doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.017

小麦分体式气流辅助导种装置设计与试验

郑　泉[1,2]　杨明春[1]　时宗强[1]　蔡开乐[1]　刘　策[1,2]　张春岭[1,2]
陈黎卿[1,2]　王韦韦[1,2]
(1.安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2.安徽省智能农机装备工程研究中心, 合肥 230036)

摘要: 针对小麦精量条播机高速作业导种过程种子流管壁碰撞,导致输种稳定性差、排种精度低等问题,设计了一种分体式气流辅助导种系统。对导种系统关键部件进行设计,并通过 DEM－CFD 耦合仿真法开展单因素试验,确定主要结构参数选取区间。基于单因素试验结果开展了 Box－Behnken 三因素三水平正交组合仿真试验,进一步确定气流辅助导种装置最优结构参数组合。试验结果表明:文丘里进气管收缩段直径为 16 mm、收缩段长度为 30 mm、进气管吹射角度为 25°时,瞬时排量一致性变异系数为 3.82%,种子质量流稳定性变异系数为 4.54%,气流辅助导种装置输种性能最佳。对模型进行 3D 打印,并开展台架试验验证气流辅助导种装置最优工作区间,台架试验结果表明,在有输送气流辅助导种情况下导种装置导种均匀性明显优于无气流辅助导种的导种装置,最优瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数分别由 5.82%、5.51%降至 3.51%、3.27%,田间试验结果表明,作业速度在 8～10 km/h 时,瞬时排量一致性变异系数和出苗断条率均不高于 4.82%、1.95%,符合气流辅助导种系统输种性能要求。

关键词: 小麦; 导种装置; 分体式气吹; 气流辅助导种; DEM－CFD
中图分类号: S224.29　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)13-0211-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Wheat Split Air-assisted Seed Guiding Device

Zheng Quan[1,2]　Yang Mingchun[1]　Shi Zongqiang[1]　Cai Kaile[1]　Liu Ce[1,2]
Zhang Chunling[1,2]　Chen Liqing[1,2]　Wang Weiwei[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Province Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: Aiming to address issues such as poor seed delivery stability and low seeding accuracy caused by seed collision with the inner wall of seed delivery tubes during high-speed operation of precision wheat strip seeders, a split air-assisted seed guiding system was designed. Key components of the guiding system were developed, and single-factor experiments were conducted by using a DEM－CFD coupled simulation method to determine the selection range of major structural parameters. Based on the results of single-factor tests, a Box－Behnken three-factor, three-level orthogonal combination simulation experiment was carried out to further determine the optimal structural parameter combination of the air-assisted seed guiding device. The experimental results showed that when the Venturi inlet pipe contraction section diameter was 16 mm, the contraction section length was 30 mm, and the Venturi inlet pipe jet angle was 25°, the seed delivery performance of the air-assisted guiding device was optimal, with a coefficient of variation for instantaneous flow consistency of 3.82% and a coefficient of variation for seed mass flow stability of 4.54%. The model was 3D printed, and bench tests were carried out to verify the optimal working range of the air-assisted seed guiding device. Bench test results indicated that with airflow assistance, the seed guiding uniformity of the device was significantly better than that without airflow assistance, with the optimal coefficients of variation for instantaneous flow consistency and seed mass flow stability reduced from 5.82% and 5.51% to 3.51% and 3.27%, respectively. Field test

收稿日期: 2025－12－15　修回日期: 2026－01－13
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1901004)和安徽省重点研发与开发计划项目(2023n06020046)
作者简介: 郑泉(1970—),女,教授,博士,主要从事智能农机装备设计与测控研究,E-mail: zhengquan@ahau.edu.cn
通信作者: 王韦韦(1989—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wangww0618@163.com

results showed that at an operating speed of 8 ~ 10 km/h, the coefficients of variation for instantaneous flow consistency and the rate of seedling gaps did not exceed 4.82% and 1.95%, meeting the seed delivery performance requirements of the air-assisted guiding system. The research findings on this split air-assisted seed guiding device can provide guidance for subsequent design and performance improvement of split air-assisted seed guiding systems.

Key words: wheat; seed guiding device; split air-blowing; air-assisted seed guiding; DEM - CFD

0 引言

导种环节是小麦排种器精量条播的重要末端环节,严重影响小麦粒群分布在种床的均匀性[1-2]。在田间高速作业环境时,机组产生的振动及种子与输送管道之间的碰撞,导致种子无序运动,进而制约小麦种子排出的一致性和连贯性。因此,在导种环节对下落的种子进行诱导与引流,以减少种子与导种管道之间的碰撞概率,是实现小麦精播的关键。

为解决由于种子无序运动所导致的排种均匀性差的问题,国内外诸多研究人员对播种导种环节进行了大量深入研究[3-5],同时,国内众多研究人员也开展了相关装备的研究,Li 等[6]提出了一种新型油菜籽空气输送辅助导种管,研究种子在空气输送辅助导种管内的运动机理,试验结果表明:与常规导种装置相比,合格率与合格距离变异系数分别提高了14%以上和8%以上。唐汉等[7]基于玉米精量排种器设计了一种轮式导种装置,阐明了该导种装置工作原理,分析了该装置对排种器排种性能的影响机理,并基于高速摄像技术对不同结构与工况下玉米种子运动进行轨迹与速度分析。刘瑞等[8]基于文丘里原理设计了一种正压气流辅助输种的导种装置,分析了气流辅助输种机理,实现“零速投种”。Lei 等[9]研究了一种气力式集中供种装置的分配头,采用计算流体力学(CFD)和离散元法(DEM)相结合的方法,跟踪种子迁移轨迹和分布状态,并优化了分配头结构,提高种子分配均匀性。Wang 等[10]比较了 3 种不同输种管和 2 种不同文丘里混合室组成的 6 种不同结构混合部件对种子运动轨迹和输种性能的影响,分析了带压力补偿管的混合部件内种子运动轨迹、输送气流速度和压力分布,提高其播种性能。

上述研究人员通过对各种作物高位投种过程中种子运移机理进行研究来提高投种稳定性,其中所采用的直接气送式导种技术与分配气送式导种技术对种子约束机理大致相同,但分配气送式导种更具有宽幅高速、适用范围广等优点[11]。然而分配气送过程易受上游供种以及供气环节动态耦合作用的影响,如何保障所形成的均匀气固两相流在时空维度上的一致性分配,成为其影响播种均匀性的关键问题[12]。

