

小麦气流辅助直线投种装置设计与试验

王龙宝^{1,2} 杨翰瑜^{1,2} 王庆杰^{1,2} 卢彩云^{1,2} 王超^{1,2} 何进^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对小麦精量匀播作业条件下气流辅助投种装置内部压力梯度变化方向与种子运动方向不一致、造成种子倒流或碰撞、降低粒距稳定性等问题,设计了一种小麦气流辅助直线投种装置。基于气-固两相流数学模型建立 CFD-DEM 单向耦合仿真模型模拟投种过程,仿真结果表明:入口气压与管道长度对总压损失及流场压力分布影响显著;投种装置内部流场压力分布均匀,压力梯度变化方向与种子运动方向一致;小麦种子运动轨迹为“直线-曲线-直线”,无倒流与碰撞现象。以入口气压、管道长度、作业速度为试验因素,以粒距变异系数为试验评价指标进行了响应曲面优化试验。试验结果表明:影响粒距变异系数因素的主次顺序为入口气压、作业速度、管道长度;入口气压与管道长度和作业速度均存在交互作用。通过参数优化得到较优参数组合为:入口气压 5.1 kPa、管道长度 24.2 cm、作业速度 0.11 m/s,经土槽试验验证,该条件下粒距变异系数为 6.3%,平均粒距为 5.3 cm,满足小麦精量匀播农艺要求。采用气流辅助直线投种可解决小麦种子倒流与碰撞的问题,从而显著改善播种作业效果,为小麦精量匀播提供技术支撑。

关键词: 小麦; 气流辅助; 投种装置; CFD-DEM; 试验

中图分类号: S223.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0111-10

OSID:



Design and Experiment of Air-assisted Linear Seeding Device for Wheat

WANG Longbao^{1,2} YANG Hanyu^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LU Caiyun^{1,2} WANG Chao^{1,2} HE Jin^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Conservation Tillage Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: An air-assisted linear seed seeding device for wheat was created in order to address the issue that the pressure gradient's change direction in the air-assisted seed seeding device is inconsistent with the direction of seed movement, leading to seed backflow or collision and decreasing the stability of grain spacing. To simulate the seeding process, a CFD-DEM unidirectional coupling simulation model was developed, which was based on the mathematical model of gas-solid two-phase flow. According to the simulation results, the length of the pipeline and the inlet pressure had a big impact on the flow field's pressure distribution and overall pressure loss. The seeding device's flow field had a uniform pressure distribution, and the direction of the pressure gradient change corresponded with the direction in which the seeds migrated. Wheat seeds followed a "straight - curve - straight line" motion path that avoided collisions and backflow. Inlet pressure, pipeline length, and operating speed were used as test factors in the response surface optimization test, and the grain distance variation coefficient served as the test evaluation index. The test findings indicated that inlet pressure, operating speed, and pipeline length were the primary and secondary factors influencing the grain distance variation coefficient. Operating speed and pipe length were influenced by inlet pressure. Through parameter optimization, the following parameters were found to be the best combinations: operation speed of 0.11 m/s, pipeline length of 24.2 cm, and inlet pressure of 5.1 kPa. The soil tank test confirmed that under these conditions, the average grain spacing was 5.3 cm and the coefficient of grain spacing variation was 6.3%, meeting the agronomic requirements for precise, uniform wheat sowing. By addressing the issues of wheat seed backflow and collision, air-assisted linear seeding may greatly enhance seeding performance and offer technical assistance for accurate and consistent wheat sowing.

Key words: wheat; air-assisted; seed falling device; CFD-DEM; experiment

收稿日期: 2023-10-23 修回日期: 2023-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175260)

作者简介: 王龙宝(1999—),男,博士生,主要从事现代农业机械设计方法研究,E-mail: BS20233070709@cau.edu.cn

通信作者: 何进(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与计算机测控技术研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

0 引言

相较于条播、撒播、穴播等传统小麦播种方式,小麦精量匀播通过改善种子田间分布结构,控制小麦基本苗数,减少作物间光照、水分和肥料的竞争,具有省种、节肥、增产等优点^[1]。目前国内外研究者针对小麦精量匀播研究主要集中于小麦精量排种技术^[2-5],对小麦投种技术的研究仍处于初步阶段。

投种作为播种过程中使种子保持均匀有序状态入土的末端环节,对种子最终田间分布的均匀性具有重要作用^[6]。投种过程存在种子与导种管碰撞异位造成粒距变异系数增大的问题^[7],为解决该问题气流辅助投种技术被广泛应用。气流辅助投种通过气流促使种子加速通过导种管,减小种子在导种管内的运动时间,同时对种子运动轨迹进行柔性约束,减少种子与管壁的无序碰撞,具有作业效率高、播种均匀性好、受机具振动影响小等优点,高速作业条件下更具优势^[8]。目前国外农机公司已将气流辅助投种应用于农业生产, Amazone^[9]、Väderstad^[10]、Maschio^[11]、KVERNELAND^[12]等农机公司采用气流辅助投种技术将气流引入导种管,在气流作用下排种器排出的种子沿导种管加速运动,投种过程中种子与管壁碰撞较少,高速作业条件下仍能保持较高播种精度。国内已有学者对气流辅助投种技术展开研究,在玉米气流辅助投种研究方面,许瑾^[13]设计了一种环形气吹辅助投种装置,减少种子在导种管内运动时间及机械碰撞次数;刘瑞等^[14-15]基于文丘里原理设计了一种正压气流辅助吹送投种装置,有效减少了种子无序运动;TANG等^[16]设计了一种气吹式辅助投种装置,配合内充气吹式玉米精量排种器作业,通过向导种管充入正压气流提高玉米精量播种作业质量;上述研究为小麦投种装置结构设计 with 理论研究提供参考。在小麦气流辅助投种研究方面,王超等^[17-18]针对稻麦轮作区设计了一种气动式小麦精准投种装置,通过气动加速将小麦种粒精准投置于种床,实现了稻麦区黏湿土壤条件下小麦点播,但在接收室易生成涡流及溢出气流,该气流压力梯度容易导致小麦种子倒流,最终破坏种子流均匀性;姜萌^[19]设计了一种小麦环隙气流辅助输种装置,通过环隙气流稳定种子运移轨迹,显著提高了投种位置精度和速度一致性,但在投种管末端气流压力梯度与种子运动方向不一致,易发生种子与管壁碰撞现象;梁玉玥^[20]设计了一种稻麦旱作兼用气吹式精量排种器,采用“振动排序供种+计数气吹投种”的方法实现稻麦精量播种,但

