doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.014

玉米亲本种子精选分级生产线文丘里混种装置设计与试验

付作立[1,2]　孙曜晨[1]　毕于彬[1,3]　宋庆斌[1]　刘鸿图[1]　黄玉祥[1,2]　闫小丽[1]　周济兴[4]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学海南研究院, 三亚 572000; 4. 郑州度风科技有限公司, 郑州 450000)

摘要: 针对玉米亲本种子精选分级过程中出现的种子滞留问题,设计了一种文丘里混种装置。通过分析总体结构及工作原理,计算了文丘里混种装置内部流场参数,并对种子进行了动力学分析,明确了进种段角度、收缩段角度、混种段长度、进种口位置、混种段直径等结构参数是影响种子流运动状态的主要因素。采用 CFD - DEM 耦合仿真方法,分别开展了单因素和多因素试验,结果表明:因素对出口种子的速度和质量影响显著性由大到小依次为进种段角度、混种段直径、进种口位置,通过 Box - Behnken 响应面优化,建立了回归模型,得到最优参数组合为:进种段角度 50°、进种口位置 21 mm、混种段直径 46 mm,在该组合下出口种子质量流量为 156.42 g/s、种子平均速度为 5.92 m/s。通过高速摄影试验方法对仿真结果进行验证,结果表明:出口种子平均速度为 6.16 m/s,相对误差为 4.09%;种子质量流量为 164.43 g/s,相对误差为 5.12%。

关键词: 亲本种子;精选分级;气力输送;文丘里混种装置;CFD - DEM

中图分类号: S226.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)09-0148-11　　**OSID**:

Design and Testing of Venturi Seed Mixing Device for Maize Parent Seed Selection and Grading Production Line

FU Zuoli[1,2]　SUN Yaochen[1]　BI Yubin[1,3]　SONG Qingbin[1]　LIU Hongtu[1]　HUANG Yuxiang[1,2]
YAN Xiaoli[1]　ZHOU Jixing[4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *Hainan Institute of Northwest A&F University, Sanya* 572000, *China*
4. *Zhengzhou Dofine Technology Co., Ltd., Zhengzhou* 450000, *China*)

Abstract: Aiming to address the seed retention problem encountered in the precision grading process of maize parental seeds, a Venturi seed-mixing device was designed. Based on an analysis of the overall structure and working principle, the internal flow-field parameters of the Venturi mixer were calculated, and the particle dynamics of seeds were investigated. The results indicated that key structural parameters, namely the seed-inlet section angle, converging-section angle, mixing-section length, seed-inlet position, and mixing-section diameter, were the primary factors affecting seed flow behavior. Using a coupled CFD - DEM simulation approach, single-factor and multi-factor experiments were performed. The results showed that the significance of factors affecting the outlet seed velocity and mass flow rate decreased in the following order: seed-inlet section angle, mixing-section diameter, and seed-inlet position. Based on Box - Behnken response surface optimization, a regression model was established and the optimal parameter combination was obtained: seed-inlet section angle of 50°, seed-inlet position of 21 mm, and mixing-section diameter of 46 mm. Under this combination, the simulated outlet seed mass flow rate and mean seed velocity were 156.42 g/s and 5.92 m/s, respectively. High-speed imaging experiments were further conducted to validate the simulation results. The measured mean outlet seed velocity was 6.16 m/s with a relative error of 4.09%, and the measured seed mass flow rate was 164.43 g/s with a

收稿日期: 2026 - 01 - 20　修回日期: 2026 - 02 - 07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000401)

作者简介: 付作立(1987—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: fuzuoli@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 闫小丽(1969—),女,副教授,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: yxl9212@nwsuaf.edu.cn

relative error of 5.12%.

Key words: parent seed; selection and grading; pneumatic conveying; Venturi seed-mixing device; CFD－DEM

0　引言

精选分级能够提高种子品质和净度，是育种工作的重要环节[1－3]。通过气力输送实现种子在种子加工生产线各个设备间的转移是目前常用的技术方法[4－5]，具有高效、便捷等优点，能够实现无残留亲本种子输送，提高种子净度。

近年来，计算机仿真分析方法在农业工程领域应用越来越广泛[6－11]。在种子流运动规律、混种装置以及气力输送系统等研究中，常采用 CFD－DEM 数值分析方法，进行参数优化设计[12－16]。王磊等[17]设计了基于文丘里原理的混种部件，降低了油菜籽倒流率，为气送式集排器混种部件的结构改进提供参考。廖宜涛等[18]设计了一种突扩文丘里结构的高通量混种装置，油菜在 4.8 g/s 以内、小麦在 120 g/s 以内的通量范围内未出现回流。WANG 等[19]分析了 6 种不同结构的混合部件对种子运动轨迹、分布均匀性的影响，旨在避免种子回流和滞留。

文丘里式混合方法具有结构简单、安全可靠等优点，已在播种机气送混种部件设计与试验验证[20－21]、基于文丘里负压吸入的施肥混合装置设计与试验[22－23]，以及气固稀相气力输送系统中引射混合器的分析与优化等方面[24]得到成熟应用。在这些研究中，压力损失及混合均匀性作为评价指标，关于物料的滞留问题研究较少。

为此，本文围绕玉米亲本种子精选分级生产线气力输送系统，以减少种子滞留为目标，设计文丘里混种装置。对混种装置内种子流运动进行理论分析，采用 CFD－DEM 仿真方法，分别开展单因素和多因素试验研究，建立种子平均速度和质量回归模型，通过参数优化设计，得到最优参数组合，并采用高速摄像系统对仿真结果进行验证。

1　玉米亲本种子无残留气力输送系统总体方案

玉米亲本种子精选分级装置结构如图 1 所示，主要由控制柜、储料仓、振动筛、无残留气力输送系统、回收风机、除尘系统、输送风机、色选机以及料仓等部件组成。包括色选机 2 台，可实现 3 级种子分级。玉米亲本种子在振动筛完成分级后，通过无残留气力输送系统进入色选机完成品质筛选。

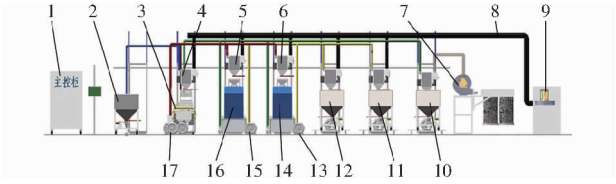


图 1　玉米亲本种子精选分级装置结构示意图

Fig. 1　Structural schematic of maize parent seed selection and grading device

1. 控制柜　2. 储料仓　3. 振动筛　4. 振动筛无残留气力输送系统　5、6. 色选机无残留气力输送系统　7. 回收风机　8. 除尘管道　9. 除尘风机　10. 坏种料仓　11、12. 好种料仓　13、17. 输送风机　14、16. 色选机　15. 输送风机