针对小麦播种机在进行高速作业时,由于种子与管壁之间的碰撞而产生不规则运动,进而降低排种均匀性等问题,本研究基于动态孔径气压补偿原理及文丘里原理,设计一种可用于宽幅高速精密播种的分体式气流辅助导种系统。采用离散元(DEM)和计算流体动力学(CFD)耦合仿真分析法,对气流分配横梁以及不同结构下气流辅助导种装置内投送过程中的气-种两相流进行分析,并结合台架试验及田间试验确定导种装置的最佳参数组合、作业速度与正压气流的匹配关系。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

本文设计的分体式气流辅助导种系统整体安装于 1GZM - 260YY 型旋耕施肥播种机上,整机结构如图 1 所示,其主要部件包括旋耕装置、开沟装置、施肥装置、地轮驱动装置、气流分配系统、导种装置与导种管等。

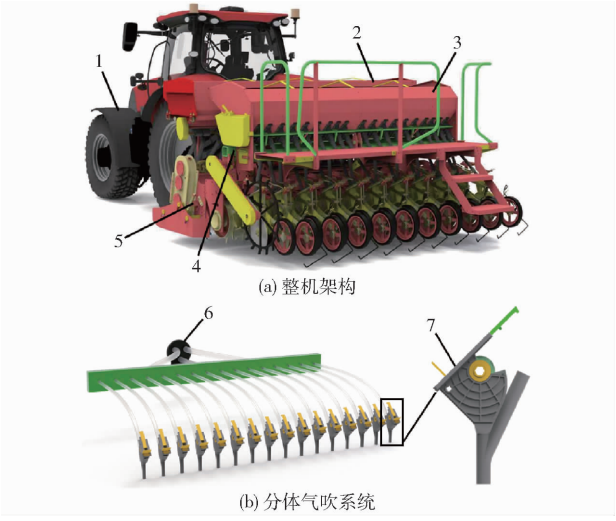

图 1 分体式气流辅助导种系统结构示意图

Fig. 1 Schematics of split air-assisted seed guide system

1. 拖拉机 2. 肥箱 3. 种箱 4. 旋耕底盘 5. 气流分配横梁 6. 气流辅助导种装置 7. PTO 风机

1.2 气流辅助导种工作原理

气流辅助导种装置由供种区、进气区、两相流混合区和引种区构成,其工作过程主要包括气送输种及引种两大环节[13],如图 2 所示。

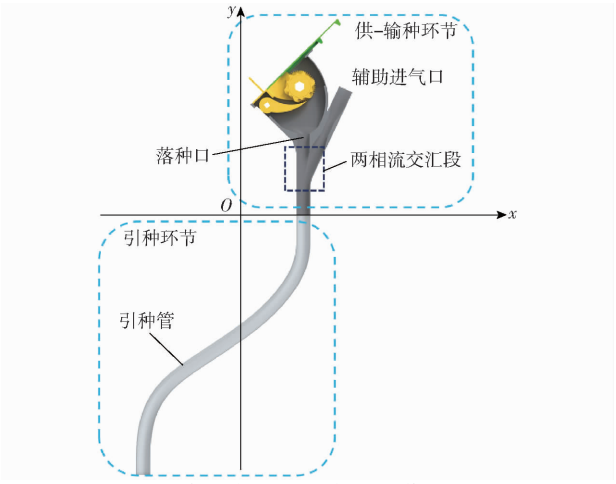

图 2　气流辅助导种装置工作原理图

Fig. 2　Schematic of working principle of air-assisted guiding device

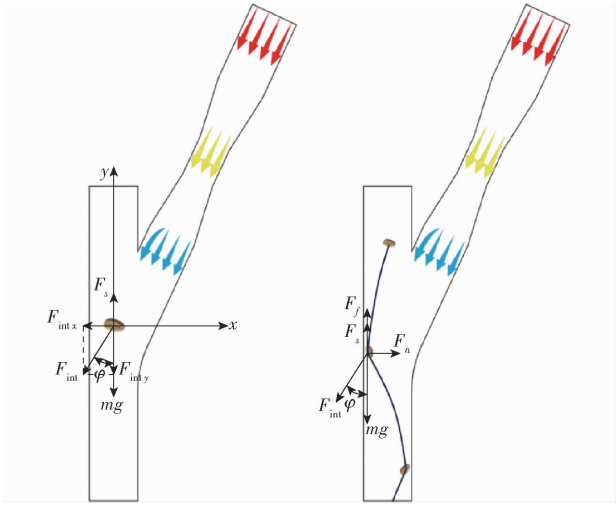

图 3　气吹管道内种子运动过程分析

Fig. 3　Analysis of seed movement in air-blowing pipe

2　关键部件设计与参数分析

分体式气流辅助导种系统关键部件结构参数主要包括气流分配横梁正压输入端直径、正压输出端直径、气流辅助导种装置文丘里进气管收缩段直径、收缩段长度及文丘里进气管吹射角度[14]。

2.1　导种过程粒群运动机理分析

导种装置在作业过程中，种子随供种轮转动，当脱离供种轮时，以一定的初速度，沿排种装置内腔壁面流入输种管道[15]。并在气种混合区受气流柔性约束作用，加速种子排出以及调整其运动轨迹，经过一段时间运移流出导种装置末端进入种沟。

当种子在气流辅助导种装置输种管内运动时，种子受自身重力 G、输送气流施加的拖曳力 F_s，以及与管壁产生的摩擦力 F_f 和支撑力 F_n。在施加输送气流作用下，尽可能减少种子流与输送管壁的碰撞，种子运动方向与输送管流线型方向一致，因此当种子与管壁发生碰撞时，其受力分析如图 3 所示。

如果不考虑种子与管壁之间接触摩擦，结合种子流在管道内受力及运动状态分析，小麦种子在气流吹送的推力及重力协同作用下，在竖直方向上不断加速，可以推算出小麦种子的加速度方程为

$$F_t + G = \frac{4}{3}\pi r_s^3 \frac{\mathrm{d}v_s}{\mathrm{d}t} \times 10^{-9} \tag{1}$$

式中　F_t——种子受气流的推动力，N

r_s——种子半径，m

v_s——种子在气流中速度，m/s

t——种子在管道内运动时间，s

流体阻力由颗粒与流体相对运动而产生，颗粒由气流产生的推力向前驱动，其计算公式以及颗粒加速度方程为

$$\begin{cases} F_t = \dfrac{1}{2} C_d \rho_a A_s v_r^2 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3C_d\rho_a}{8\rho_s r_s} + \dfrac{G}{8\pi r_s^3 \rho_s} \end{cases} \tag{2}$$

式中　C_d——阻力系数

ρ_a——气体密度，kg/m^3

ρ_s——种子密度，kg/m^3

A_s——种子最大截面面积，m^2

v_r——种子与气体相对速度，m/s

由式(2)种子运动过程微分方程可知，其加速度与气吹管道稳流区气流速度呈正相关，为了降低粒子流群的随机碰撞概率，可一定程度上增加输入端气压或优化气吹管道结构减小风压损失，以此减小种子流通过管道排出的运动时间[16]。