在气吹投种环节由于气流压力梯度方向与种子运动不一致,易发生小麦种子倒流与碰撞现象,不能满足均匀有序的匀播要求。上述投种装置存在内部压力梯度变化方向与种子运动方向不一致的问题^[21],容易导致种子倒流或碰撞,制约了小麦精量匀播作业效果的提高。

针对上述问题,本文在现有研究的基础上提出一种气流辅助直线投种方法,将小麦运动轨迹约束为直线,利用 CFD-DEM 耦合仿真分析投种装置内部流场压力分布及投种过程种子运动轨迹,明确影响投种作业效果的主次因素,以期提高小麦精量匀播作业质量。

1 小麦精量匀播农艺与投种装置工作原理

1.1 匀播农艺

小麦精量匀播需满足播种量要求,根据 NY/T 996—2006《小麦精少量播种机作业质量》要求,播种量不大于 135 kg/hm²。本文目标播种量为 75 ~ 135 kg/hm² 范围内可调,小麦理论播种粒距计算公式为

$$S_z = \frac{1\,000^2}{nS_m}$$

(1)

其中

$$n = \frac{1\,000^2 Q}{q}$$

(2)

式中 S_z ——理论播种粒距, cm
 n ——每公顷播种粒数
 S_m ——固定行距,取 10 cm
 Q ——播种量, kg/hm²
 q ——小麦种子千粒质量,鲁原 502 千粒质量约 43.7 g

当小麦种子千粒质量与行距固定时,播种量越大理论播种粒距越小,经过计算理论播种粒距为 3.2 ~ 5.8 cm,如图 1 所示。

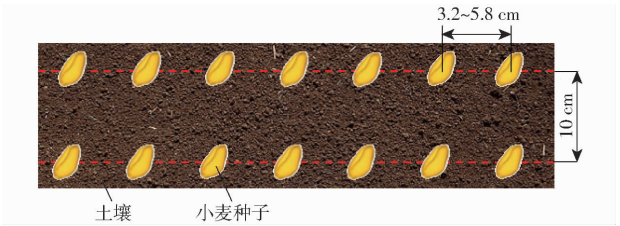


图 1 小麦精量匀播农艺

Fig. 1 Agronomy of wheat precision and uniform sowing

1.2 投种装置工作原理

气流辅助直线投种系统总体结构如图 2a 所示,主要由气吸式小麦精量排种器、空气压缩机与投种装置组成。气流辅助直线投种工作原理如图 2b 所示。作业时投种装置匀速向前运动,小麦精量排种器排出均匀有序的种子流。空气压缩机输出稳定正

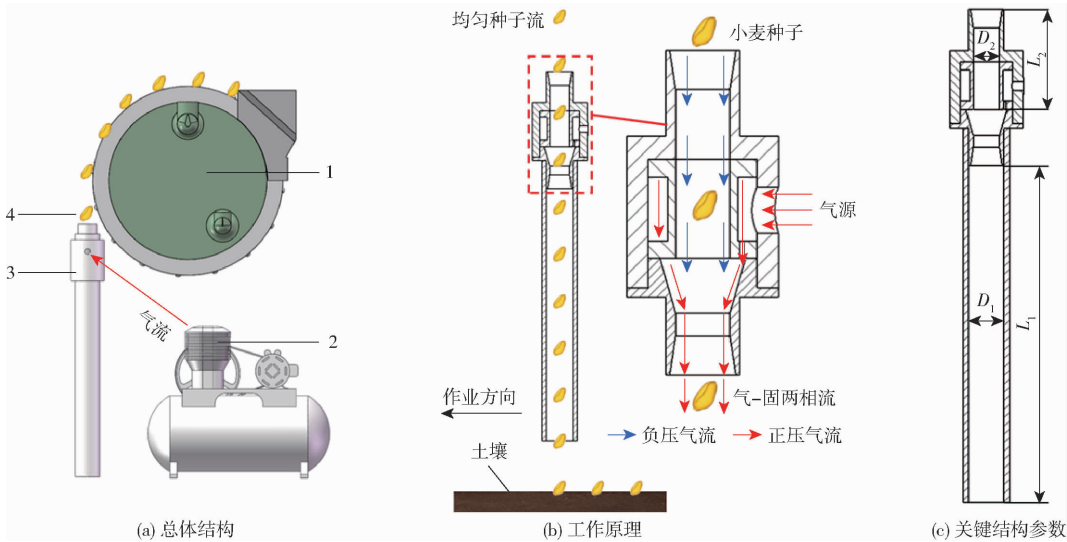


图 2 气流辅助直线投种装置结构与工作原理图

Fig. 2 Working principle diagrams of air-assisted seeding

1. 小麦精量排种器 2. 空气压缩机 3. 投种装置 4. 均匀种子流

压气流,为投种装置提供气源。正压气流进入投种装置并向下喷射,气体发生绝热膨胀,正压气流中的压力能转化为动能,使得正压气流流速增大,而气体压力下降。由于正压气流的引射效应,投种装置顶部生成负压气流。精量排种器排出均匀种子流,小麦种子在自身重力与负压气流的作用下被吸入投种装置,并与气流混合形成气-固两相流。正压气流将小麦种子运动引导为沿轴线的加速直线运动,同时对种子进行柔性约束减少碰撞频次,最终小麦种子落入种床完成气流辅助直线投种作业。投种过程中气流运动方向与种子运动方向保持一致,即说明投种装置内部气流压力梯度变化方向与种子运动方向一致。

投种装置基于气流引射效应实现种子与气流混合,是维持种子流均匀性的关键部件,参照文献[17-18]设计投种装置结构,其结构如图 2c 所示, L_1 为管道长度;管道内径 D_1 为 19 mm;负压段长度 L_2 为 55 mm;负压段内径 D_2 为 13 mm。