气力输送系统是玉米亲本种子精选分级装置的关键部件，实现玉米亲本种子在精选分级装置各个设备间的转移。系统结构如图 2 所示，主要由输送风机、文丘里混种装置、振动筛、输送管道、缓存箱及色选机等零部件组成。种子从振动筛出料口进入文丘里混种装置，与输送风机气流混合，形成种子流，通过运输管道进入到缓存箱和色选机。文丘里混种装置通过收缩段结构设计，在混种区产生负压，实现种子快速混合，能够有效减少种子滞留。

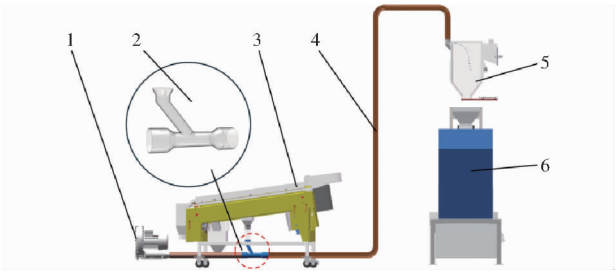


图 2　亲本种子无残留气力输送系统结构示意图

Fig. 2　Schematic of residue-free pneumatic conveying system for parental seeds

1. 输送风机　2. 文丘里混种装置　3. 振动筛　4. 输送管道　5. 缓存箱　6. 色选机

2　文丘里混种装置结构设计与分析

2.1　文丘里混种装置结构设计与计算

文丘里混种装置由收缩段、进种段、混种段与扩散段 4 部分组成，如图 3 所示。d_1、d_2和 d_3分别为入口(出口)段、收缩段、进种段直径。L_1 和 L_2 分别为收缩段长度和进种口位置，α_1 和 α_2为进种段与收缩段角度。

根据气固两相输送中输送浓度比的定义与气相体积流量表达式[25]，关于入口段直径的计算公式为

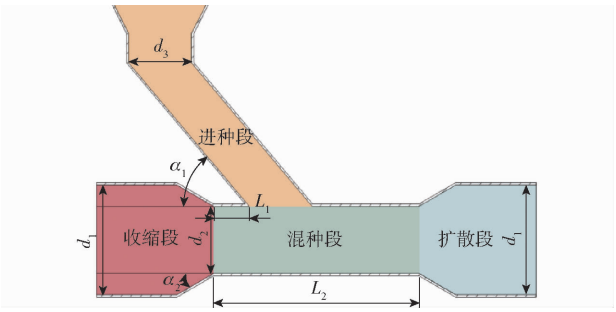


图 3 文丘里混种装置结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of Venturi seed mixing device

$$\begin{cases} m_a = \dfrac{m_s}{\mu_s} \\ Q_a = \dfrac{m_a}{\rho_g} \\ d_1 = \sqrt{\dfrac{4Q_a}{\pi v_g}} \end{cases} \tag{1}$$

式中 m_s——种子质量流量,取 0.2 kg/s

m_a——空气质量流量,kg/s

μ_s——输送浓度比,取 1.3

Q_a——空气体积流量,m^3/s

ρ_g——空气密度,取 1.225 kg/m^3

v_g——空气速度,取 30 m/s

由式(1)得出 d_1 为 73.01 mm,综合加工考虑,进出口管径取 74 mm。

为使收缩段出口(混种段直径)形成较强射流并兼顾压损,参考增压管结构中基于可压缩气流能量方程的出口直径计算形式,收缩出口直径可表示为

$$d_2 = 640\sqrt{\frac{m_a}{\pi\sqrt{\dfrac{2\gamma p_a \rho_g}{\gamma-1}\left(\dfrac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{2}{\gamma}}\left[1-\left(\dfrac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}}} \tag{2}$$

式中 p_a——进口总压,Pa

p_b——收缩段出口静压,Pa

γ——空气比热比,取 1.4

由式(2)得收缩段最优直径 d_2 为 48 mm。综合考虑结构匹配、负压能力与滞留风险,并预留优化空间,本文选取 d_2 的取值范围为 44 ~ 52 mm。

采用进种管与混种段尺寸相匹配的技术思路,将进种段直径 d_3 取为与吸入截面相同的尺寸,以保证通过性,最终取 d_3 为 43 mm。

为便于后续流场参数优化试验,选取对混种段负压区形成及种子受力过程影响较大的 5 个结构参数作为优化变量:倾斜进种段角度 α_1、收缩段角度 α_2、混种段长度 L_1、进种口位置 L_2 以及混种段直径 d_2。

2.2 文丘里混种装置流场参数计算

文丘里混种装置内的种子流运动主要受气流速度场与压力场影响[26]。流场在交汇区域形成局部低压使种子从进种段进入混种段。其气相连续方程与动量守恒方程可为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\varepsilon_g\rho_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g) = 0 \\ \dfrac{\partial(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g\otimes\boldsymbol{v}_g) = \\ \qquad -\varepsilon_g\nabla p + \nabla(\varepsilon_g\boldsymbol{\tau}_g) + \varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{g} - \boldsymbol{S}_{gp} \end{cases} \tag{3}$$

式中 ε_g——气相体积分数

$\boldsymbol{v}_g$——空气速度矢量,m/s

p——静压,Pa

$\boldsymbol{\tau}_g$——黏性应力张量,Pa

$\boldsymbol{g}$——重力加速度,m/s^2

$\boldsymbol{S}_{gp}$——气固动量交换源项,N/m^3

为得到喉部区域速度增大与负压形成的量级,沿中心流线做稳态处理。由连续性方程可得

$$A_1 v_1 \rho_g = A_2 v_2 \rho_g \Rightarrow v_2 = v_1\frac{A_1}{A_2} = v_1\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \tag{4}$$

式中 A_1——收缩段截面积,m^2

A_2——混种段截面积,m^2

v_1——收缩段入口截面平均速度,m/s

v_2——混种段直径平均速度,m/s

进一步由伯努利方程得到收缩段入口到混种段的压降

$$\Delta p_{12} = p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho_g(v_2^2 - v_1^2) \tag{5}$$

式中 Δp_{12}——入口至最小截面的静压差,Pa

p_1——入口静压,Pa

p_2——最小截面静压,Pa

根据入口速度 v_1(30 m/s)与空气密度 ρ_g(1.225 kg/m^3),由式(4)得出 v_2 为 71.3 m/s,由式(5)得出 Δp_{12} 约为 2.56×10^3 Pa。因此,喉部可形成千帕量级的稳定低压区,为种子吸入与主气流裹挟加速提供压力驱动力。

