

基于 CFD – DEM 的气送式稻麦兼用型高速播种机种子减速器设计与试验

臧英^{1,2} 张美林^{1,3} 黄子顺^{1,3} 姜有聪^{1,3} 钱诚^{1,3} 王在满^{1,4}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;

3. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

4. 华南农业大学黄埔创新研究院, 广州 510715)

摘要: 针对气送式稻麦兼用型高速播种机作业时种子输送速度快造成投种精度低、投种不稳定等问题,设计了一种基于旋风减速原理的种子减速器。采用 CFD – DEM 耦合仿真方法进行单因素试验,确定主要结构因素并选取适宜尺寸区间。为确定种子减速器结构参数,基于单因素试验结果开展了 Box – Behnken 正交组合仿真试验,结果表明:最佳结构尺寸为圆筒直径 D 为 82.352 mm,圆筒长度 H_i 为 101.364 mm,排气口直径 D_p 为 25.000 2 mm,锥筒长度 H_z 为 67.902 5 mm,此时籼稻种子出种口流速 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.212 m/s 和 0.462 m/s;粳稻种子出种口流速 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.339 m/s 和 0.473 m/s;小麦种子出种口流速 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.341 m/s 和 0.408 m/s。台架验证试验结果表明,在出种口处籼稻种子竖直速度为 0.411 m/s,粳稻种子竖直速度为 0.452 m/s,小麦种子竖直速度为 0.457 m/s,与仿真试验结果较符合。条播性能台架试验结果表明,有种子减速器时排种成条效果明显优于无种子减速器情况,而且籼稻、粳稻和小麦排量均匀性变异系数分别由无种子减速器时 41.61%、25% 和 37.84% 依次降至 9.10%、8.42% 和 8.49%,满足种子减速器性能要求。研究结果可为后续提高气送式稻麦兼用型播种机播种性能提供指导。

关键词: 高速播种机; 稻麦兼用; 种子减速器; CFD – DEM

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0222-13

OSID:



Design and Test of Seed Reducer for Air-fed Rice – Wheat High-speed Seeder Based on CFD – DEM

ZANG Ying^{1,2} ZHANG Meilin^{1,3} HUANG Zishun^{1,3} JIANG Youcong^{1,3} QIAN Cheng^{1,3} WANG Zaiman^{1,4}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

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

3. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

4. Huangpu Innovation Research Institute, South China Agricultural University, Guangzhou 510715, China)

Abstract: In order to solve the problems of low seed feeding accuracy and unstable seed feeding caused by the fast seed conveying speed of the air-fed rice – wheat dual-purpose high-speed seeder, a seed reducer based on the principle of cyclone deceleration was designed. The CFD – DEM coupling simulation method was used to carry out a single factor test to determine the main structural factors and select the appropriate size range. In order to determine the structural parameters of the seed reducer, the Box – Bhnken orthogonal combination simulation test was carried out based on the single factor test results, and the results showed that the optimal structural dimensions were 82.352 mm of cylinder diameter D , cylinder length H_i of 101.364 mm, exhaust port diameter D_p of 25.000 2 mm, cone length H_z of 67.902 5 mm, and the indica seed outlet flow velocity V_1 and seed vertical velocity V_2 were 5.212 m/s and 0.462 m/s, respectively. The seed flow velocity V_1 and seed vertical velocity V_2 of japonica rice were

收稿日期: 2024 – 12 – 22 修回日期: 2025 – 02 – 06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS – 01)

作者简介: 臧英(1973—),女,教授,博士,主要从事水稻精准种植机械研究,E-mail: yingzang@scau.edu.cn

通信作者: 王在满(1979—),男,研究员,博士,主要从事水稻机械化生产装备研究,E-mail: wangzaiman@scau.edu.cn

5.339 m/s and 0.473 m/s, respectively. The flow velocity V_1 and seed vertical velocity V_2 of wheat seeds were 5.341 m/s and 0.408 m/s, respectively. The results of bench verification test showed that the vertical velocity of indica rice seeds was 0.411 m/s, japonica rice seeds was 0.452 m/s, and wheat seeds are 0.457 m/s at the seed outlet, which was consistent with the simulation test results. It can be seen from the bench test of strip sowing performance that the effect of strip arrangement with seed reducer was significantly better than that without seed reducer, and the coefficient of variation of displacement uniformity of indica, japonica rice and wheat was decreased from 41.61%, 25% and 37.84% without seed reducer to 9.10%, 8.42% and 8.49%, respectively, which met the performance requirements of seed reducer. The results can provide guidance for improving the seeding performance of air-fed rice-wheat seeder in the future.

Key words: high-speed seeder; rice - wheat combined use; seed reducer; CFD - DEM

0 引言

投种是排种器精量播种的最后环节,均匀投种是提高播种质量的关键^[1-4],投种时既要保证种子掉落位置的一致性、稳定性和连贯性,又要减小投种对种子造成的损伤^[5],因此,在高速作业环境下,播种机性能面临更高的要求^[6]。

研究人员针对播种机投种方面进行了大量研究,在高速作业条件下,Amazone^[7]、Väderstad^[8]、Maschio^[9]、KVERNELAND^[10]等农机公司通过采用气流辅助投种技术,将气流引入导种管,在气流作用下使排种器排出的种子加速运动,从而减少种子与管壁碰撞,保持较高的播种精度。XING^[11]利用高速影像技术分析水稻排种器在不同工况下的投种轨迹,确定了最优工作条件;而XUE等^[12]设计了一种双弧形投种点引导槽,有效避免了种子与机构摩擦碰撞,从而提高了排种均匀性。YAZGI等^[13]研究了不同导种管尺寸形状对导种性能的影响,发现金属光滑面导种管导种性能优于塑料波纹式导种管。ENDRERUD^[14]通过探索导种管内影响种子投送精度因素得出,当导种管倾斜角为60°时,导种均匀性最佳。国内学者也进行了相关研究,杨文彩等^[15]根据机具前进速度设定投种点位置,实现排种机构零速投种。张春艳等^[16]针对播种中出现的漏播与重播问题,对棉花气吸滚筒式穴播器鸭嘴与取种盘部位进行了改进,增设了1个二次播种机构,并明确了其安装点位、种道形状以及进出口结构等相关参数。李玉环等^[17]设计了气吸式排种器的直线推送机构,以防止种子在导种通道内因碰撞而错位,同时提出了直线推送结合末端分离的播种方式,有效解决了横向偏移对播种效果的不良影响。

综上所述,在高速投种方面,国内外学者主要通过优化投种方法或改进投种装置结构来提升投种稳定性^[18],但忽视了种子运动速度过快导致种子接触地面时碰撞反弹增大造成投种不稳定,投种精度和

均匀性较低等问题^[19]。为此,本文设计一种适用于气送式稻麦兼用型高速播种机的种子减速器,使得高速种子流进入种子减速器经减速后实现流速和种子速度均减小。采用CFD-DEM^[20-23]耦合仿真分析不同结构尺寸种子减速器及其减速性能,并通过台架试验进行验证。

1 基本结构与工作原理

种子减速器作为气送式播种机投种环节减速装置,其安装在开沟装置机架上(图1)。考虑到种子减速器安装位置与空间,需要尽量缩减尺寸,种子减速器是以标准stairmand型^[24]旋风分离器为基础进行结构改进,其结构由进种管、排气口、圆筒部分和锥筒部分组成,如图2所示。基于前期实验室研究基础^[25],导种管内径为25 mm,出种口处导种管外径为35 mm,因此固定进种口外径为25 mm,出种口直径为35 mm。

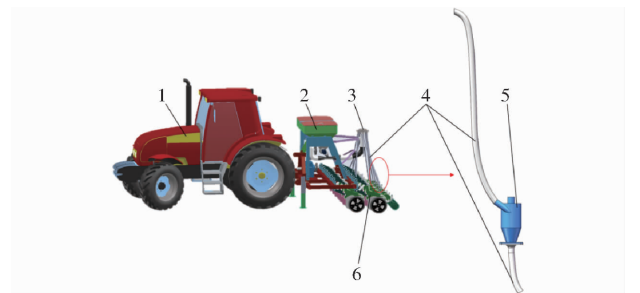


图1 气送式稻麦兼用型高速播种机总体结构图

Fig.1 Overall structure of air-fed rice - wheat dual-purpose high-speed seeder

1. 拖拉机 2. 种箱 3. 分配器 4. 导种管 5. 种子减速器 6. 开沟装置

高速种子流进入种子减速器后,种子和气流受壁面约束沿壁面向下旋转运动,当气流到达锥筒段时,因锥体直径收缩和中心部位低压区的吸引向种子减速器中心区域靠拢并转而向上继续作螺旋形运动,最后经排气管排出,被甩向器壁附近的种子沿器壁螺旋下落,从出种口排出,如图3所示,此时出种