2 CFD-DEM 耦合仿真

2.1 气-固两相流数学模型

本文所述气-固两相流中容积含固率小于 5%,单个小麦颗粒体积与质量较小,可以忽略颗粒对流场的影响,与颗粒-流体间的相互作用相比,颗粒-颗粒间的相互作用可忽略^[22],因此该气-固两相流属于稀相流动。颗粒多相流数学模型可以有效地分析气-固两相流的流动特性^[23],为选择耦合仿真方法、种子在气流场的受力类型和气流流动参数提供参考依据^[24]。目前被实践证明具有实用性的多相流数学模型主要包括:欧拉模型、欧

拉-拉格朗日模型、动力论模型、达西流模型和欧根方程模型等^[25]。根据气流辅助投种过程中小麦颗粒运动特征,采用基于欧拉-拉格朗日框架的颗粒轨道模型,该模型将气相视为连续介质,将固相作为离散相处理。

2.1.1 气相控制方程

为求解小麦颗粒拉格朗日方程,需确定颗粒周围气流场流动特性。用于气流辅助投种的空气为连续相,其动力学行为可用欧拉法分析。在欧拉-拉格朗日框架下连续相遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒定律。本文不涉及传热研究,仅考虑气-固两相间的动量交换,故忽略能量守恒方程^[26]。质量守恒方程与动量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f V) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{DV}{Dt} = f_b - \frac{1}{\rho_f} \nabla p \tag{4}$$

式中 $\frac{\partial \rho_f}{\partial t}$ ——控制体质量增量, g

$\nabla \cdot (\rho_f V)$ ——流出控制体质量, g

$\frac{DV}{Dt}$ ——控制体动量变化量

f_d ——控制体所受体积力, N

$\frac{1}{\rho_f} \nabla p$ ——控制体所受压差力, N

2.1.2 固相控制方程

小麦颗粒运动过程可分解为受冲击力作用的瞬时碰撞运动及受流场作用的悬浮运动,通过拉格朗日方法跟踪计算域内的离散相颗粒,分别求解平移与旋转运动,求解过程遵循欧拉第一定律与第二定律^[27]。颗粒相运动方程为

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_c + F_{f \rightarrow p} + m_p g \tag{5}$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_c + M_{f \rightarrow p} \tag{6}$$

式中 m_p ——颗粒质量, g
 V_p ——颗粒平移运动速度, m/s
 F_c ——颗粒-颗粒及颗粒-壁面冲击力, N
 $F_{f \rightarrow p}$ ——流体对颗粒的作用力, N
 g ——重力加速度, m/s²
 I_p ——惯性项
 ω_p ——颗粒旋转角速度, rad/s
 M_c ——由切向力产生的力矩, N·m
 $M_{f \rightarrow p}$ ——由流体速度梯度产生的力矩, N·m

2.2 CFD 仿真模型

基于 Fluent 建立 CFD 仿真模型, 预处理流程如图 3 所示, 采用 Solidworks 软件建立不同尺寸的三维模型。如图 3a 所示, 将三维模型另存为 .x-t 格式文件导入 Spaceclaim 软件中完成流体域抽取^[28]。如图 3b 所示, 使用 BOI 方法对流体域进行局部加密。如图 3c 所示, 将流体域导入 Fluent 软件中, 通过 Fluent Meshing 模块完成流体域结构化网格划分。边界条件如表 1 所示, 根据实际情况设置。由于投种装置内部气体流动属于入口压力稳定的管道流动, 故采用稳态计算方法; 气流实际流动速度小于 100 m/s, 马赫数小于 0.3, 属于不可压缩流体, 故采用 Pressure - Based Slover 求解; 采用 Pressure - Velocity Coupling 求解算法中的 SIMPLE 算法。

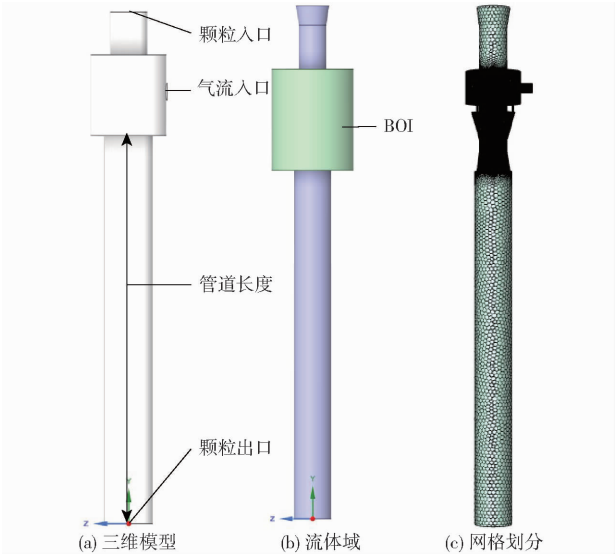


图 3 Fluent 预处理

Fig.3 Fluent pre-processing

2.3 DEM 仿真模型

基于 Rocky DEM 软件建立 DEM 仿真模型, 将投种装置三维模型另存为 .STL 格式导入 Rocky DEM 软件中。通过高精度 3D 扫描仪获取小麦三维

表 1 边界条件设置

Tab.1 Boundary condition setting

边界名称	边界类型	设置参数
颗粒入口	Pressure-outlet	标准大气压
颗粒出口	Pressure-outlet	标准大气压
气流入口	Pressure-inlet	
内壁面	Wall	不可流通壁面

点云图, 经后处理建模软件建立小麦颗粒三维模型。将小麦颗粒三维模型以自定义多面体导入 Rocky DEM 软件中获得小麦颗粒离散元模型, 如图 4 所示。根据实际需要在接触模型中设置法向力为 Hertzian Spring Dashpot, 切向力为 Mindlin - Deresiewicz, 滚动阻力模型为 Type C: Linear Spring Rolling Limit, 数值软化因子为 1^[29]。投种装置由透明塑料与铝合金材料组成, 仿真参数如表 2 所示^[30-31]。