为保证湍流模型选择与工况一致,按入口参数计算雷诺数 Re

$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \tag{6}$$

式中 μ_g——空气动力黏度,取 1.79×10^{-5} Pa·s

由式(6)得出收缩段截面雷诺数 Re_1 约为 1.52×10^5,混种段截面雷诺数 Re_2 约为 2.34×10^5,表明装置主流处于充分湍流区间,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型具有合理性。

2.3 文丘里混种装置种子受力分析

将文丘里混种装置内的种子受力分为 2 部分:

进种段、混种段，对种子进行受力分析，如图 4 所示。种子进入进种段前具有向下 2 m/s 的初速度，种子主要在重力分量与诱导气流造成的气动力共同作用下被吸入主流。其受力方程为

$$\begin{cases} m_p \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_p}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{G} + \boldsymbol{F}_b + \boldsymbol{F}_D + \boldsymbol{F}_{\nabla p} \\ G_s = m_p g \sin\alpha_1 \\ G_n = m_p g \cos\alpha_1 \\ \boldsymbol{F}_b = -\rho_g V_p \boldsymbol{g} \\ \boldsymbol{F}_D = \dfrac{1}{2} C_D \rho_g A_p |\boldsymbol{v}_g - \boldsymbol{v}_p| \boldsymbol{u}_r \\ \boldsymbol{F}_{\nabla p} = -V_p \nabla p \end{cases} \tag{7}$$

式中　m_p——单粒种子质量，kg

$\boldsymbol{F}_b$——浮力，N

$\boldsymbol{F}_D$——气动力，N

$\boldsymbol{F}_{\nabla p}$——压力梯度力，N

V_p——种子体积，m^3

A_p——迎风投影面积，m^2

$\boldsymbol{v}_p$——种子速度，m/s

$\boldsymbol{u}_r$——相对速度，m/s

G——种子重力，N

G_s——重力沿切向的分力，N

G_n——重力沿法向的分力，N

C_D——种子颗粒气动阻力系数

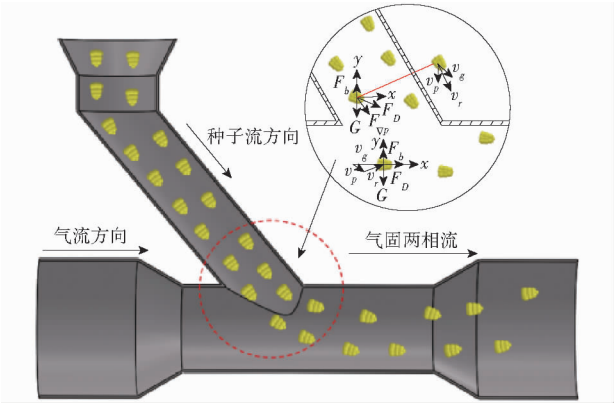


图 4　文丘里混种装置种子受力示意图

Fig. 4　Schematic of forces acting on seeds in Venturi seed mixing device

交汇处的气流强弱由压力场决定，记交汇处压力为 p_j，进种段上游近似为环境压力 p_{amb}。诱导气流速度尺度 v 可用压差驱动形式表征为

$$v \approx \sqrt{\frac{2(p_{amb} - p_j)}{\rho_g}} \tag{8}$$

因此，L_2 通过改变进种口与低压区的相对位置直接影响 p_j，为覆盖关键交汇位置并满足结构布置空间，取 L_2 为 0 ~ 40 mm。

种子进入混种段后，主导其加速与随流的仍为式(7)所示的气动力与重力。混种段尺寸 d_2、L_1 会直接改变气相平均速度水平与沿程损失，进而改变 $\boldsymbol{u}_r$ 与 $\boldsymbol{F}_D$。

在给定空气质量流量 m_a 下，平均速度尺度满足

$$\bar{v}_g = \frac{m_a}{\rho_g A_2} = \frac{4 m_a}{\rho_g \pi d_2^2} \tag{9}$$

式中　$\bar{v}_g$——混种段截面平均气相速度

从而 $\boldsymbol{u}_r$ 与 $\boldsymbol{F}_D$ 随 d_2 增大呈减弱趋势。

混种段沿程摩擦压降 Δp_f 可用常见的管流压损公式表达为

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L_1}{d_2} \frac{\rho_g \bar{v}_g^2}{2} \tag{10}$$

式中　λ——摩擦阻力系数

式(10)表明：L_1 增大会增强沿程压降、拉长低压区，使种子在气动力作用下的驻留时间增加，结合总体尺寸布置与管路连接条件，取 L_1 为 100 ~ 140 mm；而 d_2 同时通过式(9)改变速度尺度，通过式(10)改变压损水平，进而改变 $\boldsymbol{u}_r$。

综上，进种段角度 α_1 通过重力分解影响吸入稳定性，收缩段角度 α_2 与距离 L_2 共同决定交汇低压区的幅值与位置，混种段长度 L_1 与直径 d_2 影响混种段内种子加速过程。

3　文丘里混种装置参数优化仿真试验

为探究文丘里混种装置结构参数对其工作性能的影响，应用 CFD 流场仿真分析以及 CFD－DEM 耦合仿真分析得出不同参数对种子平均速度和质量的影响。

3.1　仿真参数设置

应用 EDEM 2021.2 和 ANSYS Fluent 2021R1 软件开展文丘里混种装置气固耦合仿真，采用非结构化方法自动划分网格[27-28]，文丘里混种装置仿真模型如图 5 所示。分别设置速度入口、压力出口。

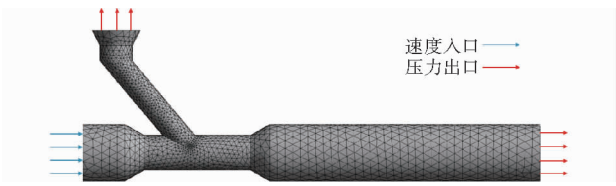


图 5　文丘里混种装置仿真模型

Fig. 5　Simulation model for Venturi seed mixing device

参考 SONG 等[29]的研究，选取其建立的玉米种子离散元模型作为本文颗粒模型，如图 6 所示。

CFD－DEM 耦合仿真中 CFD 部分边界条件分别设置为速度入口与压力出口，速度入口气流速度设置为 30 m/s，压力出口压强设置为 0；EDEM 部分中玉米亲本种子颗粒模型长、宽、厚为 10.74、8.14、4.31 mm，进种段压力出口命名为颗粒工厂，颗粒工

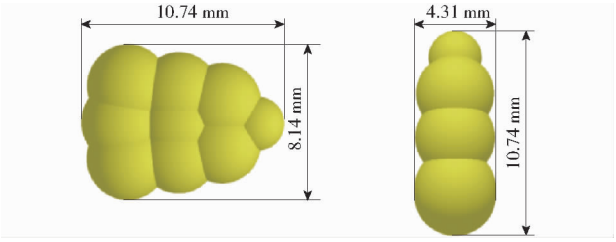


图 6 玉米亲本种子离散元颗粒模型

Fig. 6 DEM particle model of maize parent seed

厂类型为 Dynamic/unlimited number，颗粒生成速度设置为 0.20 kg/s。结合已有研究[10,29]，CFD－DEM 耦合仿真计算参数如表 1 所示。