2.2　气流辅助导种装置关键结构设计

通过对小麦种子流导种过程中运动机理分析可知，适当的正压及气流引导对种子在管道内的有序运移影响较大，当正压过大时，种子速度增加过快，与管壁碰撞；当正压过小时，种子易于管道入口滞留，从而形成种群涡流[17]。因此，气流辅助导种装置气吹管道结构设计尤为重要，如图 4 所示。

2.2.1　文丘里进气管

根据文丘里气流辅助导种工作原理，输送气流由导种装置进气口进入，气流经过收缩段被加速，随后入射到种子流输送管道，产生由进种口到文丘里气吹管道的压力差，使得种子更易于进入输种管道并在气流吹送作用下快速通过导种管。文丘里气吹管道的进气口直径 D、出气口直径 d、收缩段长度 L 及收缩角 θ 的几何关系为

$$\tan\theta = \frac{D-d}{2L} \tag{3}$$

进种口直径可直接影响到小麦种子流能否顺利

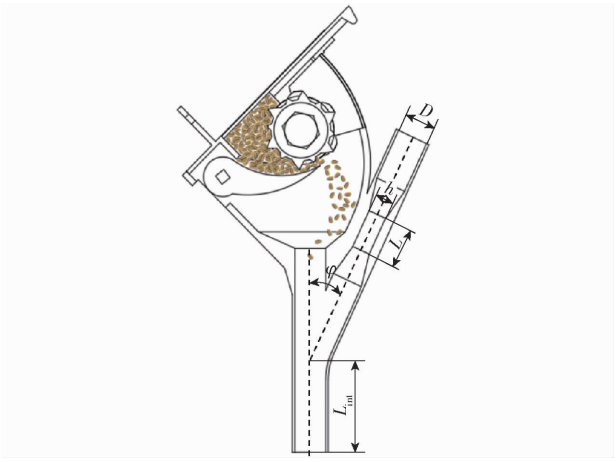

图 4 气流辅助导种装置结构示意图

Fig. 4 Schematic of structure of air-assisted guiding device

进入输送管道,依据气种混合输送原理,入口直径计算式为

$$D=\sqrt{\frac{4m_s}{\pi\mu_0\rho_a v_0}} \tag{4}$$

式中 m_s——单位时间输送种子颗粒质量,kg/s

μ_0——单位时间种子质量与气流质量混合比

v_0——输送气流速度,m/s

由于文丘里输送管道内收缩段的存在,气流与管壁之间会产生局部压力损失。为保证进入输种管内提供给种子气流速度最大,对收缩段压降特性进行分析,根据不可压缩流体的质量守恒与动量方程,可建立收缩段流动模型。已知收缩段入口直径为 D,出口直径为 d,收缩角为 θ,收缩段长度为 L,收缩段直径为 h,体积流量为 Q。结合伯努利方程与局部压力损失,收缩段压力损失 p_s 可表示为

$$p_s=\frac{8L\rho_a Q^2\tan^4\theta}{\pi^2(D\tan\theta-2h)^4}-\frac{8\rho_a Q^2}{\pi^2 D^4}+\frac{32C_d\rho_a Q^2\tan^4\theta}{\pi^2(D\tan\theta-2h)^4} \tag{5}$$

流量 Q、入口直径 D 及收缩段直径 h 为已知值,气压损失随着 L 增大而增加,收缩段压力损失随着 θ 增大而减小,其中收缩段直径计算式为

$$h=\sqrt{\frac{4Q}{\pi\sqrt{\dfrac{2\delta}{\delta-1}\dfrac{p_i}{\rho_a}\left(\dfrac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{2}{\delta}}\left[1-\left(\dfrac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{\delta-1}{\delta}}\right]}}} \tag{6}$$

式中 p_i——输送端气流压强,Pa

p_0——收缩段气流压强,Pa

δ——绝热指数,流体为空气时取 1.4

综合上述,代入相关数据并结合前期预试验,气流辅助导种装置收缩段直径取值范围为 10 ~ 18 mm,收缩段长度取值范围为 20 ~ 40 mm,以此作为后文试验因素水平的参考。

2.2.2 气辅吹射角度

气流辅助导种装置结构的关键在于在落种管处增加分支气吹管道辅助气流,因此在两相流交汇处气流对种子的影响尤为重要。而落种管与分支气吹管道的夹角即为吹射角度,吹射角度对种子的影响主要有两方面:气流对种子的有效推动力分量;气流对种子的横向干扰。分支气流在交汇处需给种子提供竖直方向上足够的动量,同时横向扰动最小[18]。交汇段(L_{int})是气流与种子相互作用的关键区域,其几何关系有

$$\begin{cases}L_{int}=R\sin\varphi\\ L_{int,min}=\dfrac{v_t^2-v_1^2}{2a_y}\\ a_y=\dfrac{F_{int}\cos\varphi}{m}+g\end{cases} \tag{7}$$

式中 m——种子质量,kg

$L_{int,min}$——交汇段长度最小值,m

R——分支气吹管道弯曲半径,m

φ——吹射角度,(°)

v_t——种子加速至出口目标速度,m/s

v_1——种子初速度,m/s

a_y——种子竖直方向加速度,m/s^2

g——重力加速度,m/s^2

F_{int}——种子在交汇处所受气流力,N

若要满足种子能充分加速至目标速度,根据公式(7)计算得出 L_{int} 区间,此时吹射角度 φ 的范围可确定。而 φ 的选取应尽可能减小气流对垂直管壁的直接冲击,使得气流能平滑地切入种子流,故选取吹射角度为 20.0°、22.5°、25.0°、27.5°、30.0° 5 种工况进行后续分析。

3 仿真试验

3.1 仿真模型与边界条件设置

本文采用 ANSYS Fluent 19.2 和 EDEM 2018 对小麦种子在气流辅助导种装置内气流场输送进行耦合仿真,模型如图 5 所示。先在 EDEM 中确定小麦种子模型的三轴尺寸为 6.40 mm × 3.20 mm × 3.20 mm,并导入供种装置 stp 格式几何模型,设置接触参数,建立颗粒工厂生成小麦种子。由于不考虑小麦种子损伤,数值模拟采用 Hertz - Mindlin 防滑接触模型;采用 Workbench 2022R1 软件对导种装置气流输送气道进行单元网格划分,网格模型最小尺寸限制为 0.002 m,特征清除尺寸设置为 0.002 m,并设置气流入口、出口及质量流入口,随后将网格模型导出的 mesh 文件导入 Fluent 19.2 中,选择标准 $k-\varepsilon$ 模型