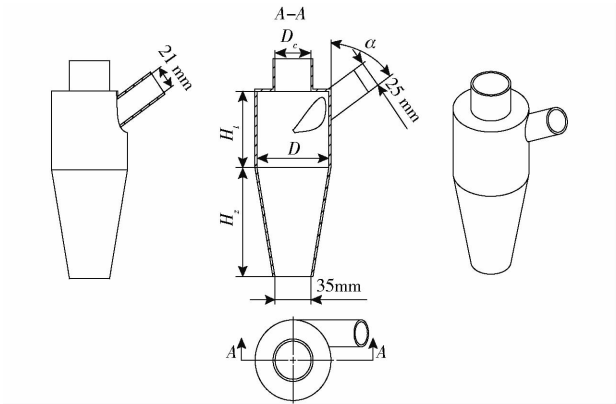


图 2 种子减速器结构图

Fig. 2 Seed reducer structure

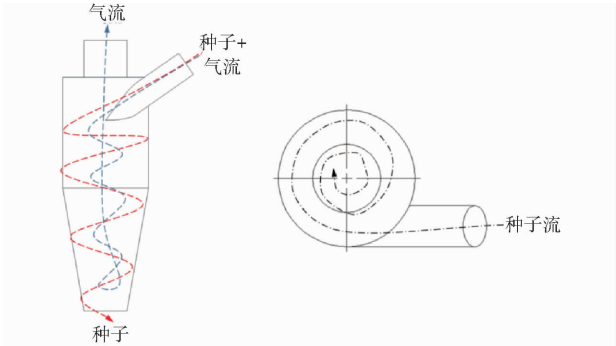


图 3 种子减速器工作原理图

Fig. 3 Working principle of seed reducer

口处种子速度相比进种口处大幅减小。

由文献[26]可知,种子减速器性能主要与进种角度 θ 、圆筒直径 D 、圆筒长度 H_1 、排气口直径 D_p 和锥筒长度 H_2 相关。

2 仿真试验

种子减速器内部是三维强旋转湍流,流场特别复杂,进行台架试验难以测定相关参数^[27],因此通过 CFD-DEM 数值模拟试验方法,探究气流和种子在种子减速器内部运动情况。

2.1 仿真参数确定

多相流耦合时,准确的物料特性和模型对仿真试验结果的准确程度有很大影响^[28],依据种子三轴尺寸采用小球堆叠法构建仿真模型,种子仿真模型如图 4 所示。由于籼稻种子三轴尺寸差异最大,圆球度最低,导致籼稻种子在种子减速器内与壁面之间的碰撞最难以预测,其流动性在三者之中最差,因此选取籼稻种子为试验种子模型进行仿真试验,后续台架验证试验采用 3D 打印技术对种子减速器进

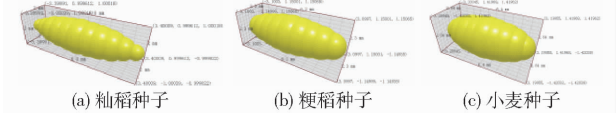


图 4 种子仿真模型

Fig. 4 Seed simulation models

行打印加工,打印材料均为工程塑料 ABS,各试验材料物料特性见表 1^[29]。

表 1 种子与材料特性参数

Tab. 1 Seed and material characterization parameters

参数	籼稻种子	粳稻种子	小麦种子	工程塑料 ABS
三轴尺寸/ (mm × mm × mm)	9.5 × 2.5 × 2.5	7.5 × 3 × 3	6 × 3 × 3	
泊松比	0.25	0.30	0.42	0.394
密度/(kg · m ⁻³)	1 098	1 124	1 350	1 060
剪切模量/Pa	1.08 × 10 ⁸	2.60 × 10 ⁸	5.10 × 10 ⁸	8.96 × 10 ⁸
碰撞恢 复系数	种子与 种子	0.42	0.55	0.42
	种子与 ABS	0.52	0.50	0.60
动摩擦 因数	种子与 种子	0.02	0.01	0.015
	种子与 ABS	0.10	0.15	0.05
静摩擦 因数	种子与 种子	0.353	0.56	0.35
	种子与 ABS	0.50	0.45	0.40

2.2 几何模型和数值解法

种子减速器结构如图 2 所示,利用 Solidworks 软件对种子减速器进行三维建模,保存为 .stl 格式导入 EDEM 中,如图 5a 所示。流体域模型采用 Solidworks 软件进行几何建模,保存为 .STEP 格式导入 Workbench 进行网格划分^[30],划分后网格保存为 .mesh 文件,如图 5b 所示。气相介质为空气,其密度为 1.225 kg/m³,粘度 μ 为 1.789 4 × 10⁻⁵ Pa · s,采取 velocity-inlet 边界条件,设置进种口流速为 20 m/s,种子速度为 5 m/s,种子流量为 5 g/s,排气口为 outlet1,出种口为 outlet2,均设置为自由流出口,将划分好的网格文件导入 Fluent 中进行初始化条件设置,选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[31],计算时间步长设置为 0.000 1 s,步数为 50 000,每个时间步迭代 20 次,总仿真时间为 5 s,选取 1 ~ 5 s 的数据进行分析。

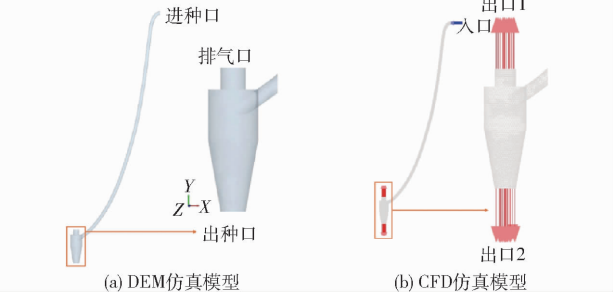


图 5 CFD 和 DEM 仿真模型

Fig. 5 CFD and DEM simulation models

2.3 模型可靠性验证

为验证仿真模型的合理性^[32],通过流速表和高速摄影机分别测量出种口处流速和种子竖直速度,如图 6 所示。在同等条件下进行仿真试验,仿真结果与台架结果对比如图 7 所示。可看出仿真试验时出种口气流速度和种子竖直速度与台架试验结果基本保持一致,验证了仿真模型可行性。

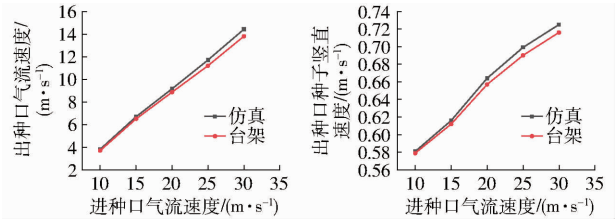
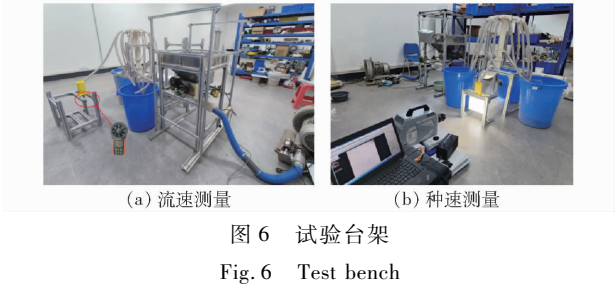


Fig. 7 Comparison of test results between bench and simulation

2.4 仿真单因素试验设计

基于前期课题组研究结果,固定进种口种子速度为 5 m/s,气流速度为 20 m/s,种子流量为 5 g/s。种子减速器是播种机投种过程中的一个构件,已知进种口直径为 25 mm,出种口直径为 35 mm,因此选取圆筒直径、圆筒长度、排气口直径和锥筒长度为试验因素,进行单因素仿真试验,研究各因素对种子减速器流场以及种子运动情况的影响。

2.4.1 圆筒直径对种子减速器减速性能的影响

将圆筒直径设定为 D ,由于安装尺寸限制,选取圆筒直径 D 为 40、50、60、70、80、90 mm 分别进行仿真模拟。

(1)圆筒直径对出种口处气流速度的影响

图 8 为不同圆筒直径种子减速器在出种口处气流速度。由图 8 可看出,圆筒直径为 50 mm 时出种口处气流速度最大,最大值接近 10 m/s,圆筒直径为 90 mm 时出种口处气流速度最小,最小值为 5.413 m/s,当圆筒直径在 50 ~ 90 mm 之间时,随着圆筒直径增大,出种口处气流速度不断减小,可看出圆筒直径增大可对气流起减速作用,影响较显著。