表 1 CFD－DEM 仿真计算参数

Tab. 1 CFD－DEM simulation parameters

类型	项目	参数	数值
材料参数	空气	密度/(kg·m^{-3})	1.225
		黏度/(Pa·s)	1.79×10^{-5}
	有机玻璃	密度/(kg·m^{-3})	1 200
		泊松比	0.35
		剪切模量/MPa	160
	玉米种子	泊松比	0.4
		剪切模量/MPa	137
		密度/(kg·m^{-3})	1 197
接触参数	玉米种子-玉米种子	恢复系数	0.182
		静摩擦因数	0.431
		滚动摩擦因数	0.078
	玉米种子-有机玻璃	恢复系数	0.621
		静摩擦因数	0.459
		滚动摩擦因数	0.093

3.2 单因素试验

各结构参数水平范围的确定综合考虑了装置几何装配约束、流场计算结果以及种子受力分析结论。根据已有研究[21]，进种段角度 α_1 为 53.41°时为最优参数，本研究在此基础上将 α_1 的考察范围扩展为 50°～90°。根据已有研究[21]，收缩段角度 α_2 为 8°～12°；另有研究[18]对收缩段角度设置为 30°，因此本研究在此基础上将 α_2 的考察范围扩展为 10°～50°。各因素水平设置见表 2。

表 2 结构参数水平

Tab. 2 Structural parameters levels

水平	进种段角度 α_1/(°)	收缩段角度 α_2/(°)	混种段长度 L_1/mm	进种口位置 L_2/mm	混种段直径 d_2/mm
1	50	10	100	0	44
2	60	20	110	10	46
3	70	30	120	20	48
4	80	40	130	30	50
5	90	50	140	40	52

在 CFD 模拟中，提取装置横向中心线上的压力分布数据，并计算混种段区域的平均压力，用于对比不同结构参数条件下负压区的形成位置与强度变化规律。为保证结果可比性，在混种装置相同轴向位置选取同一横截面作为压力观测面，且各压力云图采用统一色标范围。

3.2.1 进种段角度对文丘里混种装置压力变化的影响

如图 7 所示，对于不同进种段角度 α_1，混种段均能形成连续负压区，但随着 α_1 增大，负压区的覆盖范围逐渐收缩，负压强度变小。图 8 为进种段角度对混种段压力影响，当角度为 50°时，压力为 －894 Pa，当角度为 90°时，压力升至 －503 Pa，表明增大 α_1 会削弱混种段负压吸入能力。

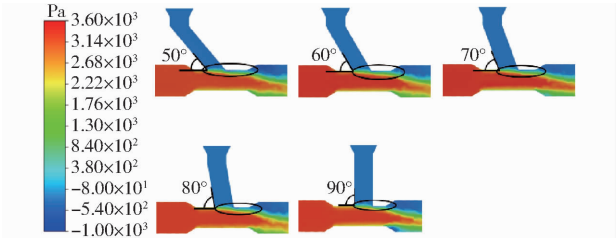


图 7 不同进种段角度时混种段压力云图

Fig. 7 Pressure contours in mixing section at different seed-inlet section angles

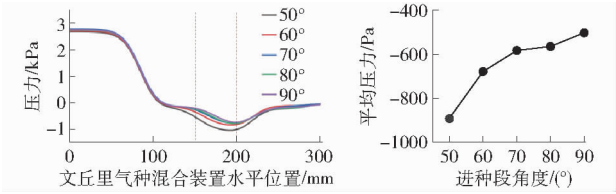


图 8 不同进种段角度时混种段压力变化曲线

Fig. 8 Pressure variation curves in mixing section for different seed-inlet section angles

3.2.2 收缩段角度对文丘里混种装置压力变化的影响

如图 9 所示，对于不同收缩段角度 α_2，混种段低压带的范围随 α_2 变化并不明显。图 10 表明，当角度 α_2 为 10°时混种段平均压力约为 －734 Pa，当 α_2 为 50°时约为 －586 Pa，变化幅度有限。

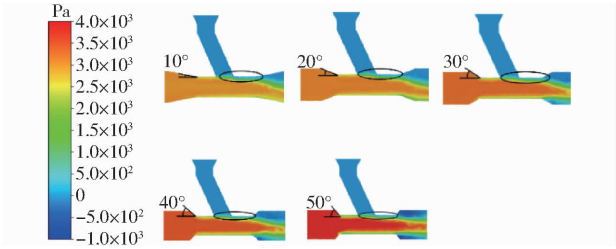


图 9 不同收缩段角度时混种段压力云图

Fig. 9 Pressure contours in mixing section for different converging-section angles

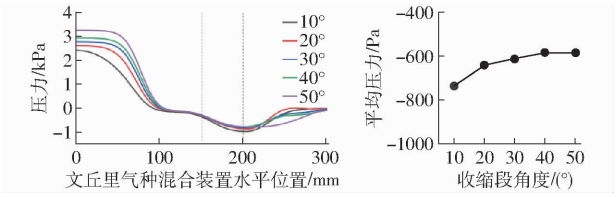


图 10　不同收缩段角度时混种段压力变化曲线

Fig. 10　Pressure variation curves in mixing section for different converging-section angles

3.2.3　混种段长度对文丘里混种装置压力变化的影响

如图 11 所示，对于不同混种段长度 L_1，混种段的低压带随 L_1 变化并不明显。图 12 表明，当 L_1 为 100 mm 时混种段平均压力约为 −852 Pa，当 L_1 为 140 mm 时约为 −808 Pa，变化幅度有限。

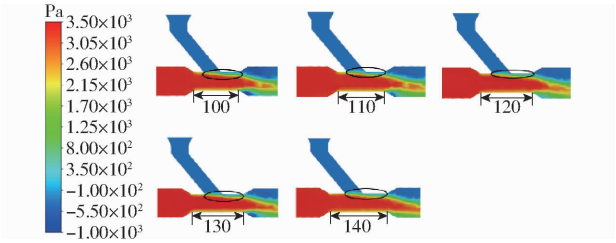


图 11　不同混种段长度时混种段压力云图

Fig. 11　Pressure contours in mixing section for different mixing-section lengths

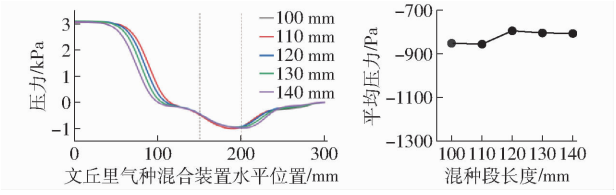


图 12　不同混种段长度时混种段压力变化曲线

Fig. 12　Pressure variation curves in mixing section for different mixing-section lengths