求解气相运动，将拉格朗日耦合方法应用于DEM－CFD耦合界面。仿真过程中，设置 EDEM 时间步长为 2×10^{-6} s，Fluent 时间步长为 0.001 s；设置 Fluent 步数为 8 000 步，即总仿真时间为 8 s。

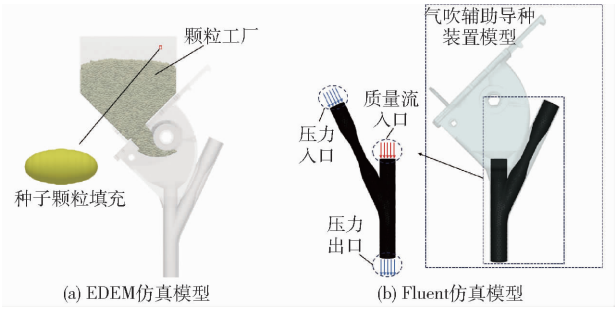

图 5　DEM 和 CFD 仿真模型

Fig. 5　DEM and CFD simulation models

3.2　仿真参数

导种装置加工所用材料为 ABS 树脂塑料，其物理特征参数和种子籽粒与接触部件之间的相关力学特征参数根据文献[19]确定，如表 1 所示。

表 1　仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters

参数	材料	
	小麦种子	导种装置
泊松比	0.42	0.394
剪切模量/Pa	5.1×10^{7}	8.96×10^{8}
密度/(g·cm^{-3})	1 350	1 060
碰撞恢复系数(与小麦种子)	0.42	0.60
静摩擦因数	0.35	0.40
动摩擦因数(与小麦种子)	0.05	0.05

3.3　仿真试验设计

为了提高仿真效率，选取单个导种装置进行仿真优化分析，目的是优选出排种性能最佳的参数组合。试验因素包括文丘里进气管收缩段直径、收缩段长度及文丘里进气管吹射角度，试验因素水平如表 2 所示。

结合理论分析以及农艺要求开展预试验，分析各影响因素取值范围内供种效果，在仿真中选取气流辅助导种装置种子流出口设置种子出口计算域，用于统计一定时间内排出种子数量，单因素试验采

表 2　单因素试验水平

Tab. 2　Single-factor tests factors and levels

水平	收缩段直径/mm	收缩段长度/mm	吹射角度/(°)
1	25	12	20
2	30	14	25
3	35	16	30
4	40	18	35
5	45	20	40

用变异系数 C_{V1}（瞬时排量一致性变异系数）和 C_{V2}（种子质量流稳定性变异系数）作为评价指标，试验重复 5 次。计算式为

$$C_{V1}=\frac{\sigma_m}{\overline{m}}\times100\%=\frac{\sqrt{\dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i-\overline{m})^2}}{\overline{m}}\times100\% \tag{8}$$

$$C_{V2}=\frac{\sigma_M}{\overline{M}}\times100\%=\frac{\sqrt{\dfrac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}(M_j-\overline{M})^2}}{\overline{M}}\times100\% \tag{9}$$

式中　σ_m——各时段排出种子数量的标准差

$\overline{m}$——各时段排出种子数量的平均值

m_i——第 i 个时段排出种子数量

n、k——时间段，s

σ_M——各时段排出种子质量的标准差，g

$\overline{M}$——各时段排出种子质量的平均值，g

M_j——第 j 个时段排出种子质量，g

3.4　单因素仿真结果分析

3.4.1　收缩段直径对导种装置输种性能影响

在仿真模拟过程中，种子由入种口进入管道后自由落体一段距离后与气吹管道内的入射气流交汇，随后经过两相流交汇段加速后进入引种管，此时导种装置出口处种子速度及耦合力将大大影响后续引种环节的引种管输种性能。图 6 显示了不同收缩段直径下气流辅助导种装置内气流速度与种子速度变化情况，在气流辅助导种装置其他参数保持不变的情况下，随着收缩段直径的变化，出口处种子速度及管道内气流速度呈现先增后减的趋势。收缩段直

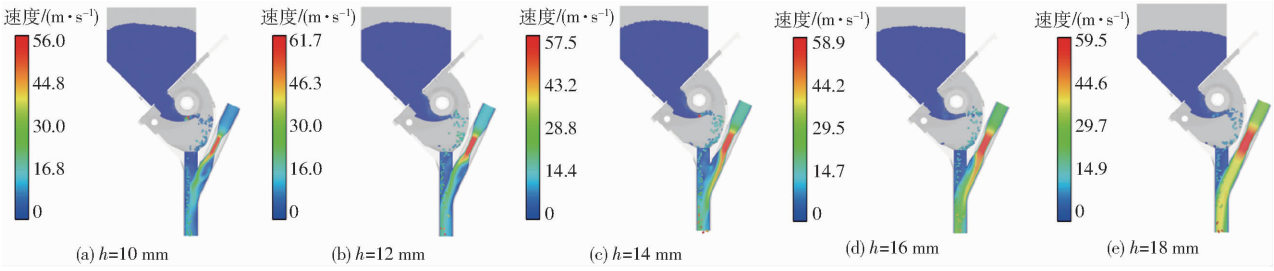

图 6　不同收缩段直径时速度仿真结果

Fig. 6　Velocity simulation results of different contraction section diameters

径为 14 mm 时,种子平均运动速度最高。随机选取连续 5 粒种子,绘制其通过落种管道的速度变化。由图 7 可知,收缩段直径为 14 mm,落种管出口处种子速度基本稳定在 8.87 ~ 9.45 m/s,种子所受最大耦合力的范围为 0.011 8 ~ 0.013 0 N。收缩段直径增大,文丘里管道的增压效果并不明显,管道内气流对种子的加速作用较小。相反,收缩段直径过小导致管道内输送气流沿途损失增大,也无法满足对种子的充分加速。