图 9 为不同圆筒直径种子减速器在 $x = 0$ 截面上速度分布云图。从图 9 可看出,圆筒直径较小,流场中心低速区范围越小,且随着圆筒直径增大,速度

最大值逐渐减小,速度范围变小,说明增大圆筒直径有利于减小流场旋流强度。

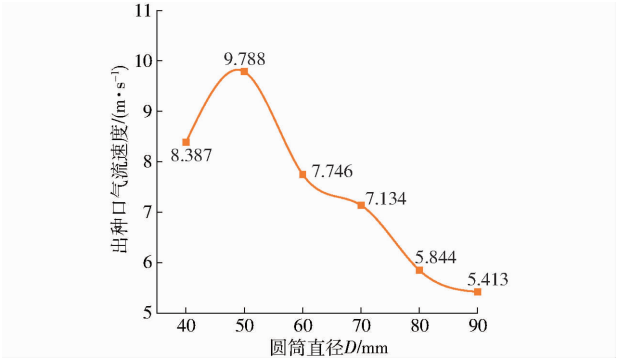


Fig. 8 Airflow velocity at seed outlet of seed reducer with different cylinder diameters

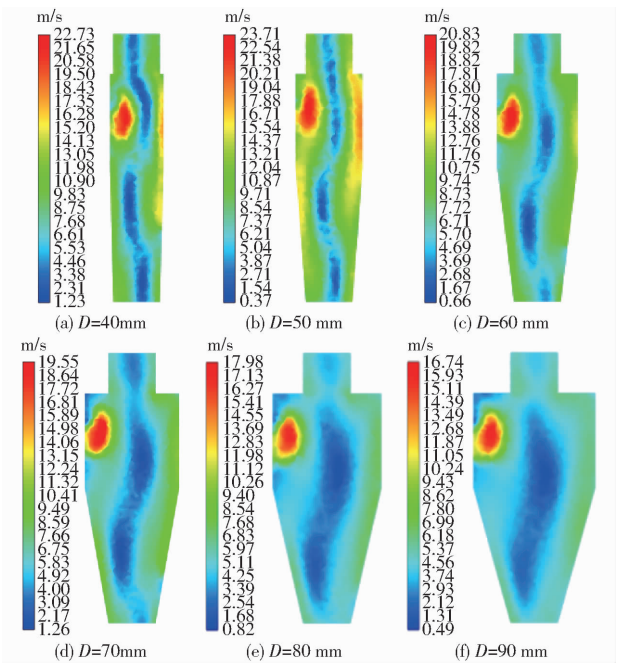


Fig. 9 Cross-sectional velocity of seed reducers with different cylinder diameters at $x = 0$

(2)圆筒直径对出种口处种子竖直速度的影响

图 10 为不同圆筒直径种子减速器出种口处种子竖直速度。从图 10 可看出,随着圆筒直径增大,出种口处种子竖直速度先逐渐减小,后趋于平稳,表明增大圆筒直径对种子减速效果明显。

图 11 为不同圆筒直径的种子减速器种子运动轨迹。从图 11 可看出,圆筒直径越大,种子在圆筒内部运动轨迹越杂乱,滞留时间越久,会出现反弹到圆筒上半部分,聚集在顶部附近做循环圆周运动,形成所谓的“上灰环”情况,不利于种子分离。

2.4.2 圆筒长度对种子减速器减速性能的影响

将圆筒长度设定为 H_t ,由于安装空间有限,种子减速器总高度不应超过最大安装长度 200 mm,选

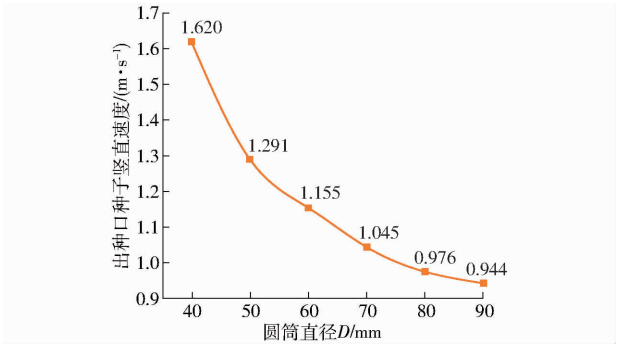


图 10 不同圆筒直径的种子减速器出种口处种子竖直速度
Fig. 10 Seed vertical velocity at seed outlet of seed reducer with different cylinder diameters

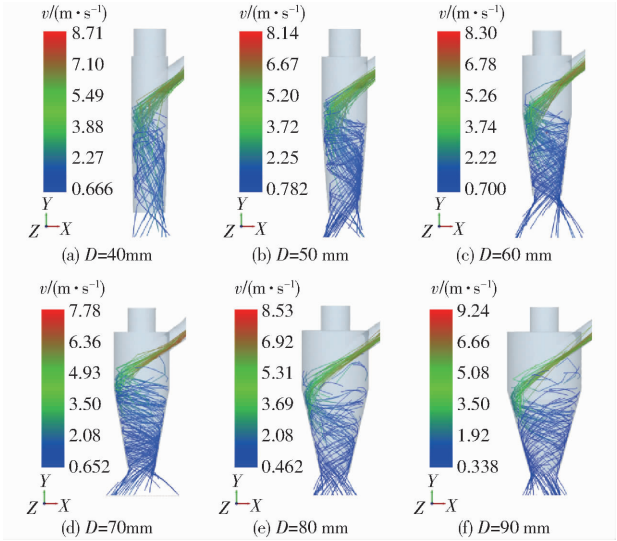


图 11 不同圆筒直径种子减速器种子运动轨迹
Fig. 11 Seed movement trajectory of seed reducer with different cylinder diameters

取圆筒长度 H_i 为 30、50、70、90、110 mm 分别进行仿真模拟。

(1)圆筒长度对出种口气流速度的影响

图 12 为不同圆筒长度的种子减速器出种口处气流速度。从图 12 可看出,随圆筒长度增大,出种口气流速度整体呈减小趋势,当圆筒长度为 30 ~ 50 mm 时,出种口气流速度随圆筒长度增大而减小,当圆筒长度为 50 ~ 90 mm 时,随圆筒长度增大出种口气流速度先小幅增大后大幅减小,当圆筒长度为 90 ~ 110 mm 时,出种口处流速先缓慢减小后慢慢增大,两者影响显著。

图 13 为不同圆筒长度种子减速器在 $x=0$ 截面上速度分布云图。从图 13 可看出,不同圆筒长度的种子减速器流场规律相似,无明显变化,速度最大值均为 19 m/s 左右,中心区域低速区摆动幅度基本不变,出种口处气流速度较稳定。

(2)圆筒长度对出种口处种子竖直速度的影响

图 14 为不同圆筒长度的种子减速器出种口处

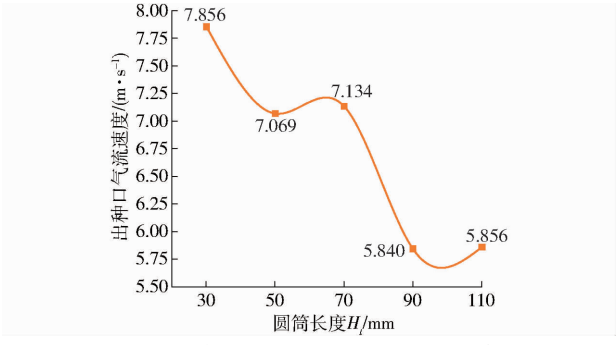


图 12 不同圆筒长度种子减速器出种口处气流速度
Fig. 12 Airflow velocity at seed outlet of seed reducer with different cylinder lengths

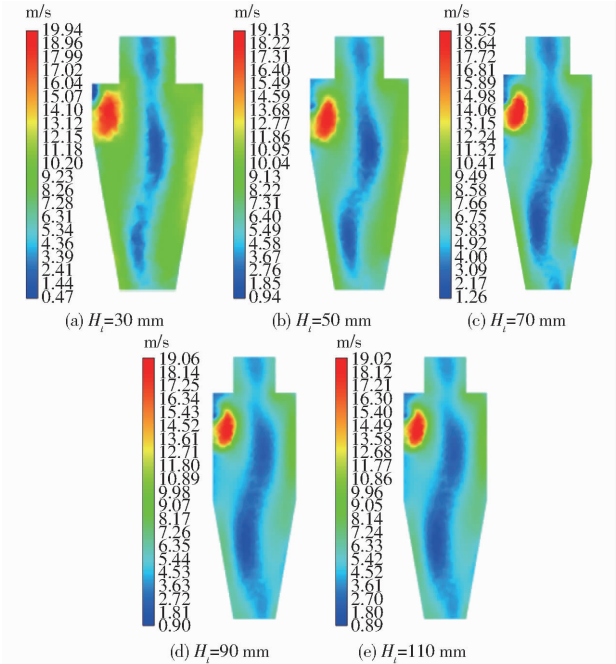


图 13 不同圆筒长度种子减速器在 $x=0$ 截面速度
Fig. 13 Cross-sectional velocity of seed reducers of different cylinder lengths at $x=0$