3.2.4　进种口位置对文丘里混种装置压力变化的影响

如图 13 所示，对于不同进种口位置 L_2，混种段低压带的覆盖范围随 L_2 变化明显。图 14 表明，当 L_2 为 0 mm 时混种段平均总压约为 −890 Pa，随着 L_2 的增长，压力呈先减后增的趋势，且在 30 mm 处达到最小值（−1 269 Pa）。

3.2.5　混种段直径对文丘里混种装置压力变化的影响

如图 15 所示，对于不同混种段直径 d_2，低压带的覆盖范围与强度差异显著。图 16 为混种段直径对混种段总压的影响，当 d_2 为 44 mm 时混种段平均总压约为 −891 Pa，当 d_2 为 52 mm 时升至约 −489 Pa，呈明显上升趋势。

综合以上 5 组单因素试验结果可知，进种段角度 α_1、进种口位置 L_2 以及混种段直径 d_2 对负压带

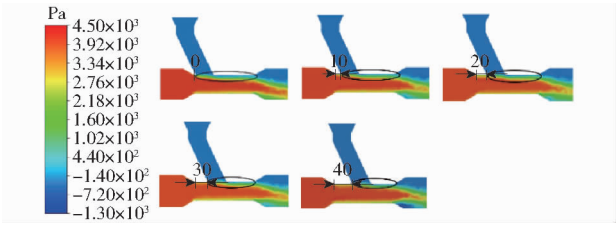


图 13　不同进种口位置时混种段压力云图

Fig. 13　Pressure contours in mixing section for different seed-inlet positions

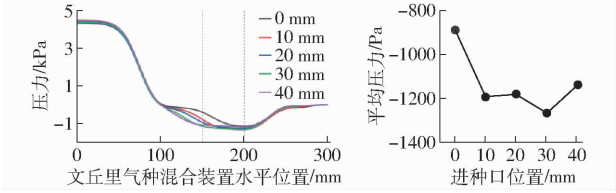


图 14　不同进种口位置时混种段压力变化曲线

Fig. 14　Pressure variation curves in mixing section for different seed-inlet positions

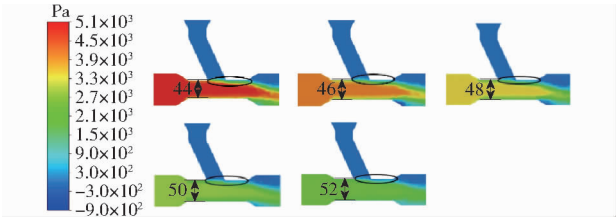


图 15　不同混种段直径时混种段压力云图

Fig. 15　Pressure contours in mixing section for different mixing-section diameters

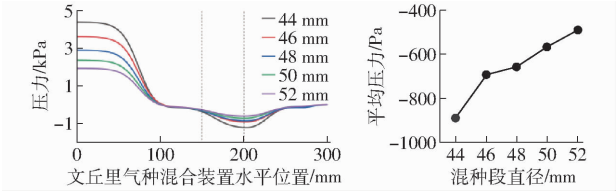


图 16　不同混种段直径时混种段压力变化曲线

Fig. 16　Pressure variation curves in mixing section for different mixing-section diameters

的范围与混种段平均总压影响更为显著，属于后续正交试验需重点考察的关键因素；收缩段角度 α_2 与混种段长度 L_1 对平均压力的调节幅度较小，属于一般影响因素。因此，后续参数优化围绕 α_1、L_2、d_2 的显著性及其交互作用开展，并在兼顾结构约束与压降损失的基础上确定 α_2 为 30°以及 L_1 为 140 mm 作为后续仿真与试验的基准水平。

3.3　参数优化仿真试验

3.3.1　试验指标参数与计算方法

本研究参考文献[21]选取平均种子出口速度与平均质量流量作为性能评价目标，用于结构参数优化。仿真总时长设置为 6 s，通过 EDEM 后处理模块，分别统计文丘里混种装置在试验稳定后 1 ~ 6 s 内通过选定区域的出口种子质量流量 Y_1，计算式为

$$Y_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i}{t} \tag{11}$$

式中 Y_1——出口种子质量流量,g/s

m_i——第 i 粒通过截面的种子质量,g

N——通过截面的种子总粒数,个

t——试验测试时间,s

种子出口速度也会对气力输送系统产生较大影响。通过 EDEM 后处理模块,统计 1 ~ 6 s 内经过选定区域的玉米种子出口种子平均速度 Y_2,计算式为

$$Y_2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i \tag{12}$$

式中 Y_2——种子出口种子平均速度,m/s

v_i——第 i 粒通过截面的种子速度,m/s

3.3.2 Box - Behnken 响应曲面试验设计与结果

应用 Design-Expert 13.0 软件,在单因素试验的基础上,对进种段角度 α_1、进种口位置 L_2、混种段直径 d_2进行 Box - Behnken 响应曲面试验设计,种子出口速度和通过质量仿真结果如图 17 所示,以出口的种子质量流量 Y_1和平均速度 Y_2为试验指标,确定文丘里混种装置的最优参数组合。试验因素及编码如表 3 所示。试验方案和结果如表 4 所示,其中 X_1、X_2、X_3分别为进种段角度 α_1、进种口位置 L_2以及混种段直径 d_2的编码值。

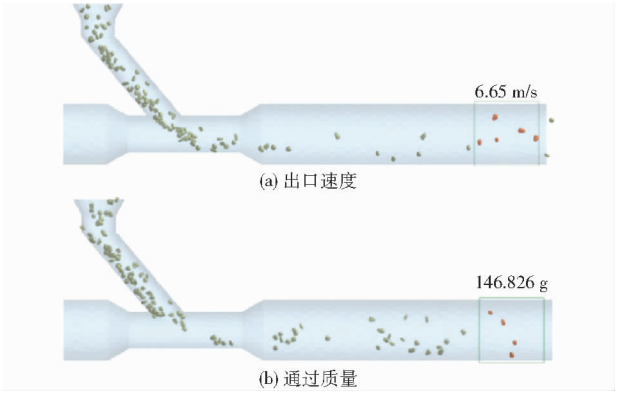


图 17 种子出口速度和通过质量仿真图

Fig. 17 Simulation results of seed outlet velocity and cumulative passed mass

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors code

编码	进种段角度 α_1/(°)	进种口位置 L_2/mm	混种段直径 d_2/mm
-1	50	0	44
0	70	20	48
1	90	40	52

3.3.3 回归模型建立与方差分析

应用 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行多元回归拟合分析,并对试验结果进行方差分析,得到出口种子质量流量 Y_1、出口种子平均速度 Y_2与进种段角度 α_1、进种口位置 L_2、混种段直径 d_2之间的数学模型,检验其显著性。

