合格指数、粒距变异系数、重播指数及漏播指数等作业性能指标进行验证。

参考文献　References

[1] 白慧娟，方宪法，王德成，苑严伟，周利明，牛康．玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]．农业机械学报，2020，51(9)：61-72
Bai H J，Fang X F，Wang D C，Yuan Y W，Zhou L M，Niu K. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2020，51(9)：61-72 (in Chinese)

[2] 崔涛，韩丹丹，殷小伟，李克鸿，肖荔荔，杨丽，张东兴．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 T，Han D D，Yin X W，Li K H，Xiao L L，Yang L，Zhang D X. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2017，33(1)：8-16 (in Chinese)

[3] 刁培松，赵殿报，姚文燕，逄焕晓，王文君，姜超．玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置设计与试验[J]．农业机械学报，2022，53(2)：88-97
Diao P S，Zhao D B，Yao W Y，Pang H X，Wang W J，Jiang C. Design and experiment of shallow buried laying device for drip Irrigation belt of corn seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2022，53(2)：88-97 (in Chinese)

[4] 杜兆辉，和贤桃，杨丽，张东兴，崔涛，钟翔君．玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]．农业工程学报，2023，39(9)：1-16
Du Z H，He X T，Yang L，Zhang D X，Cui T，Zhong X J. Research progress on precision variable-rate seeding technology and equipment for maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2023，39(9)：1-16 (in Chinese)

[5] 付浩，张学军，史增录，程金鹏，吴海峰，于永良，饶志强．滴灌区玉米精量免耕播种机设计与试验[J]．新疆农业科学，2024，61(5)：1094-1101
Fu H，Zhang X J，Shi Z L，Cheng J P，Wu H F，Yu Y L，Rao Z Q. Design and experiment of corn precision no-till planter in the drip irrigation area[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*，2024，61(5)：1094-1101 (in Chinese)

[6] 付作立，宫志超，褚青昕，李海宇，张墨林，黄玉祥．高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J]．农业机械学报，2024，55(11)：273-284
Fu Z L，Gong Z C，Chu Q X，Li H Y，Zhang M L，Huang Y X. Design and

test of an active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(11): 273-284 (in Chinese)

[7] 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)

[8] 韩丹丹, 黄与霞, 黄金路, 徐友, 张永生, 张黎骅. 2BF-4轻简型玉米精量播种机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(5): 236-245
Han D D, Huang Y X, Huang J L, Xu Y, Zhang Y S, Zhang L H. Design and testing of the lightweight and simple 2BF-4 maize precision seeder[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(5): 236-245 (in Chinese)

[9] 和贤桃, 王鑫鹏, 文策昂, 杨丽, 米国华, 张东兴, 崔涛. 基于实时肥量获取的玉米播种机施肥可视化系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 52-61,152
He X T, Wang X P, Wen C A, Yang L, Mi G H, Zhang D X, Cui T. Design and testing of visualization system for fertilizer application in corn seeders based on real-time fertilizer quantity acquisition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(9): 52-61,152 (in Chinese)

[10] 姜业元, 崔涛, 张东兴, 杨丽, 董佳琪, 张传阔. 基于下压力与镇压力联合控制的玉米播种机播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 83-93
Jiang Y Y, Cui T, Zhang D X, Yang L, Dong J Q, Zhang C K. Seeding depth control system of maize planter based on combined control of downforce and firming pressure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(9): 83-93 (in Chinese)

[11] 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)

[12] 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 corn high-speed precision planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 156-166 (in Chinese)

[13] 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 马铁, 宋健鹏, 田阳. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37-46
Liu Y F, Lin J, Li B F, Ma T, Song J P, Tian Y. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 37-46 (in Chinese)

[14] 宋庆斌, 毕于彬, 赵鹏飞, 董建鑫, 黄玉祥, 郑义. 玉米小区播种机阻断型气吸式排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 1-9
Song Q B, Bi Y B, Zhao P F, Dong J X, Huang Y X, Zheng Y. Design and test of the blocking type air-suction seed metering device for maize plot seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4): 1-9 (in Chinese)

[15] 杨丽, 李治民, 张东兴, 李川, 崔涛, 和贤桃. 离心式高速玉米精量排种器T形槽型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 50-60
Yang L, Li Z M, Zhang D X, Li C, Cui T, He X T. Design and test of the T-shaped hole of a centrifugal high-speed maize precision seed metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(7): 50-60 (in Chinese)

[16] 郑雯璐, 衣淑娟, 李抒昊, 刘坤, 戈天剑. 玉米精量播种机排种性能检测系统研究: 基于光电法[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 200-203,208
Zheng W L, Yi S J, Li S H, Liu K, Ge T J. Research on the sowing performance monitoring system for precision seeders: Based on photoelectric sensor[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(4): 200-203,208 (in Chinese)