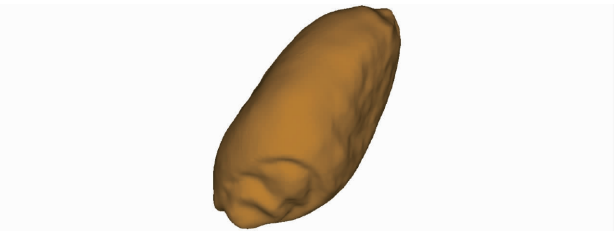


图 4 小麦颗粒离散元模型

Fig.4 Particles discrete element model of wheat

表 2 仿真模型关键参数

Tab.2 Key parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
小麦泊松比	0.29	小麦-小麦碰撞恢复系数	0.50
小麦剪切模量/Pa	5.01×10^8	小麦-小麦静摩擦因数	0.58
小麦密度/(kg·m ⁻³)	1 350	小麦-小麦动摩擦因数	0.08
塑料泊松比	0.39	小麦-塑料碰撞恢复系数	0.60
塑料剪切模量/Pa	7.19×10^8	小麦-塑料静摩擦因数	0.50
塑料密度/(kg·m ⁻³)	1 240	小麦-塑料动摩擦因数	0.01
铝合金泊松比	0.3	小麦-铝合金碰撞恢复系数	0.50
铝合金剪切模量/Pa	2.4×10^{10}	小麦-铝合金静摩擦因数	0.40
铝合金密度/(kg·m ⁻³)	2 700	小麦-铝合金动摩擦因数	0.04

2.4 仿真结果与分析

2.4.1 入口气压对气流场的影响

为分析不同气压对投种装置内部气流场的影响, 进行单因素仿真试验, 固定管道长度为 20 cm, 在仿真模型中设置不同水平气流入口气压。预试验结果表明, 入口气压大于 7 kPa 种子加速现象明显, 造成小麦种子落地初速度过大, 种子落地后弹跳现象加剧, 从而降低粒距稳定性; 而气压小于 1 kPa 将减弱气流引射效果, 不能较好地形成负压气流。因此将仿真试验设置 1、3、5、7 kPa 共 4 个水平, 以减弱种子落地后弹跳。为探究小麦种子运动区域流场的变化情况, 首先在投种装置内部流场建立 26 个等

距横截面,截面间距 10 mm,并按照自上而下的顺序对截面进行编号,如图 5 所示。不同气压条件下横截面总压的面积加权平均值变化曲线如图 6 所示,由图 6 可知,横截面 1 至横截面 6 总压均为负值,验证了由于气流引射作用在投种装置顶部形成负压气流,而负压峰值随入口气压增大而增大,说明气压对气流引射作用具有正效益,气压越大有助于小麦种子被吸入投种装置;横截面 7 至横截面 10 总压均为正值,并出现明显的压降现象,是由于正压气流进入投种装置向下喷射,经过绝热膨胀正压气流中压力能转化为动能,造成正压气流压力减小,而正压峰值随入口气压增大而增大,但是压降现象较为明显;横截面 11 至横截面 26 总压呈平稳下降趋势,压降主要由管道沿程压力损失造成,而管道末端横截面总压与入口气压呈正相关;横截面总压沿投种装置轴线逐级有序变化,无明显压力突变。不同气压条件下投种装置内部纵截面压力云图如图 7 所示,小麦主要的运动区域压力分布均匀,说明投种过程因流场压力突变导致小麦运动方向突变与管壁碰撞概率较小。区别于现有的投种技术研究,小麦颗粒运动方向与压力梯度方向一致,理论上不存在种子倒流与碰撞现象,因此投种装置结构设计合理,满足小麦直线投种的要求。

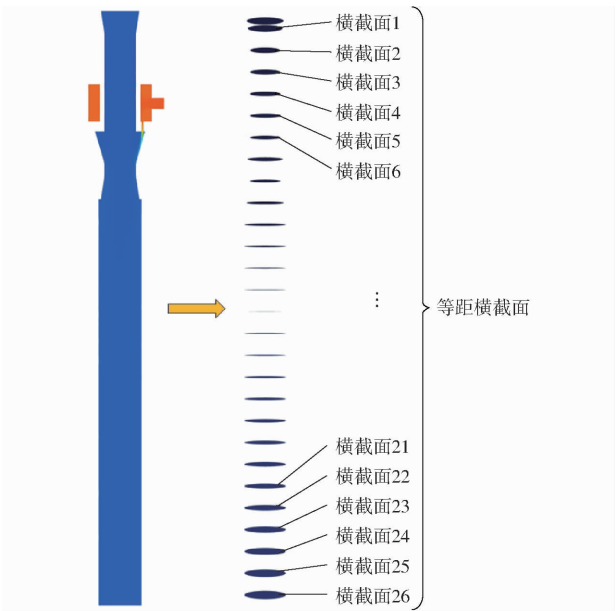


图 5 等距横截面编号

Fig. 5 Numbers for equidistant cross section

2.4.2 管道长度对气流场的影响

为分析不同管长对投种装置内部气流场的影响,进行单因素仿真试验,固定气流入口压力为 3 kPa,设置不同水平管道长度。为满足低位与高位投种作业需求,将仿真试验设置 20、30、40、50 cm 共 4 个水平,仿真结束后采用 2.4.1 节所述 Fluent 后

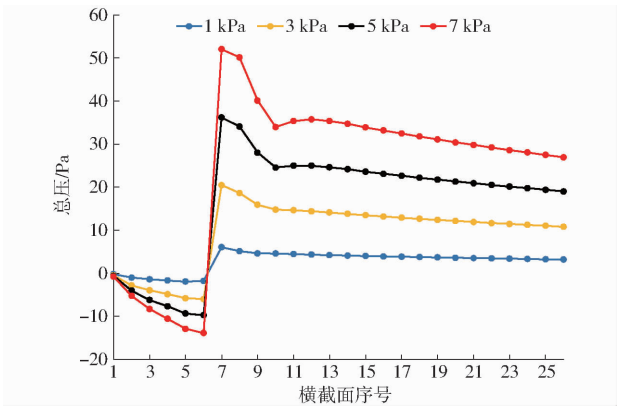


图 6 不同气压条件下横截面总压变化曲线

Fig. 6 Variation curves of cross section total pressure under different pressure conditions