表 4 试验设计方案与结果

Tab. 4 Experimental design program and results

序号	试验因素			Y_1/(g·s^{-1})	Y_2/(m·s^{-1})
	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	-1	137.34	4.19
2	0	0	0	124.34	5.56
3	0	-1	-1	93.79	5.46
4	-1	-1	0	131.75	5.78
5	-1	0	-1	165.07	5.55
6	0	0	0	124.23	5.77
7	0	-1	1	106.00	5.14
8	0	0	0	126.49	5.57
9	1	0	-1	92.45	4.87
10	1	-1	0	99.11	4.65
11	-1	-1	1	130.35	5.88
12	0	-1	0	131.61	5.67
13	0	-1	0	131.80	5.69
14	-1	1	0	130.48	5.94
15	0	1	-1	95.22	5.53
16	0	1	1	115.57	4.92
17	1	1	0	104.27	4.60

3.3.3.1 出口种子质量流量 Y_1

对响应指标出口种子质量流量进行响应面方差分析,结果如表 5 所示,模型极显著。主效应显著性主次排序为:进种段角度 α_1(极显著)、混种段直径 d_2(显著)、进种口位置 L_2(不显著)。在交互作用中进种段角度与混种段直径的交互作用($P < 0.000\ 1$)对出口种子质量流量具有极显著影响。对 17 组响应面试验结果进行回归拟合分析后,得到 Y_1的回归方程为

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & 127.69 - 15.56X_1 + 1.86X_2 + 5.34X_3 + \\ & 1.61X_1X_2 + 19.90X_1X_3 + 2.04X_2X_3 + \\ & 8.68X_1^2 - 19.97X_2^2 - 5.07X_3^2 \end{aligned} \tag{13}$$

3.3.3.2 出口种子平均速度 Y_2

对出口种子流速度进行响应面方差分析,结果如表 5 所示,模型极显著($P < 0.000\ 1$)。主效应显著性主次排序为:进种段角度 α_1(极显著)、混种段直径 d_2(显著)、进种口位置 L_2(不显著)。在交互作用中进种段角度与混种段直径的交互作用($P = 0.002\ 3 < 0.01$)对出口种子流速度具有极显著影响。Y_2的回归方程为

$$\begin{aligned} Y_2 = {} & 5.65 - 0.605\ 0X_1 - 0.005\ 0X_2 - 0.160\ 0X_3 - \\ & 0.052\ 5X_1X_2 - 0.252\ 5X_1X_3 - 0.072\ 5X_2X_3 - \\ & 0.274\ 8X_1^2 - 0.134\ 8X_2^2 - 0.254\ 7X_3^2 \end{aligned} \tag{14}$$

3.3.4 响应面分析与参数优化

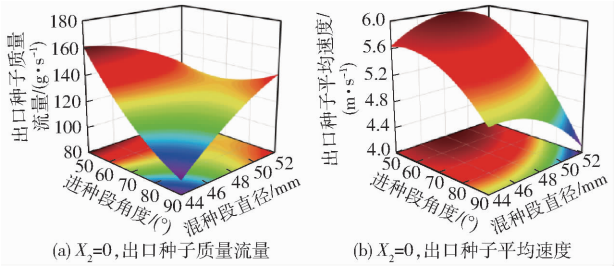
图 18a 表示进种段角度与混种段直径对出口种

表 5　出口种子质量流量及平均速度的回归模型方差分析

Tab. 5　ANOVA for regression models of seed outlet mass flow rate and mean outlet velocity

方差来源	方差和		自由度		均方差		F		P	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
模型	5 867. 72	4. 16	9	9	651. 97	0. 462	34. 67	39. 14	<0. 000 1 **	<0. 000 1 **
X_1	1 936. 91	2. 93	1	1	1 936. 91	2. 93	103. 01	248. 06	<0. 000 1 **	<0. 000 1 **
X_2	27. 71	0. 000 2	1	1	27. 71	0. 000 2	1. 47	0. 016 9	0. 264 1	0. 900 1
X_3	228. 23	0. 204 8	1	1	228. 23	0. 204 8	12. 14	17. 35	0. 010 2 *	0. 004 2 **
X_1X_2	10. 34	0. 011	1	1	10. 34	0. 011	0. 549 7	0. 934	0. 482 6	0. 366 0
X_1X_3	1 584. 44	0. 255	1	1	1 584. 44	0. 255	84. 26	21. 6	<0. 000 1 **	0. 002 3 **
X_2X_3	16. 56	0. 021	1	1	16. 56	0. 021	0. 881	1. 78	0. 379 2	0. 223 8
X_1^2	317. 45	0. 317 8	1	1	317. 45	0. 317 8	16. 88	26. 93	0. 004 5 **	0. 001 3 **
X_2^2	1 679. 92	0. 076 5	1	1	1 679. 92	0. 076 5	89. 34	6. 48	<0. 000 1 **	0. 038 4 *
X_3^2	108. 42	0. 273 3	1	1	108. 42	0. 273 3	5. 77	23. 15	0. 047 4 *	0. 001 9 **
残差	131. 62	0. 082 6	7	7	18. 8	0. 011 8				
失拟项	74. 73	0. 051 8	3	3	24. 91	0. 017 3	1. 75	2. 23	0. 294 8	0. 226 5
纯误差	56. 89	0. 030 9	4	4	14. 22	0. 007 7				
总和	5 999. 34	4. 24	16	16						

注：* 表示影响显著（0. 01≤P<0. 05）；** 表示影响极显著（P<0. 01）。



(a) X_2=0，出口种子质量流量　　(b) X_2=0，出口种子平均速度

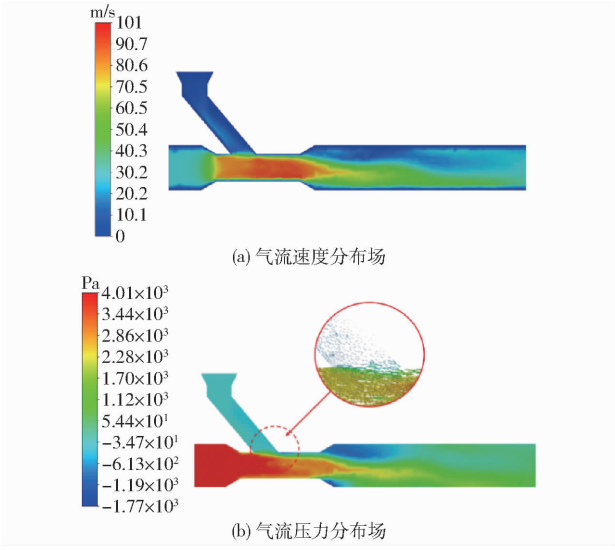
图 18　因素交互作用对测试指标影响的响应面

Fig. 18　Response surface plots showing effects of factor interactions on test indices