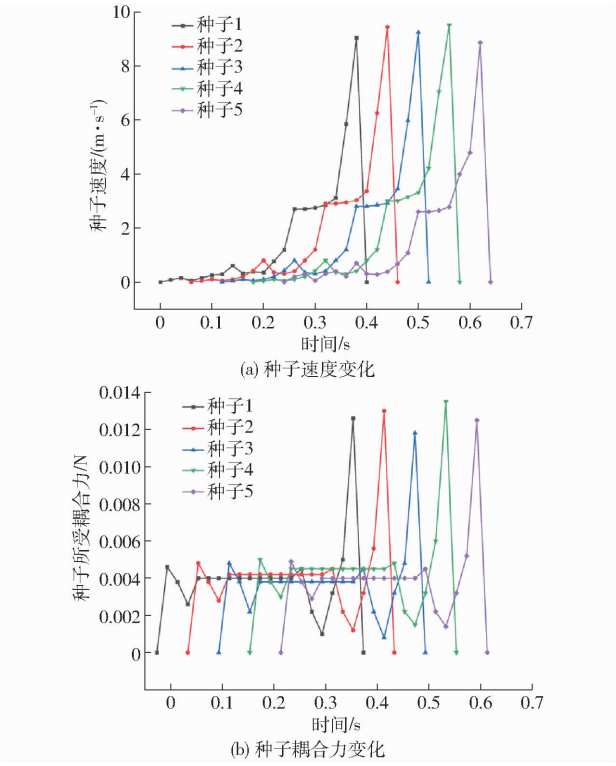

图 7 种子速度及受力变化曲线

Fig. 7 Variation curves of seed velocity and force

3.4.2 收缩段长度对导种装置输种性能影响

图 8 显示了在不同收缩段长度下导种装置内气压分布以及种子速度云图。观察结果表明,气流经过收缩段后进入落种管,随着收缩段增大,输送管道内气压呈现先增大后减小的趋势。由图 9 可知,收缩段长度为 30 mm 时,管道内输送气流速度可达到最大,为 74 m/s,当收缩段长度过小时,气流在较短的轴向距离被加速,这将导致静压沿轴向急剧下降,使得气流在收缩段壁面产生涡流区,增加流动阻力。若收缩段过长,过长的壁面摩擦,使得气流加速缓慢,大大降低了文丘里增压效率。而气压的分布可直接影响到作用于种子的耦合力,无论是收缩段过长或过短,其产生的涡流和摩擦都对输送气流产生损耗,导致作用于加速种子运动的气流能量不足。

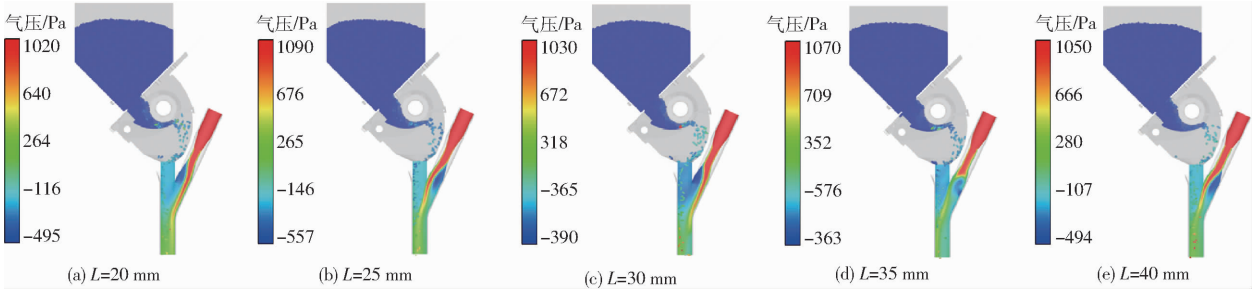

图 8 不同收缩段长度时气压仿真结果

Fig. 8 Pressure simulation results of different contraction section lengths

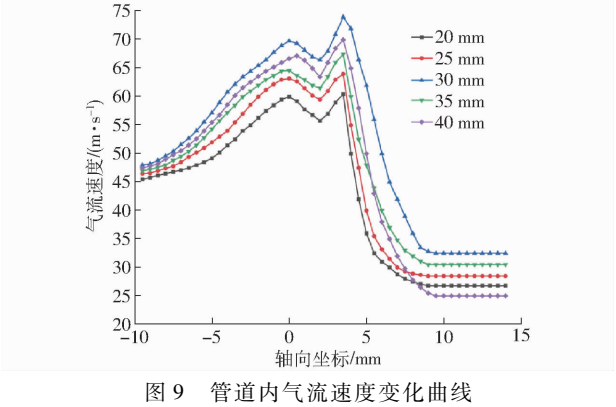

图 9 管道内气流速度变化曲线

Fig. 9 Changes curves of airflow velocity variation in tube

3.4.3 吹射角度对导种装置输种性能影响

文丘里气吹管道吹射角度是决定两相流汇合区域气流场分布以及种子运动特性的关键因素。由图 10 可知,由于较小的吹射角度,气流与种子流运动方向接近平行,对种子横向移动的干扰较小,进入落种管道内的气流对种子动能的转化率较高。但此时种子被赋予较高的动能,且无横向干扰,同时也增加了种子后续在引种管内堆积的概率。而吹射角度过大则会导致入射气流对种子产生横向偏移的干扰,大大增加了种子流与管壁碰撞的概率。高速气流与管壁垂直冲击,易于在落种口下方产生回流区,这将会导致种子于落种口处滞留。选取相邻 5 粒种子,并计算其整个排种过程中 x、y 方向速度及耦合力平均值变化,如图 11a 所示,在前 0.1 s,种子由于受供种主轴的扰动影响,使其具有较大的 x 方向受力及速度,此时所受耦合力为 0.09 N,速度为 7.4 m/s。0.3 s 后,种子此时恰好经过两相流交汇处,此时入射气流对种子的横向干扰使其横向速度产生突变,达到 5.2 m/s,种子横向受力最大,为

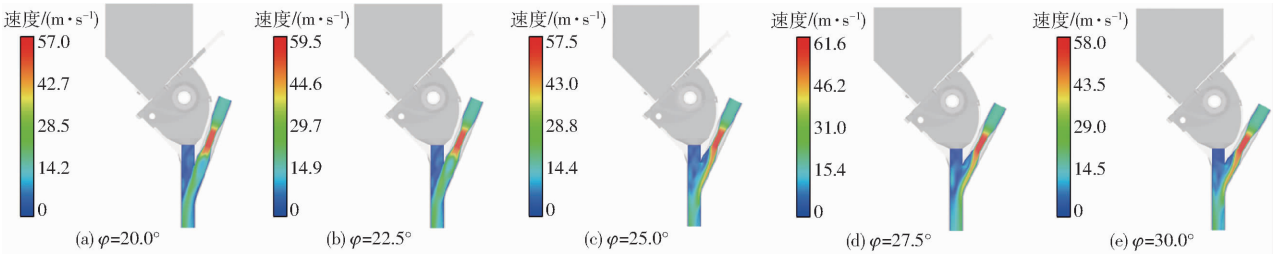

图 10　不同吹射角度时速度仿真结果

Fig. 10　Velocity simulation results of different blowing angles

0.13 N。如图 11b 所示，种子在前期受供种主轴相对稳定的 y 方向支撑力，其 y 方向速度变化不大，当种子脱离供种主轴自由下落后，其速度开始逐渐增加，0.3 s 后由于受气流影响，其 y 方向速度产生突变，此时种子 y 方向受耦合力最大，为 0.011 N，可达到最大下落速度，为 8.89 m/s。