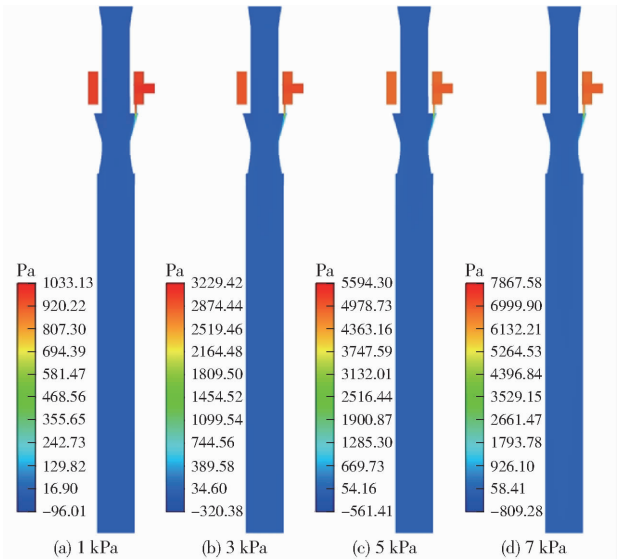


图 7 不同气压条件下装置纵截面压力分布

Fig. 7 Longitudinal section pressure distributions of device under different air pressures

处理方法建立 56 个横截面并按序编号。不同气压条件下横截面总压加权平均值变化曲线如图 8 所示,由图 8 可知,横截面 1 至横截面 6 均为负值,负压峰值随管道长度增加而减小,由此可得管道长度对正压气流引射效应具有负效益;横截面 7 至横截面 10 总压均为正值,正压峰值总体趋于一致,并出现明显的压降现象,管道长度对正压峰值无显著影响;横截面 11 至横截面 26 总压呈缓慢下降趋势,压降主要由管道沿程压力损失造成,管道越长末端横截面总压越小;管长变化未导致装置内部压力突变,横截面总压沿投种装置轴线有序变化,但是管道末端总压随管长增加逐级递减,说明管长对气流沿程压降存在影响。不同管长条件下投种装置内部纵截面压力云图如图 9 所示,投种装置内部压力分布均匀,有利于小麦种子持续加速并稳定运动轨迹。颗粒沿管道运动所需能量主要来源于气流场^[32],因此管道长度变化将影响小麦颗粒动能变化,进一步影

响小麦颗粒运动轨迹。

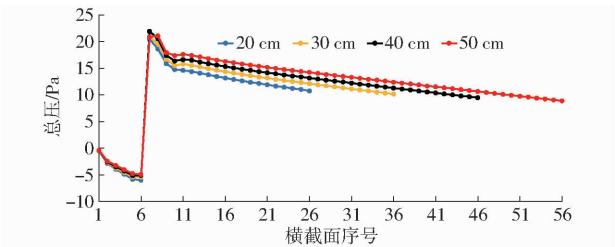


图 8 不同管长条件下横截面总压变化曲线

Fig. 8 Variation curves of total pressure in cross section under different tubes lengths

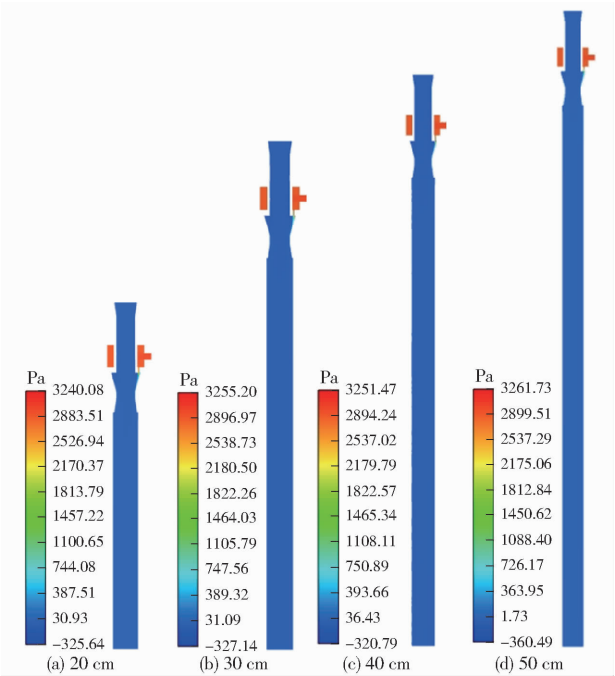


图 9 不同管长条件下装置纵截面压力分布

Fig. 9 Longitudinal section pressure distributions of device under different tube lengths

2.4.3 小麦颗粒运动轨迹

为进一步探究气流辅助直线投种装置可行性,提取单个小麦种子运动轨迹,如图 10 所示。小麦种子自由落体进入投种装置并保持加速直线运动,经过气流入口处运动轨迹由直线变为曲线,并出现短时减速现象,整个投种过程小麦种子经过加速直线-减速曲线-加速直线的运动变化,基本实现投种过程柔性约束。如图 11 所示,气流进入投种装置冲击内壁形成湍流,湍流作用下种子发生自转运动。由于小麦种子形状不规则属于非球形颗粒,自转导致颗粒迎风面积不断变化,颗粒所受流场曳力随之变化。因此小麦种子在气流入口处发生减速与轨迹变化,待迎风面积达到稳定随即恢复直线运动。小麦种子进入投种管受正压气流作用继续保持加速直线运动,最终以一定初速度离开投种装置落入种床。投种过程小麦种子运动轨迹总体趋于一致,未出现种子倒流与碰撞现象,有效减少小麦种子无序运动。