子质量流量影响响应面图。从图中可以看出，出口种子质量流量随着进种段角度与混种段直径的改变而显著变化。随着进种段角度的增加出口种子质量流量呈现出逐渐降低的趋势，所以当进种段角度为50°时可获得最大出口种子质量流量。即随着混种段直径从 44 mm 升高至 52 mm，出口种子质量流量的变化取决于进种段角度，当进种段角度在 50° ~ 60°时出口种子质量流量逐渐减小，而当进种段角度在 70° ~90°时出口种子质量流量逐渐增大。当混种段直径在 50 ~ 52 mm 范围时出口种子质量流量可稳定在 120 ~ 140 g/s。响应面呈现一定弯曲角度表示该交互作用对试验结果出口种子质量流量影响显著，这与方差分析结果相一致。

图 18b 是进种段角度与混种段直径对出口种子平均速度影响的响应面图。从图中可以看出，出口种子平均速度随着进种段角度与混种段直径的改变而显著变化。随着进种段角度从 50°增加到 90°，出口种子平均速度表现出逐渐降低的趋势，当进种段角度在 50° ~ 70°范围内时可维持出口种子平均速度在 5. 5 m/s。而混种段直径从 44 mm 升高至 52 mm 时，出口种子平均速度并未呈现出明显变化。响应曲面表明进种段角度与混种段直径对出口种子平均速度影响显著。

依据响应曲面模型良好的拟合结果，当进种段角度达到 50°、进种口位置为 20. 902 mm、混种段直径为 46. 468 mm 时，理论上能够获取最佳出口种子质量流量为 156. 705 g/s，出口种子平均速度为 5. 913 m/s。为验证该预测结果的可靠性，将实际参数调整至进种段角度为 50°、进种口位置为 21 mm、混种段直径为 46 mm。如图 19 所示，在最优结构参数条件下，装置内部气流速度场和压力场分布均匀，流场有序稳定，无回流现象。经 DEM 后处理测量，在最优参数组合条件下所获得的出口种子质量流量



(a) 气流速度分布场

(b) 气流压力分布场

图 19　气流速度场与压力场

Fig. 19　Airflow velocity and pressure fields

为 156.42 g/s,出口种子平均速度为 5.92 m/s。

4 台架验证试验

为了验证仿真试验中最优结构文丘里混种装置的可行性与实用性,在郑州度风科技有限公司搭建台架进行文丘里混种装置试验验证。

4.1 材料与设备

搭建的试验台架如图 20 所示,采用 3D 打印的方法加工文丘里混种装置。其余试验仪器与设备包括输送风机、编织袋、电子天平、振动筛、秒表和千眼狼 X213 - M 型高速摄影机等。

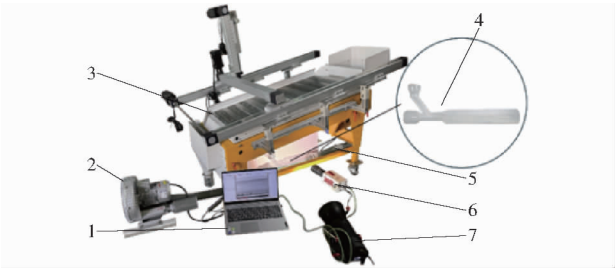


图 20 文丘里混种装置台架试验系统

Fig. 20 Bench test setup for Venturi seed mixing device

1. 上位机 2. 输送风机 3. 振动筛 4. 文丘里混种装置 5. 连接管道 6. 高速摄影机 7. 补光灯

4.2 试验方案

将主气流速度设定为 30 m/s,并在振动筛供种稳定后进行测量。种子出口速度的测量如图 21 所示,采用高速摄影机记录种子在扩散段后直管内的运动过程;每次随机选取 5 粒种子计算平均速度,重复 5 次取平均值作为试验指标。出口种子质量流量采用编织袋收集出口种子并称量,按单位时间换算得到种子质量流量,重复 5 次。

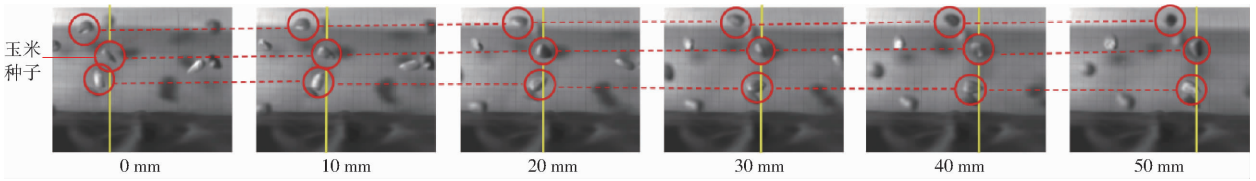


图 21 台架试验测量种子移动速度示意图

Fig. 21 Schematic of seed velocity measurement in bench test

4.3 试验结果

试验结果见表 6,出口种子平均速度为 6.16 m/s,与仿真值 5.92 m/s 相比,均值相对误差为 4.09%;出口种子质量流量为 164.43 g/s,与仿真值 156.42 g/s 相比,均值相对误差为 5.12%。每组试验结束后关闭风机并拆检文丘里管内部,未发现种子滞留或可见残留。仿真预测与试验结果吻合较好,说明所建模型及优化参数具有一定可靠性,为结构优化提供依据。其中误差主要来源于:仿真边界条件与供料为理想稳态,而台架风机与供料存在波动及管路损失,3D 打印壁面粗糙度导致碰撞摩擦,以及仿真统计与台架试验采样方法不同带来的统计误差。

表 6 台架试验结果

Tab. 6 Bench test results

序号	质量流量		平均速度	
	试验值/($g \cdot s^{-1}$)	相对误差/%	试验值/($m \cdot s^{-1}$)	相对误差/%
1	164.38	5.09	6.28	6.08
2	169.43	8.32	6.21	4.90
3	158.61	1.40	5.79	2.20
4	160.87	2.84	6.16	4.05
5	168.85	7.95	6.37	7.60

5 结论

(1)针对玉米亲本种子精选分级过程中种子滞留问题,提出文丘里负压吸入与混种的技术思路,设计了文丘里混种装置;计算了文丘里混种装置内部流场参数,并对种子进行了动力学分析,确定了装置关键几何参数及结构参数范围。