种子竖直速度。从图 14 可看出,变化数值较小,随圆筒长度增大,出种口处种子竖直速度先减小后增大,最小值点在 50 mm 处,影响显著。结合前文圆筒长度较大时出种口处气流速度较大,因此选取圆筒长度为 70 ~ 110 mm 作为研究区间。

图 15 为不同圆筒长度种子减速器种子运动轨迹图。从图 15 可看出,种子运动聚集程度,观察可知,增大圆筒长度可有效缓解种子在圆筒上部聚集,同时出种口处种子速度相对减少,有利于后续种子稳定投种。

2.4.3 排气口直径对种子减速器减速性能的影响

将种子减速器排气口直径设定为 D_p ,排气口直径取值应小于圆筒直径,选取排气口直径 D_p 为 15、25、35、45、55 mm 分别进行仿真模拟。

(1)排气口直径对出种口气流速度的影响

图 16 为不同排气口直径种子减速器出种口处

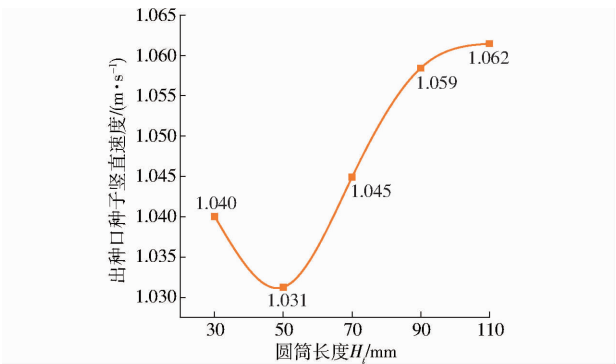


图 14 不同圆筒长度种子减速器出种口处种子
竖直速度

Fig. 14 Vertical speed of seeds at seed outlet of seed
reducer with different cylinder lengths

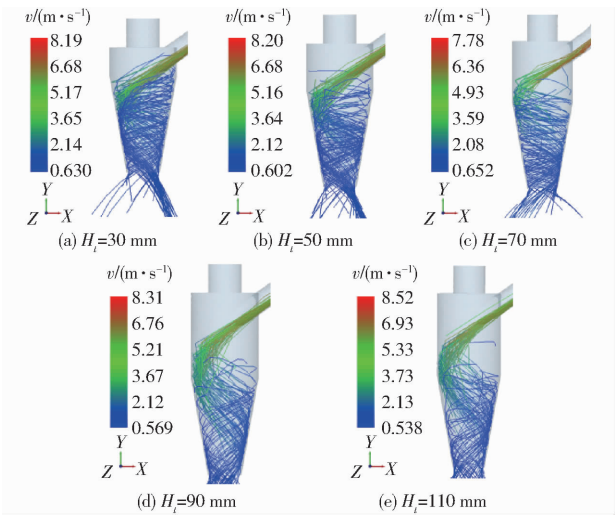


图 15 不同圆筒长度种子减速器种子运动轨迹

Fig. 15 Seed movement trajectory of seed reducer
with different cylinder lengths

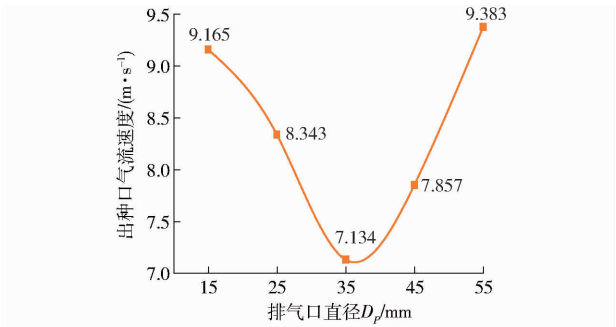


图 16 不同排气口直径的种子减速器出种口处气流速度

Fig. 16 Airflow velocity at outlet of seed reducer
with different exhaust port diameters

气流速度。由图 16 可知,出种口处气流速度随排气口直径增大先减小后增大,两者影响显著,最小点在排气口直径为 35 mm 处,为 7.131 4 m/s,排气口直径为 15、55 mm 时,出种口处气流速度超过 9 m/s。排气口直径过大或过小都会对出种口处气流速度产生一定影响,因此选择适宜排气口直径为 25 ~ 45 mm。

图 17 为不同排气口直径的种子减速器在 $x = 0$ 截面上速度分布云图。从图 17 可看出,速度随排气口直径增大而扩大,排气口直径为 15 mm 时,速度最大值在排气管区域,随排气口直径增大,中心低速区与两边高速区界限逐渐明显,速度最大值出现在进种管与圆筒交界处,且速度最大值不断增大,说明增大排气口直径会增大整个流场速度,不利于流场稳定。

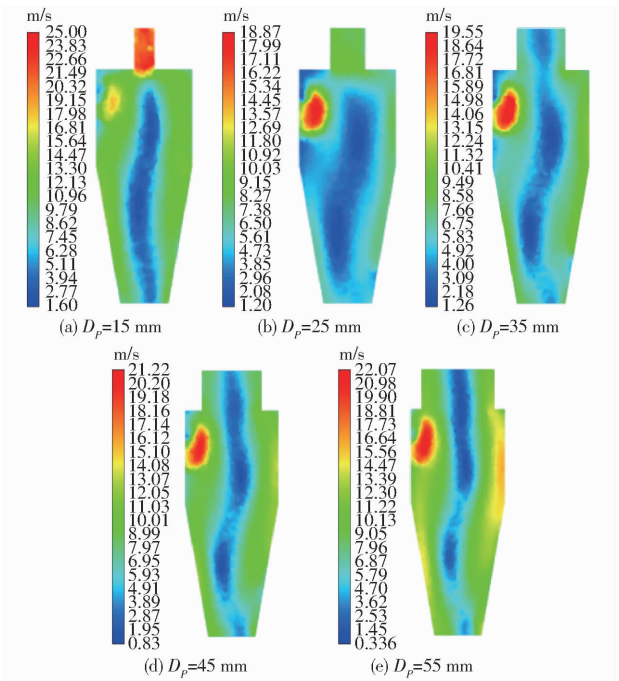


图 17 不同排气口直径种子减速器在 $x = 0$ 截面速度

Fig. 17 Cross-sectional velocity of seed reducers
with different exhaust port diameters at $x = 0$

(2) 排气口直径对出种口种子竖直速度的影响

图 18 为不同排气口直径的种子减速器出种口处种子竖直速度。由图 18 可知,随排气口直径增大,出种口处种子竖直速度缓慢增大,说明增大排气口直径不利于减小出种口处种子速度,两者成反比,影响较显著。

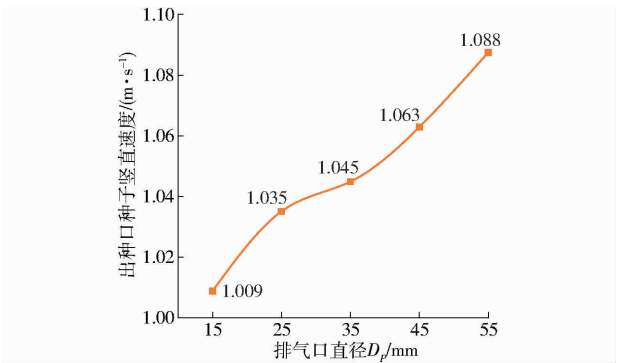


图 18 不同排气口直径的种子减速器出种口处种子
竖直速度

Fig. 18 Vertical speed of seeds at seed outlet of seed
reducer with different exhaust port diameters

图 19 为不同排气口直径种子减速器种子运动轨迹。由图 19 可知,随着排气口直径增大,种子在锥桶部分运动轨迹变得更为松散。当排气口直径为 15 mm 时,种子运动轨迹比排气口直径为 55 mm 时更加集中,出现绕筒壁旋转不下落情况,因此种子在减速器内运动时间也会随着排气口直径减小而延长。这是因为排气口直径较小时,最大速度位置在排气管内,减速器筒体内部速度较小,不利于颗粒分离。相反,当排气口直径较大时,流场速度较低,颗粒受到的离心力减小,绕筒壁旋转损耗变小,也不利于颗粒分离。