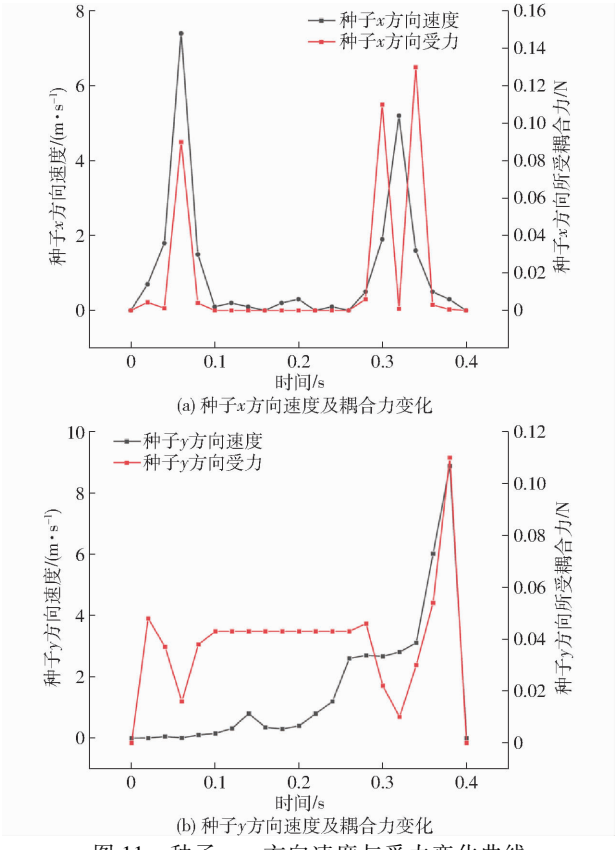

图 11　种子 x、y 方向速度与受力变化曲线

Fig. 11　Diagrams of seed velocity and force variation in x and y directions

3.5　多因素正交试验

3.5.1　试验方案

根据单因素仿真试验结果，选取供种转速为 657.3 r/min，输送气压为 1 000 Pa，开展以瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数为试验指标的多因素试验。基于 Box－Behnken 设计的响应曲面法，试验各因素编码如表 3 所示。

将所设计的 17 组正交试验每组重复 3 次取平均值，试验方案和结果如表4所示，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 3　多因素试验因素编码

Tab. 3　Multi-factor test codes

编码	收缩段直径 x_1/mm	收缩段长度 x_2/mm	吹射角度 x_3/(°)
－1	14	25	22.5
0	16	30	25.0
1	18	35	27.5

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Trial protocol and results

试验序号	因素			C_{V1}/%	C_{V2}/%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	3.96	4.71
2	－1	1	－1	6.95	7.52
3	1	1	－1	7.23	7.85
4	－1	－1	－1	7.23	7.91
5	－1	1	1	7.02	7.63
6	0	－1	0	5.28	6.07
7	0	1	0	4.45	5.42
8	1	－1	1	7.96	8.03
9	1	－1	－1	8.81	8.98
10	－1	0	0	5.23	5.69
11	－1	－1	1	7.34	7.72
12	0	0	1	5.42	6.01
13	0	0	0	3.82	4.54
14	1	0	0	6.33	6.81
15	0	0	－1	4.98	5.12
16	0	0	0	3.94	4.69
17	1	1	1	7.15	7.78

3.5.2　试验因素的响应面分析

将试验数据导入 Design-Expert 进行拟合分析，各因素对瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数方差分析如表 5 所示。

由表 5 可知，对于评价指标 C_{V1}，X_1、X_1^2、X_2^2 的 P 值均小于 0.01，其对瞬时排量一致性变异系数（C_{V1}）的影响极其显著；X_2 的 P 值小于 0.05，对瞬时排量一致性变异系数（C_{V1}）的影响显著。对于评价指标 C_{V2}，X_1、X_1X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2 的 P 值均小于 0.01，其对种子质量流稳定性变异系数（C_{V2}）的影响极显著，其余项影响不显著。则瞬时排量一致性变异系数（C_{V1}）和种子质量流稳定性变异系数（C_{V2}）的回归

表 5 方差分析

Tab. 5 Analysis of variance

来源	C_{V1}				C_{V2}			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	29.87	9	43.08	<0.000 1	25.48	9	83.74	<0.000 1
X_1	2.23	1	28.92	0.001 0	1.78	1	52.67	0.000 2
X_2	0.778 4	1	10.10	0.015 5	0.004 0	1	0.118 3	0.741 0
X_3	0.029 2	1	0.375 8	0.557 9	0.114 5	1	3.39	0.108 3
X_1X_2	0.266 4	1	3.46	0.105 3	1.13	1	33.27	0.000 7
X_1X_3	0.273 8	1	3.55	0.389 6	0.045 0	1	1.33	0.286 5
X_2X_3	0.064 8	1	0.841 1	0.339 5	0.036 4	1	1.08	0.333 7
X_1^2	10.26	1	133.14	<0.000 1	4.36	1	129.06	<0.000 1
X_2^2	1.00	1	13.10	0.008 7	0.889 5	1	26.31	0.001 4
X_3^2	0.268 6	1	3.49	0.104 1	2.42	1	71.69	<0.000 1
残差	0.539 3	7			0.236 7	7		
失拟项	0.526 2	5	16.11	0.063 3	0.220 9	5	5.59	0.158 6
误差	0.013 1	2			0.015 8	2		
合计	30.41	16			25.72	16		

方程为

$$C_{V1}=195.11-16.89x_1-1.52x_2-2.89x_3+0.018x_1x_2+0.037x_1x_3+0.007\,2x_2x_3+0.49x_1^2+0.024x_2^2+0.051x_3^2 \quad (10)$$

$$C_{V2}=211.24-11.50x_1-1.84x_2-7.64x_3+0.038x_1x_2+0.015x_1x_3-0.005\,4x_2x_3+0.32x_1^2+0.023x_2^2+0.15x_3^2 \quad (11)$$