(2)采用 CFD - DEM 耦合仿真方法,通过单因素试验分析了进种段角度、收缩段角度、混种段长度、进种口位置和混种段直径对内部负压区域形成的影响规律,并确定了关键影响因素:进种段角度、进种口位置及混种段直径。通过 Box - Behnken 响应曲面试验建立了进种段角度、混种段直径、进种口位置与出口种子平均速度、质量流量的回归模型,并得到了最优参数组合:进种段角度为 50°、进种口位置为 21 mm、混种段直径为 46 mm。

(3)通过玉米亲本种子精选分级系统试验台架开展了实际工况下的文丘里混种装置性能验证试验,结果表明:文丘里混种装置出口种子平均速度为 6.16 m/s,相对误差为 4.09%;种子质量流量为 164.43 g/s,相对误差为 5.12%,表明仿真试验的结果可靠,该装置可在保证混合稳定性的同时兼顾压损与输送能力。

参 考 文 献

[1] 朱明，陈海军，李永磊. 中国种业机械化现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报，2015，31(14)：1－7.
ZHU Ming，CHEN Haijun，LI Yonglei. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(14)：1－7.（in Chinese）

[2] 尚书旗，吴秀丰，杨然兵，等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：1－20.
SHANG Shuqi，WU Xiufeng，YANG Ranbing，et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(2)：1－20.（in Chinese）

[3] 尚书旗，杨然兵，殷元元，等. 国际田间试验机械的发展现状及展望[J]. 农业工程学报，2010，26(增刊 1)：5－8.
SHANG Shuqi，YANG Ranbing，YIN Yuanyuan，et al. Current situation and development trend of mechanization of field experiments[J]. Transactions of the CSAE，2010，26(Supp. 1)：5－8.（in Chinese）

[4] 李继伟，袁文胜，翟欢乐，等. 气力输送技术在农业机械中的应用[J]. 中国农机化学报，2023，44(1)：85－92,115.
LI Jiwei，YUAN Wensheng，ZHAI Huanle，et al. Application of pneumatic conveying in agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(1)：85－92,115.（in Chinese）

[5] 高筱钧，王世同，吴晓鹏，等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 1)：47－56,75.
GAO Xiaojun，WANG Shitong，WU Xiaopeng，et al. Seed flow nigration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp. 1)：47－56,75.（in Chinese）

[6] 赵宏波，王学振，郑智旗，等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：1－19.
ZHAO Hongbo，WANG Xuezhen，ZHENG Zhiqi，et al. Research status and progress of discrete element method applications[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(7)：1－19.（in Chinese）

[7] 曾智伟，马旭，曹秀龙，等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：1－20.
ZENG Zhiwei，MA Xu，CAO Xiulong，et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(4)：1－20.（in Chinese）

[8] LEI Xiaolong，LIAO Yitao，ZHANG Qingsong，et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2018，150：98－109.

[9] 李晓冉，廖庆喜，王磊，等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(14)：35－48.
LI Xiaoran，LIAO Qingxi，WANG Lei，et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice，wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(14)：35－48.（in Chinese）

[10] LI H，YANG L，ZHANG D，et al. Design and optimization of a high-speed maize seed guiding device based on DEM－CFD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2024，227：109604.

[11] 肖瑶，吴明亮. 计算流体力学在农业工程中的应用现状与发展趋势[J]. 中国农业科技导报，2023，25(8)：1－9.
XIAO Yao，WU Mingliang. Application status and development trend of computational fluid dynamics in agricultural engineering[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2023，25(8)：1－9.（in Chinese）

[12] 李衍军，刘瑞，刘春晓，等. 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 Yanjun，LIU Rui，LIU Chunxiao，et al. 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）

[13] 付作立，李贵川，李海宇，等. 荞麦播种机气力集排系统螺旋式增压管设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：37－45,69.
FU Zuoli，LI Guichuan，LI Haiyu，et al. Design and test of spiral booster pipe for pneumatic collecting and discharging system of buckwheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(12)：37－45,69.（in Chinese）

[14] 刘浩，马瑞，孙雪峰，等. CFD－DEM 方法研究下降管结构对颗粒流动的影响[J]. 农业工程学报，2024，40(13)：205－213.
LIU Hao，MA Rui，SUN Xuefeng，et al. Effect of down-tube structure on particle flow by CFD－DEM method[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(13)：205－213.（in Chinese）

[15] 张青松，郑中原，廖庆喜，等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：20－37，149.
ZHANG Qingsong，ZHENG Zhongyuan，LIAO Qingxi，et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(7)：20－37，149.（in Chinese）

[16] 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.

[17] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68 - 79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68 - 79, 97. (in Chinese)

[18] 廖宜涛, 王传奇, 施彬彬, 等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 134 - 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134 - 146. (in Chinese)

[19] WANG L, LIAO Y, LI M, et al. Motion characteristics of rapeseeds and wheat seeds within mixing components of air-assisted centralized metering device based on DEM - CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108986.

[20] LEI X L, LIAO Y T, LIAO Q X. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29 - 39.

[21] HE S Y, QIAN C, JIANG Y C, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.

[22] 王振华, 胡贵荣, 刘宁宁, 等. 扩散段结构对非对称文丘里施肥器旋涡特征及吸肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 61 - 69.
WANG Zhenhua, HU Guirong, LIU Ningning, et al. Effects of diffusion section structure on vortex characteristics and fertilizer absorption performance of non-axisymmetric Venturi injector[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(16): 61 - 69. (in Chinese)

[23] 韩启彪, 黄兴法, 刘洪禄, 等. 6 种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 113 - 117, 136.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six venturi injectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 113 - 117,136. (in Chinese)

[24] MA H, ZHAO C, YANG S, et al. Research on a new-designed Venturi ejector and dazomet particle motion characteristics for dilute-phase pneumatic conveying systems based on CFD - DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108240.

[25] 李海宇, 张墨林, 孙曜晨, 等. 小麦气力集排系统行数可调节分配装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(13): 62 - 71.
LI Haiyu, ZHANG Molin, SUN Yaochen, et al. Design and experiment of the adjustable row number distribution device for wheat pneumatic collecting and discharging system[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(13): 62 - 71. (in Chinese)

[26] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 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(增刊 1): 92 - 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. 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(Supp. 1): 92 - 100. (in Chinese)

[27] 李贵川. 螺旋增压式荞麦气力集排系统设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
LI Guichuan. Design and experiment of buckwheat pneumatic collecting and discharging system with screw pressure[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)

[28] 崔永杰, 朱玉桃, 马利, 等. 穴盘缺苗气吸式基质剔除装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 140 - 151.
CUI Yongjie, ZHU Yutao, MA Li, et al. Design and experiment of air-suction substrates removal device for plug lack of seedlings trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 140 - 151. (in Chinese)

[29] SONG Q, ZHAO P, BI Y, et al. Optimization and test of pneumatic lifting seed distributor for maize plot seeder[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1469963.