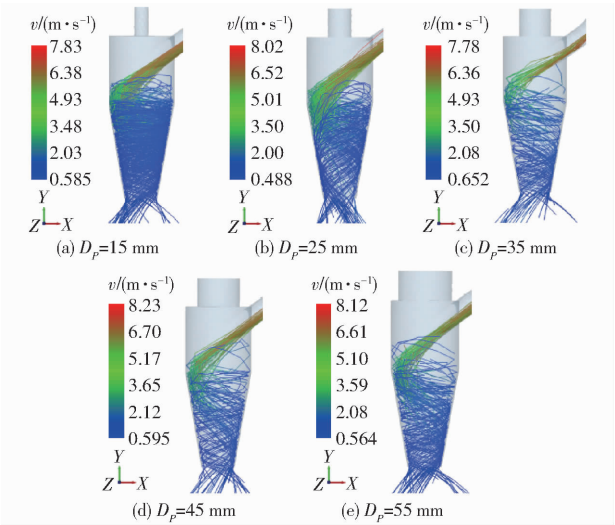


图 19 不同排气口直径种子减速器种子运动轨迹
Fig. 19 Neutron reducer seed movement trajectories with different exhaust port diameters

2.4.4 锥筒长度对种子减速器减速性能的影响

将种子减速器锥筒长度设定为 H_z , 由于安装空间有限,总高度不应超过最大安装长度 200 mm,选取锥筒长度 H_z 为 60、80、100、120、140 mm 分别进行仿真模拟。

(1) 锥筒长度对出种口处气流速度的影响

图 20 为不同锥筒长度种子减速器出种口处气流速度。由图 20 可知,随着锥筒长度增大,出种口处气流速度先减小后增大再减小,两者影响显著。锥筒长度为 100 mm 时出种口处气流速度最大,为 7.134 m/s,气流速度最低值点在 120 ~ 140 mm 之间,最低值为 5.4 m/s。

图 21 为不同锥筒长度种子减速器在 $x = 0$ 截面上速度分布云图。从图 21 可看出,流场速度变化区间较为稳定,最大速度差距不大,随锥筒长度增大,流场速度最小值先增大后减小,且减速器内部中心低速区位置摆动越明显,说明锥筒段越长,内部流场越不稳定。

(2) 锥筒长度对出种口种子竖直速度的影响

图 22 为不同锥筒长度种子减速器出种口处种

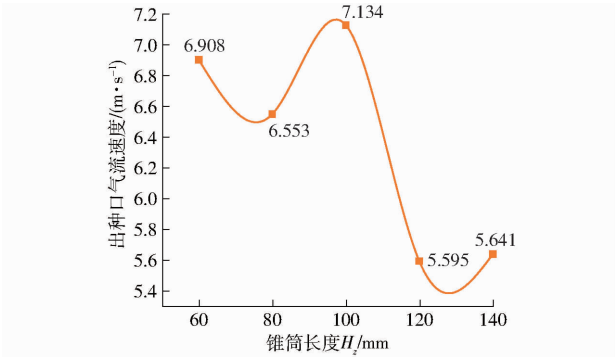


图 20 不同锥筒长度的种子减速器出种口处气流速度
Fig. 20 Airflow velocity at outlet of reducer with different cone lengths

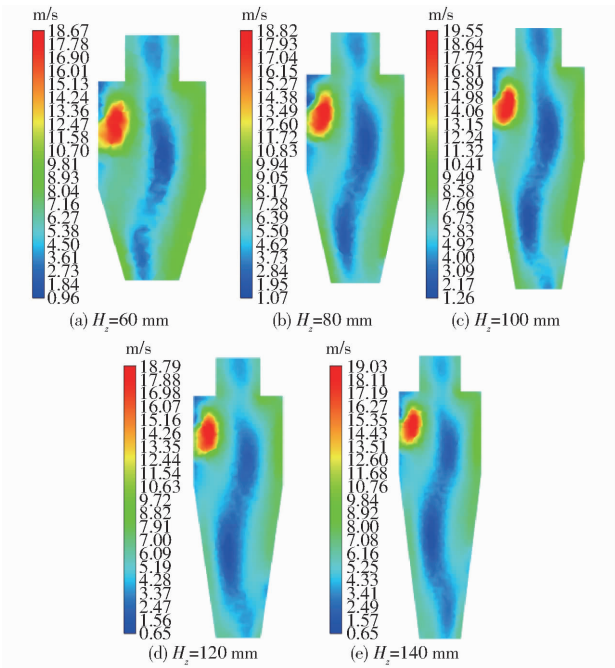


图 21 不同锥筒长度种子减速器在 $x = 0$ 截面速度
Fig. 21 Cross-sectional velocity of seed reducers with different cone lengths at $x = 0$

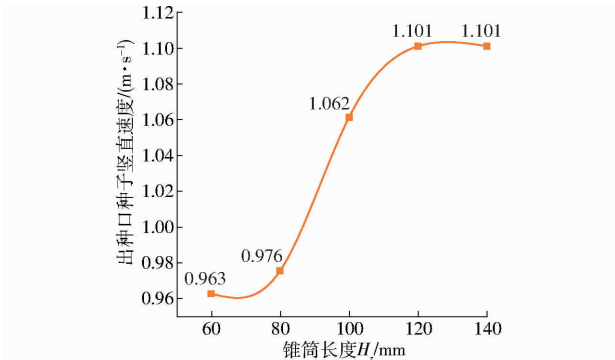


图 22 不同锥筒长度的种子减速器出种口处种子
竖直速度
Fig. 22 Vertical speed of seeds at seed outlet of reducer with different cone lengths

子竖直速度。由图 22 可知,随锥筒长度增加,出种口处种子竖直速度先增大后趋于平稳,影响显著。锥筒长度为 80 ~ 120 mm 时,出种口处种子竖直速

度增幅明显,锥筒长度为 120 ~ 140 mm 时,增幅平缓,两者影响显著。

图 23 为不同锥筒长度种子减速器种子运动轨迹图。由图 23 看出,随锥筒长度增大,出种口处种子速度先增大后减小,种子反弹夹角变小,种子运动轨迹由杂乱变为清晰。

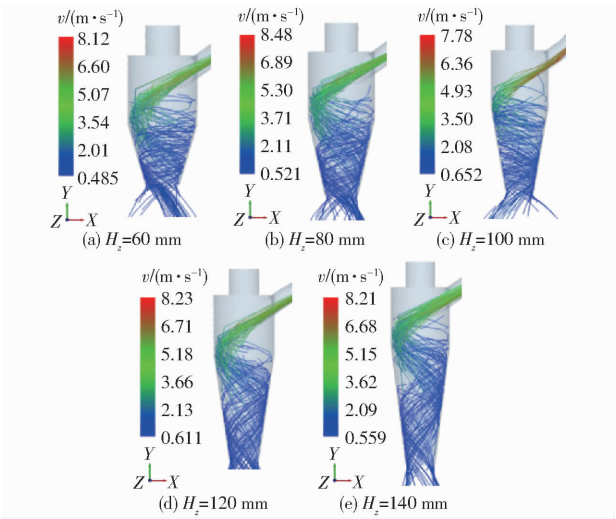


图 23 不同锥筒长度种子减速器种子运动轨迹
Fig. 23 Seed movement trajectory of seed reducer with different cone lengths

综上,通过对单一结构参数的仿真分析,可以看出圆筒直径、圆筒长度、排气口直径和锥筒长度 4 个因素对种子减速性能的影响较大,同时确定种子减速器合理的圆筒直径为 70 ~ 90 mm,圆筒长度为 70 ~ 110 mm,排气口直径为 25 ~ 45 mm,锥筒长度为 60 ~ 100 mm。

2.5 Box- Behnken 正交组合试验

2.5.1 试验设计

选取圆筒直径 D 、圆筒长度 H_t 、排气口直径 D_p 和锥筒长度 H_z 为试验因素,按相同工作参数设定入口处种子速度为 5 m/s,气流速度为 20 m/s,种子流量为 5 g/s,以出种口气流速度 V_1 、出种口种子竖直速度 V_2 作为试验指标,进行四因素三水平的 Box- Behnken 正交组合优化试验,试验因素编码如表 2 所示,每组试验重复 3 次,取平均值。试验方案与结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 2 试验因素编码				
Tab. 2 Test factors and coding				
编码	因素			
	圆筒直径	圆筒长度	排气口直径	锥筒长度
	D	H_t	D_p	H_z
-1	70	70	25	60
0	80	90	35	80
1	90	110	45	100