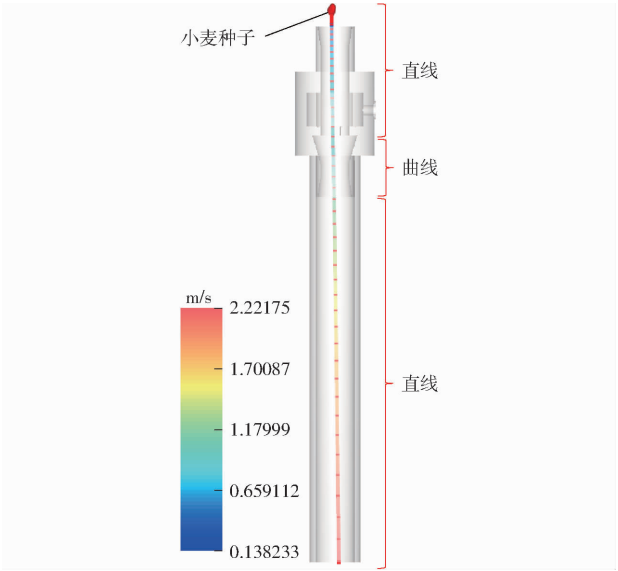


图 10 小麦种子运动轨迹

Fig. 10 Trajectories of wheat grains

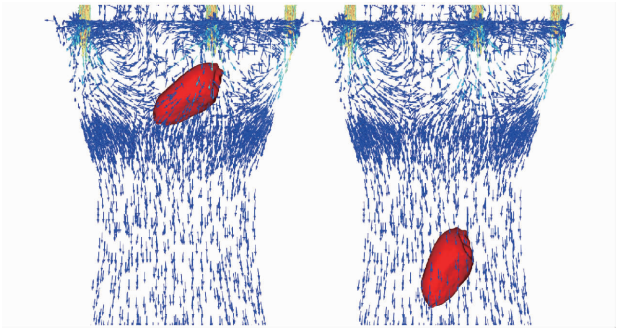


图 11 种子在气流入口处的运动姿态

Fig. 11 Movement of seeds at entrance of air stream

3 投种性能试验

3.1 试验设备与材料

为验证气流辅助直线投种装置的工作性能,于中国农业大学保护性耕作研究中心开展小麦气流辅助投种试验。试验台架如图 12 所示,空气压缩机为

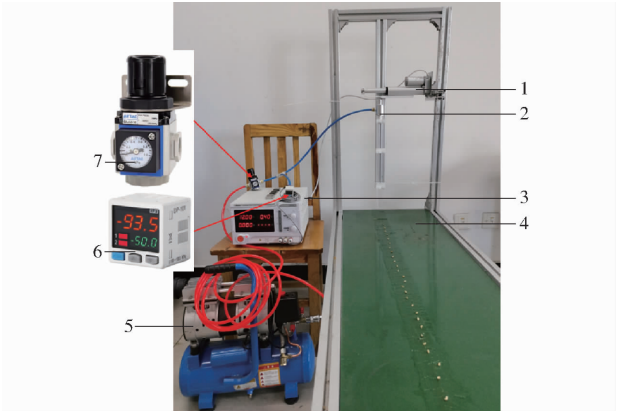


图 12 试验台架

Fig. 12 Test bench

1. 供种装置 2. 气流辅助投种装置 3. 稳压电源 4. 种床带
5. 空压机 6. 数显气压表 7. 气压调节阀

试验设备提供气源,气压调节阀调节气压,气压表实时显示气压,种床带运动模拟机具前进。为实现单粒均匀有序供种设计均匀供种装置^[19],试验材料选用鲁原 502,人工除杂后进行试验。

3.2 试验方法与指标

粒距变异系数是衡量精量播种效果的重要指标之一,参考国家标准 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以粒距变异系数为评价指标,每组试验结束后随机选取 5 段取样点,每段连续选取 20 个种间距,测量种子间距并记录数据。标准差 σ 与粒距变异系数 C 计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{100}} \tag{7}$$

$$C = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \tag{8}$$

式中 $\bar{X}$ ——平均粒距,cm

σ ——标准差,cm

C ——粒距变异系数, %

X_i ——第 i 个种间距,cm

播种作业速度对播种性能影响显著,粒距变异性系数随着作业速度的提高而增加^[33],因此将播种作业速度作为试验影响因素之一。参考上述仿真分析结果及前期预试验结果,选取气流入口气压、管道长度、作业速度为试验因素。为明确上述因素对粒距变异系数的影响规律,基于 Box - Behnken 试验设计原理进行试验,每组试验重复 3 次取平均值,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and coding

编码	因素		
	入口气压/kPa	管道长度/cm	作业速度/(m·s ⁻¹)
-1	0	20	0.10
0	3	30	0.15
1	6	40	0.20

3.3 试验结果与分析

根据 Box - Behnken 试验方案共开展 17 组试验,试验结果如表 4 所示,表中 A 、 B 、 C 为试验因素编码,分别表示入口气压、管道长度、作业速度。利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,建立粒距变异系数 Y 的回归方程,剔除不显著因素后得出粒距变异系数 Y 回归方程为

$$Y = 3.19 - 4.7A - 0.13B + 1.02C + 0.22AB + 1.53AC + 4.15A^2 + 0.3B^2 + 0.93C^2 \tag{9}$$

回归方程方差分析结果如表 5 所示,粒距变异系数回归模型具有极显著性($P < 0.01$),回归方程

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental scheme and results

试验号	因素			粒距变异 系数/%
	A	B	C	
1	1	0	-1	1.10
2	0	0	0	3.10
3	0	1	-1	3.50
4	-1	0	1	12.37
5	0	0	0	3.10
6	1	-1	0	2.78
7	0	0	0	3.23
8	-1	0	-1	13.33
9	1	1	0	2.85
10	1	0	1	6.25
11	0	-1	1	5.65
12	-1	-1	0	12.85
13	0	1	1	5.17
14	0	-1	-1	3.35
15	-1	1	0	12.05
16	0	0	0	3.30
17	0	0	0	3.10

表 5 回归模型方差分析

Tab.5 Regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	274.37	9	30.49	1319.16	<0.0001
A	176.91	1	176.91	7655.04	<0.0001**
B	0.1404	1	0.1404	6.08	0.0431*
C	8.32	1	8.32	360.16	<0.0001**
AB	0.1892	1	0.1892	8.19	0.0243*
AC	9.33	1	9.33	403.85	<0.0001**
BC	0.0992	1	0.0992	4.29	0.077
A^2	72.37	1	72.37	3131.43	<0.0001**
B^2	0.3808	1	0.3808	16.48	0.0048**
C^2	3.65	1	3.65	157.83	<0.0001**
残差	0.1618	7	0.0231		
失拟	0.1318	3	0.0439	5.88	0.06
纯误差	0.0299	4	0.0075		
总和	274.53	16			