[17] 凌琳, 颜丙新, 武广伟, 李汉青, 肖跃进, 梅鹤波, 董建军, 孟志军. 玉米精量播种区段控制技术研究现状[J]. 农机化研究, 2024, 46(1): 9-16
Ling L, Yan B X, Wu G W, Li H Q, Xiao Y J, Mei H B, Dong J J, Meng Z J. Research status of precision planting section control technology of maize [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(1): 9-16 (in Chinese)

[18] 刘忠军, 刘立晶, 杨学军, 赵郑斌, 刘晓秋. 指夹式玉米免耕精密播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(z2): 1-6
Liu Z J, Liu L J, Yang X J, Zhao Z B, Liu X Q. Design and experiment of no-till precision planter for corn[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(z2): 1-6 (in Chinese)

[19] 孙文胜, 衣淑娟, 齐海龙, 李衣菲, 袁佳莎, 王淞. 玉米品字形密植高速精量排种器性能试验及参数影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(22): 21-34
Sun W S, Yi S J, Qi H L, Li Y F, Yuan J S, Wang S. Performance test and parameter effects of the high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(22): 21-34 (in Chinese)

[20] 姚颍飞, 陈学庚, 纪超, 陈金成, 张惠, 潘峰. 基于模糊PID控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 12-21
Yao Y F, Chen X G, Ji C, Chen J C, Zhang H, Pan F. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(6): 12-21 (in Chinese)

[21] Jia X, Zhu J Y, Guo G, Huang Y X, Gao X J, Zhang C Q. Design and test of a novel converging groove-guided seed tube for precision seeding of maize [J]. *Biosystems Engineering*, 2024, 245: 36-55

[22] 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

[23] Li H S, Yang L, Zhang D X, Cui T, He X T, Xie C J, Li C, Du Z H, Xiao T P, Li Z M, Wang H Y. 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: 109604

[24] Tang H, Xu F D, Guan T Y, Xu C S, Wang J W. Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 211: 107997

[25] Zhang C L, Liu T, Wang Y Z, Chen L Q, Fang J, Liu C. An encircled air-blowing-assisted seed guiding method based on coupled CFD-DEM simulation [J]. *Biosystems Engineering*, 2025, 260: 104314

[26] Li Z D, Zhang H, Huang J L, Lou C, Chen Y X, Liu L C, Zhang T, Chen L Q. Design and parameter optimization of air-delivery auxiliary seed guide for pneumatic plate precision rapeseed metering device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 230: 109840

[27] Liu R, Zhang G Q, Xiao Y J, Yan B N, Meng Z J, Dong J J, Wu G W. DEM-CFD investigation of particle motion characteristic in a guidance restraint-airflow blowing seed guiding device[J]. *Advanced Powder Technology*, 2025, 36(1): 104747

[28] 陈泽仁, 刘正彬, 关威, 郭建波, 薛朵梅. 面向播种过程离散元仿真的玉米

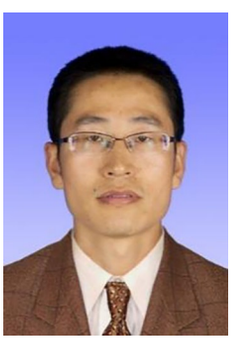
颗粒建模方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(14): 14-22
Chen Z R, Liu Z B, Guan W, Guo J B, Xue D M. Maize grain modelling for the DEM simulation of sowing process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(14): 14-22 (in Chinese)

[29] Qin M, Jin Y, Cao M, Wu F, Luo W, Guo K, Xu H, Gu F, Hu Z. Design and parameter optimization of a negative-pressure peanut fruit-soil separating device[J]. *Agronomy*, 2023, 13(9): 2338

责任编辑：梁芷健



第一作者简介：孟祥乐，在读硕士，主要从事智能农机装备研究，曾获得河北农业大学二等奖学金。



通讯作者简介：赵晓顺，博士，副教授，主要从事智能农机装备、种子加工与检测研究，美国堪萨斯州立大学生物与农业工程访问学者，张家口市燕赵英才服务B卡。主持完成省部级以上科研项目8项，获河北省科技进步奖2项，河北省山区创业二等奖1项，北京发明创新银奖1项，保定市科技进步奖3项。国内外期刊上发表学术论文100余篇；以第一发明人获授权发明专利9项（已转让7项），实用新型专利30余件；出版专著、编著5部，主编教材2部。作为第一指导教师，指导大学生获得“互联网＋”、挑战杯等创新创业大赛省级以上奖励20余项，指导大学生创新创业训练计划项目省级5项、校级8项。