表 3 试验方案与结果						
Tab. 3 Test protocol and results						
序号	因素				出种口气流	出种口种子
	X_1	X_2	X_3	X_4	速度 V_1 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	竖直速度 V_2 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	-1	-1	0	0	6.71	0.55
2	1	-1	0	0	5.22	0.53
3	-1	1	0	0	5.88	0.58
4	1	1	0	0	5.58	0.47
5	0	0	-1	-1	5.45	0.47
6	0	0	1	-1	7.25	0.52
7	0	0	-1	1	5.04	0.58
8	0	0	1	1	6.48	0.54
9	0	0	0	-1	6.53	0.48
10	1	0	0	-1	5.79	0.47
11	-1	0	0	1	6.00	0.61
12	1	0	0	1	5.32	0.53
13	0	-1	-1	0	5.29	0.54
14	0	1	-1	0	4.94	0.52
15	0	-1	1	0	7.20	0.54
16	0	1	1	0	6.46	0.49
17	-1	0	-1	0	4.94	0.57
18	1	0	-1	0	5.23	0.49
19	-1	0	1	0	8.12	0.54
20	1	0	1	0	6.27	0.50
21	0	-1	0	-1	6.73	0.57
22	0	1	0	-1	5.98	0.46
23	0	-1	0	1	6.12	0.57
24	0	1	0	1	5.25	0.59
25	0	0	0	0	5.30	0.49
26	0	0	0	0	5.58	0.50
27	0	0	0	0	5.62	0.52
28	0	0	0	0	5.66	0.49
29	0	0	0	0	5.58	0.49

2.5.2 回归方程建立及显著性检验

利用 Design-Expert 12 软件对试验结果进行分析,分别得到了出种口气流速度 V_1 和出种口种子竖直速度 V_2 的回归方程。各因素及其交互项对试验指标影响的方差分析结果如表 4 所示。

(1) 出种口气流速度回归模型与显著性检验

由表 4 可知,出种口气流速度 V_1 回归模型拟合度极显著。其中 X_1X_4 、 X_2X_3 、 X_2X_4 、 X_3X_4 的 P 值均大于 0.05,对 V_1 影响不显著,其余各项均显著,并且除 X_1^2 显著以外,其余各项都极显著,说明相关试验因素对 V_1 的影响存在二次关系;失拟项不显著,说明未有其他显著因素影响试验指标。去除不显著的因素和交互项后进行多元拟合,得到 V_1 回归方程为

$$V_1 = 5.55 - 0.3979X_1 - 0.2656X_2 + 0.9062X_3 - 0.2947X_4 + 0.2988X_1X_2 - 0.5356X_1X_3 + 0.1857X_1^2 + 0.1532X_2^2 + 0.3181X_3^2 + 0.2275X_4^2$$

(1)

表 4 出种口气流速度与种子竖直速度
方差分析

Tab.4 Analysis of variance of airflow velocity and
seed vertical velocity of seed outlet in orthogonal
combination experiment

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
出种口 气流速 度 <i>V</i> ₁	模型	16.15	14	1.15	32.26	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁	1.90	1	1.90	53.12	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₂	0.846 8	1	0.846 8	23.68	0.000 2 **
	<i>X</i> ₃	9.85	1	9.85	275.52	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₄	1.04	1	1.04	29.13	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.357 2	1	0.357 2	9.99	0.006 9 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	1.15	1	1.15	32.08	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₄	0.001 0	1	0.001 0	0.029 1	0.866 9
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.037 7	1	0.037 7	1.06	0.321 7
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₄	0.003 6	1	0.003 6	0.101 7	0.754 5
	<i>X</i> ₃ <i>X</i> ₄	0.030 9	1	0.030 9	0.864 8	0.368 2
	<i>X</i> ₁ ²	0.223 6	1	0.223 6	6.25	0.025 4 *
	<i>X</i> ₂ ²	0.152 3	1	0.152 3	4.26	0.005 81 **
	<i>X</i> ₃ ²	0.656 4	1	0.656 4	18.35	0.000 8 **
	<i>X</i> ₄ ²	0.335 7	1	0.335 7	9.38	0.008 4 **
	残差	0.500 7	14	0.035 8		
	失拟	0.422 0	10	0.042 2	2.14	0.240 5
	误差	0.078 7	4	0.019 7		
	总和	16.65	28			
出种口种 子竖直速 度 <i>V</i> ₂	模型	0.045 7	14	0.003 3	15.81	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁	0.011 4	1	0.011 4	54.98	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₂	0.003 1	1	0.003 1	15.02	0.001 7 **
	<i>X</i> ₃	0.000 1	1	0.000 1	0.290 8	0.598 2
	<i>X</i> ₄	0.016 8	1	0.016 8	81.21	<0.000 1 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.002 1	1	0.002 1	9.96	0.007 0 **
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.000 5	1	0.000 5	2.25	0.155 8
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₄	0.001 5	1	0.001 5	7.04	0.018 9 *
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.000 1	1	0.000 1	0.316 0	0.582 9
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₄	0.003 4	1	0.003 4	16.67	0.001 1 **
	<i>X</i> ₃ <i>X</i> ₄	0.001 8	1	0.001 8	8.80	0.010 2 *
	<i>X</i> ₁ ²	0.000 9	1	0.000 9	4.57	0.050 7
	<i>X</i> ₂ ²	0.003 5	1	0.003 5	16.81	0.001 1 *
	<i>X</i> ₃ ²	0.000 5	1	0.000 5	2.42	0.142 4
	<i>X</i> ₄ ²	0.002 3	1	0.002 3	11.31	0.004 6 *
	残差	0.002 9	14	0.000 2		
	失拟	0.002 4	10	0.000 2	1.78	0.303 2
	误差	0.000 5	4	0.000 1		
	总和	0.048 6	28			

注：* 表示影响显著 (0.01 ≤ *P* < 0.05)，** 表示影响极显著 (*P* < 0.01)。

(2) 出种口种子竖直速度 *V*₂ 回归模型与显著性检验

由表 4 可知,出种口种子竖直速度 *V*₂ 回归模型拟合度极显著。其中 *X*₃、*X*₁*X*₃、*X*₂*X*₃、*X*₁²、*X*₃² 的 *P* 值大于 0.05,对 *V*₂ 影响不显著,其余项皆显著,并且 *X*₁、*X*₂、*X*₄、*X*₁*X*₂ 和 *X*₂*X*₄ 对 *V*₂ 影响极其显著,说明相

关试验因素对出种口种子速度 *V*₂ 的影响存在二次关系;失拟项不显著,说明未有其他显著因素影响试验指标。去除不显著因素和交互项后进行多元拟合,得到 *V*₂ 回归方程为

$$V_2 = 0.497\ 8 - 0.030\ 8X_1 - 0.016\ 1X_2 - 0.002\ 2X_3 + 0.037\ 4X_4 - 0.022\ 7X_1X_2 - 0.019\ 1X_1X_4 + 0.029\ 3X_2X_4 - 0.021\ 3X_3X_4 + 0.023\ 1X_2^2 + 0.019\ 0X_4^2$$

(2)

2.5.3 响应曲面

(1) 各因素对出种口气流速度 *V*₁ 的影响

当排气口直径为 35 mm、锥筒长度为 80 mm 时,圆筒直径与圆筒长度对 *V*₁ 的影响如图 24a 所示。从图 24a 可以看出,当圆筒直径固定时,*V*₁ 随着圆筒长度增大逐渐减小,并且当圆筒长度为 90 ~ 110 mm 时,*V*₁ 取得最小值,当圆筒长度固定时,*V*₁ 随着圆筒直径增大逐渐减小,在圆筒直径为 80 ~ 90 mm 时取值较小。当圆筒长度为 90 mm、锥筒长度为 80 mm 时,圆筒直径与排气口直径对出种口气流速度 *V*₁ 的影响如图 24b 所示。从图 24b 可看出,当圆筒直径固定时,*V*₁ 随着排气口直径的增大逐渐增大,并且当排气口直径为 25 ~ 35 mm 时,*V*₁ 取得较小值。当排气口直径固定,圆筒直径较大时,随圆筒直径增大,*V*₁ 逐渐增大,当排气口直径为 30 ~ 45 mm 时,随圆筒直径增大,*V*₁ 逐渐减小,并且当圆筒直径为 70 ~ 80 mm 时,*V*₁ 取得较小值。

原因为增大圆筒长度,在轴向上会加长气流运动长度,气流绕圆筒壁运动圈数变多,与壁面接触摩擦损失更大,因此增大圆筒长度有利于减小出种口气流速度。而圆筒直径增大会在径向上扩大气流旋转半径,气流旋转直径增大,旋流强度降低,因此增大圆筒直径也能减小出种口处气流速度。