注：**表示极显著($P < 0.01$);*表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

失拟不显著($P > 0.05$),表明回归模型拟合效果较好。由表 5 可得, A 、 C 、 AC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对回归模型影响极显著, B 与 AB 对回归模型影响显著,三因素对粒距变异系数影响的主次顺序为气流入口气压、作业速度、管道长度。

利用 Design-Expert 软件导出试验因素间有显著交互作用的响应曲面,如图 13 所示。由图 13a 可知,当作业速度处于中心水平时,气流入口气压与管道长度的交互作用对试验结果影响显著。当管道长度一定时,粒距变异系数随着气压增加而减小。当管道长度增加时,粒距变异系数随气压增加而减小的趋势将增大。由图 13b 可知,当管道长度处于中心水平时,气流入口气压与作业速度的交互作用对试验结果影响显著。当作业速度一定时,粒距变异

系数随着气压增加而减小。当作业速度增加时,粒距变异系数随气压增加而减小的趋势将减小。

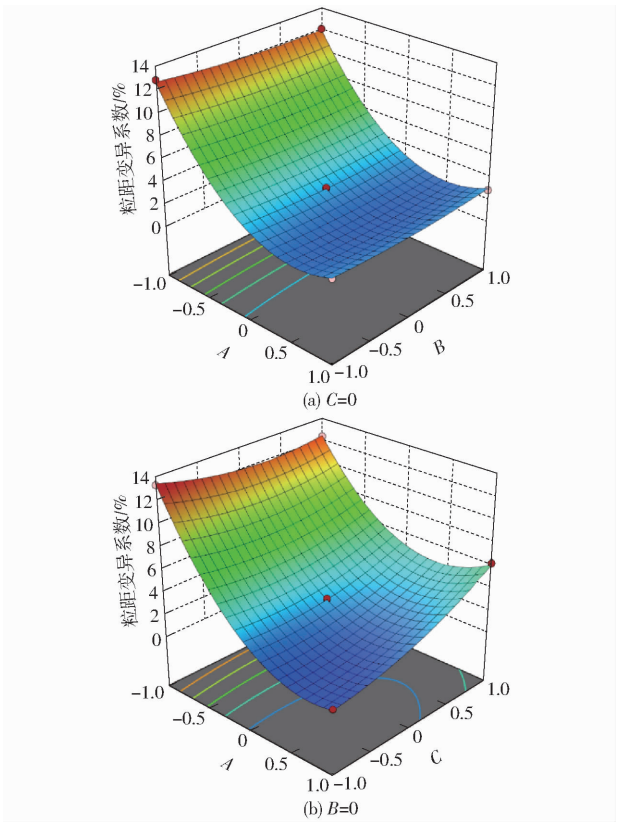


图 13 试验因素间交互作用的响应面

Fig. 13 Response surfaces of interaction between test factors

3.4 参数优化与验证

为获得约束条件范围内试验因素的优化参数组合,以粒距变异系数最小为优化目标,根据粒距变异系数回归方程,建立参数优化数学模型

$$\begin{cases} \min Y \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

借助 Design-Expert 软件 Optimization 模块求解优化结果,得到优化参数组合为入口气压 5.1 kPa、管道长度 24.2 cm、作业速度 0.11 m/s。为进一步验证优化结果准确性,将投种装置安装至智能型土壤-机器-植物系统技术平台(ZJZ-2.8 型,黑龙江省农业机械工程科学研究院)进行投种试验,为模拟田间作业环境,对土壤进行旋耕平整处理,试验土壤类型为黄粘土,如图 14 所示。根据优化结果设置投种试验参数,进行 10 次重复试验,每次试验结束后测量种子粒距,测定粒距变异系数为 6.3%,平均粒距为 5.3 cm,满足小麦精量匀播农艺要求。投种作业效果如图 15 所示,由于土壤中含有硬质土块,投种过程种子与硬质土块碰撞出现异位现象,导致粒距变异系数增大。



图 14 土槽试验

Fig. 14 Soil tank test

1. 空压机 2. 机架 3. 供种装置 4. 气流辅助投种装置



图 15 气流辅助直线投种作业效果

Fig. 15 Air flow assisted linear seeding operation effect

4 结论

(1)提出一种小麦气流辅助直线投种技术方案,设计了一种气流辅助直线投种装置,阐述了其结构组成与工作原理。气流辅助直线投种提高了粒距稳定性和小麦精量匀播作业质量,为小麦精量匀播提供技术支撑。

(2)基于气-固两相流数学模型建立 CFD-DEM 单向耦合仿真模型,并进行单因素仿真试验。仿真结果表明:投种装置内部流场压力分布均匀,无明显的压力突变;入口气压与管道长度对总压损失及流场压力分布影响显著,负压峰值、正压峰值及管道末端总压与入口气压呈正相关关系,负压峰值及管道末端总压与管道长度呈负相关关系;内部流场横截面总压沿投种装置轴线逐级变化,压力梯度变化方向与小麦种子运动方向一致;小麦种子运动轨迹为“直线-曲线-直线”,运动轨迹总体趋于一致,解决了投种装置内部压力梯度变化方向与种子运动方向不一致导致种子倒流或碰撞的问题。