耦合模拟过程包括供种、输种、加速及稳定排出。种子以相对较低的初速度(主要沿 x 轴与 y 轴方向)由入种口进入落种管,这增加了其与管壁早期产生碰撞的可能性。根据上述回归模型分析,建立交互作用响应面,如图 12 所示,文丘里进气管收缩段直径是影响导种性能的最显著因素,提取并分析在最优参数组合(x_1 = 16 mm、x_2 = 30 mm、x_3 = 25°)及两个极端参数组合(x_1 = 14 mm、x_1 = 18 mm)下气流场分布与种子运动特性,探究其内在机理。当收缩段直径过小(14 mm)时,文丘里管喉部气流速度较高,于两相流混合区产生局部低压涡流区,对下落的种子产生横向干扰,使其轨迹偏离轴线,与管壁产生非必要碰撞。当收缩段直径过大(18 mm)时,喉部气流加速不足,对种子流的“包裹”与“引导”作用减弱,增加粒间碰撞概率。方差分析指出 X_1X_2 对 C_{V2} 影响极显著,在固定吹射角度下,存在一个最佳的“直径-长度”匹配关系。过短的收缩段搭配较大直径,气流尚未充分加速即已扩散;过长的收缩段搭配较小直径,则摩擦损失过大。而在最优参数组合时,气流形成集中、稳定的高速流束,且无明显涡流,对种子群产生充分且方向一致的曳力,是保证后续环节种群输送有序性的关键。

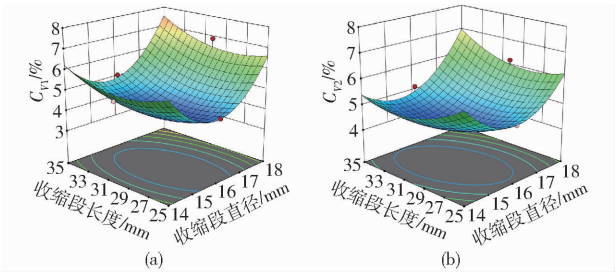

图 12 交互作用响应曲面

Fig. 12 Diagrams of interaction response surface

3.5.3 关键参数优化

为了得到导种装置最佳参数组合,确保其在合适的文丘里进气管收缩段直径、收缩段长度及进气管吹射角度下,瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数符合播种作业要求。利用 Design-Expert 软件的约束和优化求解功能,确定了气流辅助导种装置最佳结构参数组合为:文丘里进气管收缩段直径 16 mm、收缩段长度 30 mm、进气管吹射角度 25°。

4 试验验证

4.1 材料与方法

为了验证 DEM - CFD 耦合方法应用于优化设计气流辅助导种装置的合理性与准确性,并探究种子在导种装置内的运移情况,采用 3D 打印技术制作最优参数组合下的导种装置,试验小麦种子选取郑麦 9023,种子含水率和千粒质量分别为 8.13%、36 g,于安徽农业大学中西部综合实验楼的 JPS 排种性能试验台上测试。试验设备主要包括气流辅助导种排种器、高速摄像机(千眼狼 S 系列超高速摄像机,帧速率为 1 000 f/s,图像后处理软件为 Revealer Motion Analysis)及直流风机等,如图 13 所

示。试验开始时，开启种床带向前运动，同时排种装置工作，种子落入种床带附着在油膜上。控制供种主轴转速为 20 ~ 60 r/min，以此来验证排种装置的高速适应性；并通过控制风机开启与关闭，阐明气流对于种子输送的影响。

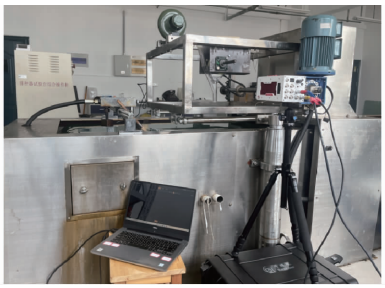

图 13　台架试验

Fig. 13　Bench test

根据 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机技术条件》的要求，以瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数为试验评价指标。

4.2　台架试验

排种效果如图 14 所示。从图中可以看出，在有无气流辅助输种的对比情况下，排种装置的工作效果差异较大，当无气流辅助导种时，种床带上的种子分布连续性较差，且高速适应性一般，随着供种主轴转速以及种床带运动速度增加，种床带上的种子分布越发稀疏。当有气流辅助导种情况下，可以明显看出种子带连续性较好，且没有明显的断层，说明排种的瞬时排量一致性较好，种子质量流稳定。且在高速作业情况下，排种装置仍展现较为良好的工作

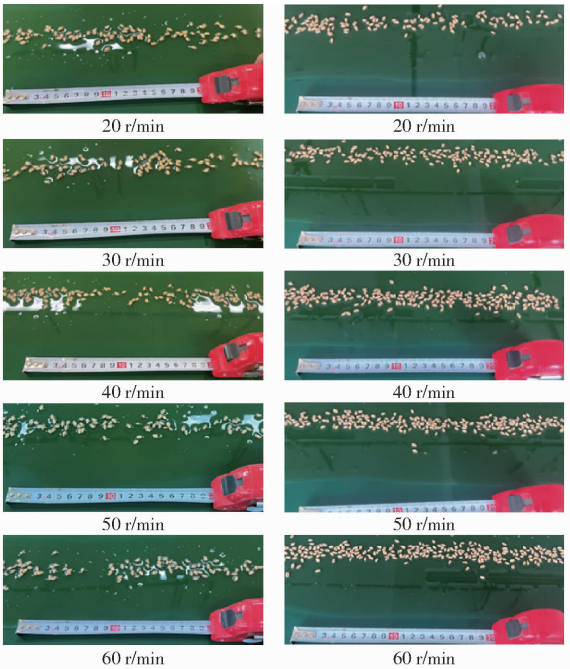

图 14　台架试验效果图

Fig. 14　Schematics of bench test effect

性能，种子在落种管内被加速，降低与管壁碰撞可能性的同时，与种床带的运动速度得以匹配。

以种床带上 2 m 的种子带为评价区域，每隔 20 cm 截取一段种子并计量，试验结果如表 6 所示。由表可以看出，有气流辅助导种时的种子瞬时排量一致性和种子质量流稳定性均优于无气流辅助导种，且在不同工作速度情况下，变异系数 C_{V1}、C_{V2} 均不高于 4.42%、4.85%。由高速摄像机记录种子排出的运动过程，选取 10 粒种子，对其整个排种过程中的速度进行实时监测，每组试验重复 5 次。并将视频导入运动分析软件进行二维标定，最终拟合出在有、无气流辅助导种作用下的种子速度变化对比，如图 15 所示，这说明在有输送气流辅助导种情况下，能改善排种装置的输种连续性及稳定性。由于在高速气流的作用下，种子运动速度的改变，使得其高速作业工况下的适应性也较为优异，当供种主轴转速达到 40 r/min 时，瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数最低，可达到 3.51%、3.27%。

表 6　试验结果

Tab. 6　Test results　　%

类型	供种转速/(r·min^{-1})	C_{V1}	C_{V2}	种子损伤率
无气流辅助导种	20	5.17	5.72	0.08
	30	5.56	5.83	0.10
	40	5.82	5.51	0.11
	50	6.94	7.46	0.11
	60	7.37	6.86	0.09
有气流辅助导种	20	4.41	4.57	0.11
	30	3.73	4.14	0.09
	40	3.51	3.27	0.11
	50	4.29	4.23	0.13
	60	4.42	4.85	0.12