(2) 各因素对出种口种子竖直速度 *V*₂ 的影响

当排气口直径为 35 mm、锥筒长度为 80 mm 时,圆筒直径与圆筒长度对出种口种子竖直速度 *V*₂ 的影响如图 24c 所示。从图 24c 可看出,当圆筒直径固定时,*V*₂ 随着圆筒长度增大先减小后增大趋势,并且当圆筒长度为 90 ~ 110 mm 时,*V*₂ 取得较小值;当圆筒长度固定时,*V*₂ 随着圆筒直径增大逐渐减小,并且当圆筒直径为 80 ~ 90 mm 时,*V*₂ 取得较小值。

当圆筒长度为 90 mm、排气口直径为 35 mm 时,圆筒直径与锥筒长度对出种口种子竖直速度 *V*₂ 的影响如图 24d 所示。从图 24d 可以看出,当圆筒直径固定时,*V*₂ 随着锥筒长度的增大逐渐增大,并且当锥筒长度为 60 ~ 80 mm 时,*V*₂ 取得较小值;当锥筒长度固定时,*V*₂ 随着圆筒直径增大逐渐减小,并且当圆筒直径为 80 ~ 90 mm 时,*V*₂ 取得较小值。

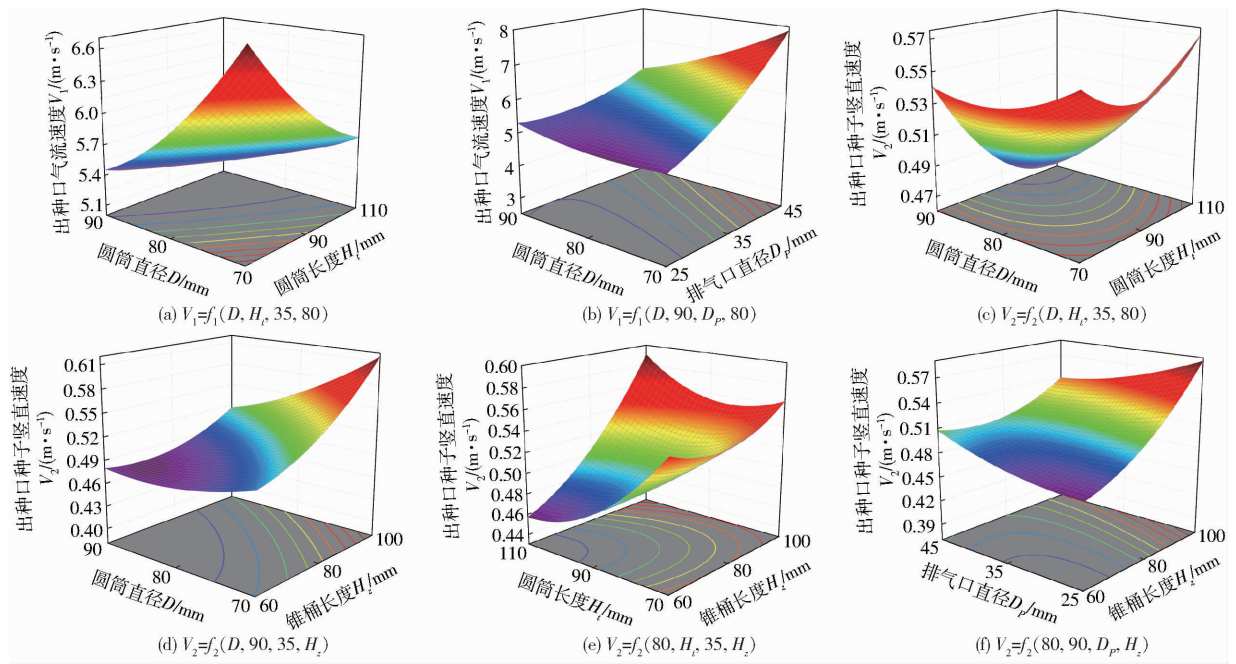


图 24 交互作用响应曲面

Fig. 24 Interaction response surfaces

当圆筒直径为 80 mm、排气口直径为 35 mm 时,圆筒长度与锥筒长度对出种口种子竖直速度 V_2 的影响如图 24e 所示。从图 24e 可以看出,当圆筒长度固定时, V_2 随着锥筒长度增大先减小后增大趋势,并且当锥筒长度为 60 ~ 80 mm 时, V_2 取得较小值;当锥筒长度固定时, V_2 随着圆筒长度增大逐渐减小,并且当圆筒长度为 90 ~ 110 mm 时, V_2 取较小值。

当圆筒直径为 80 mm、圆筒长度为 90 mm 时,排气口直径与锥筒长度对出种口种子竖直速度 V_2 的影响如图 24f 所示。从图 24f 可以看出,当排气口直径固定时, V_2 随着锥筒长度增大而增大,并且当锥筒长度为 60 ~ 80 mm 时, V_2 取得较小值;当锥筒长度固定时,当锥筒长度为 60 ~ 80 mm 时,增大排气口直径, V_2 逐渐变大,当锥筒长度为 80 ~ 100 mm 时,增大排气口直径, V_2 逐渐减小,并且当排气口直径为 25 ~ 35 mm 时, V_2 取得较小值。

保持其他结构参数不变,只改变单一结构参数,当圆筒直径增大,减速器内部的离心力场越弱,种子所受离心力降低,同时颗粒沿壁面运行半径增大,与壁面之间摩擦损耗增加,因此增大圆筒直径会减小出种口处种子速度;当圆筒长度增大,在轴向上增大种子运动长度,种子在竖直方向上运动速度增大;当排气口直径逐渐增大,种子减速器内部流场速度最大值先减小后增大,种子在筒内运动受到流场作用力影响其速度,因此随着排气口直径增大,出种口处竖直速度先减小后增大;当锥筒长度增大,锥筒段与圆筒段之间夹角增大,种子与壁面碰撞反弹角度增大,种子更利于分离。

2.5.4 参数优化

为获得种子减速器最佳结构参数,综合实际工作状态对试验指标的影响,采用 Design-Expert 12 软件进行优化求解,即

$$\begin{cases} \min V_1 \\ \min V_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 70 \text{ mm} \leq D \leq 90 \text{ mm} \\ 70 \text{ mm} \leq H_t \leq 110 \text{ mm} \\ 25 \text{ mm} \leq D_p \leq 45 \text{ mm} \\ 60 \text{ mm} \leq H_s \leq 100 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

优化结果表明,当圆筒直径 D 为 82.352 mm、圆筒长度 H_t 为 101.364 mm、排气口直径 D_p 为 25.000 2 mm、锥筒长度 H_s 为 67.902 5 mm 时,试验种子为籼稻时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.212 m/s 和 0.462 m/s;试验种子为粳稻时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.339 m/s 和 0.473 m/s;试验种子为小麦时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.341 m/s 和 0.408 m/s。

在同等条件下进行台架验证试验,试验结果表明:当试验种子为籼稻时,出种口处种子竖直速度为 0.411 m/s,与仿真试验差值为 0.051 m/s;试验种子为粳稻时,出种口处种子竖直速度为 0.452 m/s,与仿真试验差值为 0.021 m/s;试验种子为小麦时,出种口处种子竖直速度为 0.457 m/s,与仿真试验差值为 0.049 m/s,种子竖直速度与多目标优化仿真结果较为符合,说明采用的 CFD-DEM 仿真模型来进行试验分析可靠。

3 台架性能试验

为验证种子减速器结构可行性,结合前文结构设计与分析,搭建条播性能试验台,按照有种子减速器和无种子减速器两种类型,在相同条件下分别进行排种性能试验。

如图 25 所示,试验台架由风机、供种装置、种箱、分配器、导种管、收集桶、种子减速器、排种传送带组成,调试排种传送带速度与实际田间作业速度 13 km/h 保持一致,在传送带上铺设双面胶以便触碰瞬间黏住种子不让其弹跳。



图 25 条播试验台架
Fig. 25 Seed casting test bench

根据广东地区播种农艺,设置籼稻条播播量为 120 kg/hm²,粳稻条播播量为 150 kg/hm²,小麦条播播量为 240 kg/hm²,其他试验条件均与仿真试验保持一致,将 2 m 传送带按宽 20 cm、长 40 cm 截取 5 段,运行机器。

排种效果如图 26 所示。从图 26 可以看出,有无种子减速器 2 种情况排种效果差异较大,当无种子减速器时,传送带上种子分布杂乱,看不出种子成条状分布,且出现粘在传送带上的种子明显少于有种子减速器情况,说明未经过减速的种子由于自身速度和气流速度过大,接触传送带后发生弹跳,有种