(3)基于仿真试验及预试验结果进行台架试验,建立了粒距变异系数的多元回归模型。台架试验结果表明:影响粒距变异系数的主次因素为气流入口气压、作业速度、管道长度。结合响应面分析,入口气压与作业速度、入口气压与管道长度的交互作用对粒距变异系数影响显著。通过参数优化获得较优参数组合为:入口气压 5.1 kPa、管道长度 24.2 cm、作业速度 0.11 m/s,经土槽试验验证,该条件下粒距变异系数为 6.3%,平均粒距为 5.3 cm,满足小麦精量匀播农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 李锥. 播种方式和种植密度对冬小麦群体构建及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
LI Zhui. Effects of planting methods and planting density on population construction and yield of winter wheat [D]. Yangling: Northwest A&F University,2022. (in Chinese)
- [2] 侯加林,马端旭,李慧,等. 气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):35-45.
HOU Jialin,MA Duanxu,LI Hui,et al. Design and experiment of pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):35-45. (in Chinese)
- [3] 贺可涛. 减震型气吸小麦精量排种器的设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
HE Ketao. Design and experimental study of shock-absorbent pneumatic wheat precision seed discharge device [D]. Taian: Shandong Agricultural University,2023. (in Chinese)
- [4] WANG Yingbo,LI Hongwen,HU Hongnan,et al. A noncontact self-suction wheat shooting device for sustainable agriculture: a preliminary research[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,197:106927.
- [5] MA Xinchun,GONG Qixiang,WANG Qingjie,et al. Design of an air suction wheel-hole single seed drill for a wheat plot dibbler [J]. Agriculture,2022,12(10):1735.
- [6] 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)
- [7] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):26-35.
LI Yuhuan,YANG Li,ZHANG Dongxing,et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSEA,2020,36(9):26-35. (in Chinese)
- [8] 王云霞,张文毅,严伟,等. 气流辅助高速投种精量播种机压种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):69-76.
WANG Yunxia,ZHANG Wenyi,YAN Wei,et al. Design and experiment of seed pressing device for precision seeder based on air flow assisted seed delivery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):69-76. (in Chinese)
- [9] Amazone. 阿玛松 (AMAZONE) EDX 高速精密播种机 [EB/OL]. (2023-06-07) [2023-09-25]. https://www.nongjitong.com/product/amazone_edx_seeder.html.
- [10] Väderstad Group. Tempo planter [EB/OL]. (2022-03-13) [2023-09-25]. <https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/>.
- [11] Maschio Gaspardo. High speed precision planters-CHRONO [EB/OL]. (2023-01-01) [2023-09-25]. <https://www.maschiogaspardo.com/en/web/international/chrono>.
- [12] KVERNELAND. A-DRILL [EB/OL]. (2023-01-01) [2023-09-25]. <https://ien.kverneland.com/Seeding-Equipment/other-seed-drills/kverneland-a-drill>.
- [13] 许瑾. 玉米免耕播种机环形气吹辅助导种装置设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
XU Jin. Design and experiment of annular air blowing auxiliary seed guide device for maize no-till seeder [D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] LIU Rui,LIU Lijing,LI Yanjun,et al. Numerical simulation of seed-movement characteristics in new maize delivery device[J]. Agriculture,2022,12(11):1944.
- [16] TANG Han,XU Fudong,GUAN Tianyuan,et al. Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,211:107997.
- [17] 王超,李洪文,何进,等. 稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):43-53.
WANG Chao,LI Hongwen,HE Jin,et al. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):43-53. (in Chinese)
- [18] WANG Chao,LI Hongwen,HE Jin,et al. Optimization design of a pneumatic wheat-shooting device based on numerical simulation and field test in rice-wheat rotation areas[J]. Agriculture,2022,12(1):56.
- [19] 姜萌. 小麦精量播种关键技术及播施量检测方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2022.
JIANG Meng. Research on key techniques of precision sowing and detection method of sowing amount of wheat [D]. Beijing: China Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [20] 梁玉玥. 稻麦旱作兼用气吹式精量排种器设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
LIANG Yuyue. Design and experiment of air-blown precision seed discharge device for rice and wheat in dry farming [D].

Wuhan; Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)

[21] 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)

[22] SOO L S. Particulates and continuum-multiphase fluid dynamics;multiphase fluid dynamics[M]. New York: CRC Press,2018.

[23] GEORGE Y,GENNADY Z. Multiphase flow phenomena and applications; memorial volume in honor of Gad Hetsroni[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company,2018.

[24] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(3):57 – 68. LEI Xiaolong,LIAO Yitao,ZHANG Wenyu,et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):57 – 68. (in Chinese)

[25] EFSTATHIOS E M,MARTIN S,BEREND V W. Multiphase flows with droplets and particles[M]. Third Edition. Boca Raton: CRC Press,2022.

[26] 禹华谦,陈春光,麦继婷,等. 工程流体力学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018.

[27] 袁竹林,朱立平,耿凡,等. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京:东南大学出版社,2013.

[28] ZHANG Xirui,WEN Zhentuo,WANG Qingjie,et al. Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder[J]. Agriculture,2022,12(12):2021.

[29] 曹成茂,丁武阳,刘忠滨,等. 基于 Rocky Dem 的宁前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):53 – 64. CAO Chengmao,DING Wuyang,LIU Zhongbin,et al. Design and experiment of seed disperser for ning-guo *Radix peucedani* based on Rocky Dem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):53 – 64(in Chinese)

[30] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报,2016,32(12):247 – 253. LIU Fanyi,ZHANG Jian,LI Bo,et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247 – 253. (in Chinese)

[31] 俞传阳,陈状,陈黎卿. 小麦小区条播机电控排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):75 – 83. YU Chuanyang,CHEN Zhuang,CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for wheat plot drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):75 – 83. (in Chinese)

[32] 胡昱,黄小华,陶启友,等. 基于 CFD – DEM 的自动投饵饲料颗粒气力输送数值模拟[J]. 南方水产科学,2019,15(3):113 – 119. HU Yu,HUANG Xiaohua,TAO Qiyu,et al. Simulation of automatic pneumatic conveying process of automatic feeding system based on computational fluid dynamics – discrete element method[J]. South China Fisheries Science, 2019,15(3):113 – 119. (in Chinese)

[33] ARZU Y,ADNAN D. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement,2014,56:128 – 135.

(上接第 100 页)

[21] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):80 – 88. HUANG Yuxiang,HANG Chengguang,YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):80 – 88. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36 – 42. WANG Yunxia,LIANG Zhijie,ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 – 42. (in Chinese)

[24] 刘瑞,李衍军,刘忠军,等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):1 – 8,18. LIU Rui,LI Yanjun,LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1 – 8, 18. (in Chinese)