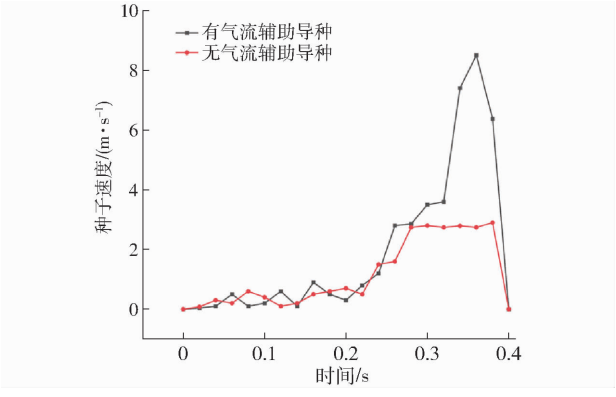

图 15　高速摄像对比试验结果

Fig. 15　High-speed camera comparison test results

4.3　田间试验

为了进一步验证分体式气流辅助导种系统工作

性能,2025 年 11 月于安徽省淮北市孙疃镇华丰机械设备有限公司试验田进行田间试验,试验配套动力为常发 CFG1204 - B/CFG1404 - X 型拖拉机,试验装置集成于 1GZM - 260 型旋耕施肥播种机上,气流辅助导种风压由拖拉机动力提供。田间试验现场及出苗情况如图 16 所示。



图 16 田间试验场景与效果

Fig. 16 Field test scenarios and effects

根据小麦条播农艺要求,以瞬时排量一致性变异系数和出苗断条率为评价指标,于试验区域随机选取 10 块长度为 20 cm 的播种段,分别测定播种后以及出苗后每个播种段的粒子数和小麦株数。以作业速度为因素开展试验,每个工况重复 3 次,结果取平均值,试验结果如表 7 所示。

表 7 田间试验结果

Tab. 7 Field test results %

作业速度/(km·h^{-1})	瞬时排量一致性变异系数	出苗断条率
8	4.79	1.76
9	4.11	1.52
10	4.82	1.95

结合上述试验结果,分体式气流辅助导种系统可以满足高速宽幅条件下的小麦精量播种需求,在各个速度工况条件下,瞬时排量一致性变异系数和出苗断条率分别保持在 4.82%、1.95% 以内,有利于提升小麦分体式气流辅助导种播种机整体作业性能。

5 结论

(1)针对小麦精量条播机在高速作业时由于机组振动产生的种子流与管壁碰撞等现象,导致排种精度低、输种稳定性差等问题,本文采用分体式气流辅助导种的形式,设计了一种基于动态孔径气压补偿原理及文丘里原理的分体式气流辅助导种排种系统。

(2)对导种系统关键部件气流辅助导种装置进行了结构设计,并开展结构参数单因素仿真分析以及三因素三水平正交组合仿真试验;明确了文丘里进气管收缩段直径为 16 mm、收缩段长度为 30 mm、吹射角度为 25°时,瞬时排量一致性变异系数为 3.82%,种子质量流稳定性变异系数为 4.54%,气流辅助导种排种装置输种性能最佳。

(3)台架条播性能试验结果表明,在有气流辅助导种情况下,导种装置投种成条连续性及稳定性明显优于无气流辅助导种,种子最优瞬时排量一致性变异系数和种子质量流稳定性变异系数分别由 5.82%、5.51% 降至 3.51%、3.27%;田间试验结果表明,作业速度在 8 ~ 10 km/h 时,瞬时排量一致性变异系数和出苗断条率均不高于 4.82%、1.95%,小麦分体式气流辅助导种播种机能满足高速精量播种需求。

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

[3] Sun Q, Yi S, Qi H, et al. DEM - CFD simulation and optimization of an air-assisted seed guide tubes with guided-groove for high-speed maize delta-row dense-plantings planter[J]. Powder Technology,2026,470:121942.

[4] Zhou L, Sun K, Zhao X, et al. Design and optimisation of an air-assisted helical seed-guiding device for high-speed maize planters using DEM - CFD coupling[J]. Biosystems Engineering, 2026,262:104356.

[5] 衣淑娟,张淯朋,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 detal-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 261 - 274. (in Chinese)

[6] Li Z, Wu J, Quan Z, et al. Research on the impact of wheat seed collisions on the distribution performance of an air-assisted centralized distribution device based on CFD - DEM numerical simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109241.

[7] 唐汉，王紫恒，徐福东，等. 玉米高速精量排种器轮式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：316－327.
Tang Han, Wang Ziheng, Xu Fudong, et al. Design and test of wheel-type seed guide device for high-speed maize precision seed metering apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7):316－327. (in Chinese)

[8] 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)

[9] Lei X, Hu H, Wu W, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 22－33.

[10] 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.

[11] 衣淑娟,孙亭瀚,陈涛,等. 谷子穴播机勺链式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：39－52.
Yi Shujuan, Sun Tinghan, Chen Tao, et al. Design and test of spoon chain seed guide device for grain hole seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 39－52. (in Chinese)

[12] 俞亚新,王炎,周俊伟,等. 南瓜种子姿态约束定向组合式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：121－132，158.
Yu Yaxin, Wang Yan, Zhou Junwei, et al. Design and test of combined pumpkin seed attitude-constrained directional seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 121－132, 158. (in Chinese)

[13] 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)

[14] Veiskarami A, Saidi M. Numerical investigation of a new technique to reduce pipeline elbow erosion employing branching path with flow control of butterfly valves and orifices[J]. Powder Technology, 2025,455: 120761.

[15] Cao X, Wang L, Liao Q, et al. Simulation of the mixing component of a horizontal air-assisted centralised wheat metering device[J]. Biosystems Engineering, 2024,243: 13－26.

[16] 王英博,李洪文,何进,等. 机械式小麦射播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(21)：1－10.
Wang Yingbo, Li Hongwen, He Jin, et al. Parameters optimization and experiment of mechanical wheat shooting seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 1－10. (in Chinese)

[17] He S, Qian C, Jiang Y, 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.

[18] Tang P, Manzano J, Li H, Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the Venturi tube using the CFD method[J]. Water, 2019,11(10): 2194.

[19] 谭钰，张翼，金颖，等. 油麦兼用气力辅助导种集排器设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(9)：105－116,187.
Tan Yu, Zhang Yi, Jin Ying, et al. Design and experiment of peumatic-assisted seed collector for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 105－116,187. (in Chinese)