子减速器时,排种效果较好,可明显看到种子成条状分布,说明种子经过减速器后速度大幅降低,接触传送带速度不高,能被粘住。

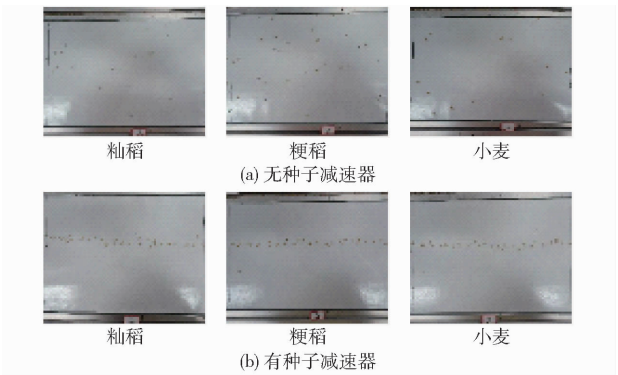


图 26 排种效果
Fig. 26 Seeding effect

截取每段种子并称量,条播性能试验结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,有种子减速器时,籼稻、粳稻和小麦排量均匀性相差不大,排量均匀性变异系数 C_v 分别为 9.10%、8.42% 和 8.49%,说明种子减速器对于不同类型种子适应性较好,但籼稻种子由于其外形尺寸相差较大,受气流作用力的影响要小于粳稻和小麦,使得粳稻与内壁间碰撞散布效果差,排种均匀性低于其他两类种子。无种子减速器时,3 类种子排量均匀性都较差,籼稻、粳稻和小麦的排量均匀性变异系数 C_v 分别为 41.61%、25% 和 37.84%,远高于有种子减速器时情况,说明种子减速器可明显对种子起减速作用,降低出种口处种子速度,提升投种稳定性和均匀性。

表 5 气送式高速播种机种子减速器条播试验结果
Tab. 5 Seed reducer seed sowing test results of air-fed high-speed seeder

品种	类型	各区域质量/g					均值/g	排量均匀性变异系数 C_v /%
		1	2	3	4	5		
籼稻	有种子减速器	0.92	0.88	0.78	1.02	0.98	0.916	9.10
	无种子减速器	0.55	0.35	0.20	0.24	0.22	0.312	41.61
粳稻	有种子减速器	1.85	2.14	2.23	1.98	2.35	2.108	8.42
	无种子减速器	1.02	0.86	1.65	1.21	0.93	1.134	25.00
小麦	有种子减速器	1.23	1.33	1.14	1.12	1.04	1.172	8.49
	无种子减速器	0.54	0.21	0.80	0.63	0.43	0.522	37.84

4 结论

(1)单因素仿真试验结果表明,较优圆筒直径为 70~90 mm,圆筒长度为 70~110 mm,排气口直径为 25~45 mm,锥筒长度为 60~100 mm。基于单因素试验结果对圆筒直径、圆筒长度、排气口直径和锥筒长度 4 个因素开展 Box - Behnken 正交组合试验,通过参数优化分析得到最优参数组合,即圆筒直

径 D 为 82.352 mm、圆筒长度 H_1 为 101.364 mm、排气口直径 D_p 为 25.000 2 mm 和锥筒长度 H_2 为 67.902 5 mm。试验种子为籼稻时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 为 5.212 m/s 和 0.462 m/s;试验种子为粳稻时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 分别为 5.339 m/s 和 0.473 m/s;试验种子为小麦时,出种口气流速度 V_1 和种子竖直速度 V_2 为 5.341 m/s 和 0.408 m/s。

(2) 台架试验结果表明, 试验种子为籼稻时, 出种口处种子竖直速度为 0.411 m/s; 试验种子为粳稻时, 出种口处种子竖直速度为 0.452 m/s; 试验为小麦种子时, 出种口处种子竖直速度为 0.457 m/s, 均与仿真试验结果基本吻合。条播性能试验结果表明, 安装有种子减速器时, 3 类种子投种成条性明显高于无种子减速器情况, 且经种子减速器减速后, 籼稻种子排量均匀性变异系数 C_v 由 41.61% 下降到 9.10%; 粳稻种子排量均匀性变异系数 C_v 由 25% 下降到 8.42%; 小麦种子排量均匀性变异系数 C_v 由 37.84% 下降到 8.49%, 说明种子减速器能显著提高作业效果, 满足工作要求。

参 考 文 献

[1] 王伟伟, 纪瑞琪, 何晓宁, 等. 驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 59-70, 149.
WANG Dongwei, JI Ruiqi, HE Xiaoning, et al. Drive-guided combination slot-assisted seed-attached air-absorbing peanut high-speed precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 59-70, 149. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 29-39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29-39. (in Chinese)

[6] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 25-34.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25-34. (in Chinese)

[7] Amazone. 阿玛松 (AMAZONE) EDX 高速精密播种机[EB/OL]. (2024-03-31)[2024-11-07]. https://www.nongjitong.com/product/amazone_edx_seeder.html.

[8] Väderstad Group. Tempo planter[EB/OL]. (2022-03-13)[2024-11-07]. <https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/>.

[9] Maschio Gaspardo. High speed precision planters-CHRONO[EB/OL]. (2023-01-01)[2024-11-07]. <https://www.nongjitong.com/video/510329.html>.

[10] KVERNELAND. A-DRILL[EB/OL]. (2023-01-01)[2024-11-07]. https://www.kverneland.cn/node_81064/node_225370/s-drill.

[11] XING S Z Y. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178(1): 105697.

[12] XUE P, HAO Y, JIAO W. Design and test of a double-curved guiding groove for a high-speed precision seed-metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(5): 1349-1360.

[13] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.

[14] ENDRERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(2): 177-184.

[15] 杨文彩, 阚成龙, 张效伟, 等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 95-105.
YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 95-105. (in Chinese)

[16] 张春艳, 康建明, 彭强吉, 等. 棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 106-116.
ZHANG Chunyan, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Design and test of secondary seed feeding mechanism of air-suction roller dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 106-116. (in Chinese)

[17] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器投种性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报,2022,38(8):1 – 11.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Performance analysis and structure optimization of the maize precision metering device with air suction at high-speed condition[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(8): 1 – 11. (in Chinese)

[18] 赵淑红,陈君执,王加一,等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):146 – 158.
ZHAO Shuhong, CHEN Junzhi, WANG Jiayi, et al. Design and experiment on V-groove dialing round type guiding-seed device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):146 – 158. (in Chinese)

[19] 王龙宝,杨翰瑜,王庆杰,等. 小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):111 – 120.
WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of air-assisted linear seeding device for wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):111 – 120. (in Chinese)

[20] LEI X, LIAO Y, ZHANG Q,et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150:98 – 109.

[21] HAN Dandan, ZHANG Dongxing, JING Huirong,et al. DEM – CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018,150:426 – 438.

[22] 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.

[23] DU X, LIU C. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize [J]. Biosystems Engineering, 2023,228:1 – 17.

[24] 李杰. 旋风分离器数值模拟与结构优化研究[D]. 成都:西南石油大学,2018.
LI Jie. Numerical simulation and structural optimization of cyclone separator[D]. Chengdu:Southwest Petroleum University, 2018. (in Chinese)

[25] 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.

[26] 杜慧娟. 旋风分离器结构参数优化数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
DU Huijuan. Numerical simulation of structural parameters optimization of cyclone separator[D]. Taiyuan :Taiyuan University of Technology,2019. (in Chinese)

[27] CHEN J, WANG Y, LI X,et al. Erosion prediction of liquid-particle two-phase flow in pipeline elbows via CFD – DEM coupling method[J]. Powder Technology, 2015, 275:182 – 187.

[28] 臧英,黄子顺,秦伟,等. 气吸式杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报,2024,40(6):181 – 191.
ZANG Ying, HUANG Zishun, QIN Wei, et al. Design of hybrid rice air-suction single-seed metering device[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(6):181 – 191. (in Chinese)

[29] 刘章芬. 气力式播量可调水稻穴播排种器的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
LIU Zhangfen. Design and experiment of pneumatic adjustable rice hole sowing and seeding device[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)

[30] ZHANG X, WEN Z, WANG Q, et al. Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2021.

[31] 丁力,杨丽,张东兴,等. 基于 DEM – CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):50 – 60.
DING Li,YANG Li,ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2019, 50(5): 50 – 60. (in Chinese)

[32] 张蕾蕾,陈延信,赵博,等. 一种新型下排气旋风分离器的数值模拟[J]. 流体机械,2021,49(10):50 – 58.
ZHANG Leilei,CHEN Yanxin,ZHAO Bo, et al. Numerical simulation of a new type of cyclone with down exhaust outlet[J]. Fluid Machinery,2021,49(10):50 – 58. (in Chinese)