

基于 DEM – CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验

高筱钧¹ 徐 杨¹ 杨 丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 李玉环¹ 崔 涛^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为研究影响文丘里供种管供种均匀性的机理,运用 DEM – CFD 耦合仿真方法分析了不同喷嘴口收缩角下,流体场、耦合场、颗粒场的变化规律,得出收缩角为 70°时,流场场压变化明显,作用范围合理,耦合场未出现籽粒堆积现象以及颗粒场吹出种子连续均匀速度一致。为探索种子喂入量与气吹风压对文丘里供种管供种均匀性的影响,进行了正交试验,以供种量变异系数为试验指标衡量供种均匀性。由试验结果极差分析得出,影响均匀性的主次因素为种子喂入量、气吹风压。方差分析得出,种子喂入量为极显著因素,气吹风压为显著因素,两者交互项为不显著因素。试验结果表明,在种子喂入量为 1.8 kg/min,气吹风压为 7 kPa 时均匀性最佳。在排种器转速为 136 r/min 情况下对上述组合进行排种性能试验验证,得出合格指数为 92.18%,漏播指数为 0,重播指数 7.82%,结果表明此种组合下文丘里供种管供种均匀稳定,与理论优化结果基本一致。

关键词: 文丘里供种管; 气固耦合; 供种; 均匀性; 仿真; 试验

中图分类号: S223.2⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0092-09

Simulation and Experiment of Uniformity of Venturi Feeding Tube
Based on DEM – CFD Coupling

GAO Xiaojun¹ XU Yang¹ YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} LI Yuhuan¹ CUI Tao^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Soil – Machine – Plant System Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the mechanism affecting the uniformity of seed supply in Venturi, DEM – CFD coupling simulation method was used to analyze the variation of fluid field, coupling field and particle field under different shrinkage angles, and the shrinkage angle of 70° was obtained, the pressure field of the flow field was changed obviously, the range of action was reasonable, the maize accumulation phenomenon did not appear in the coupled field, and the continuous uniform velocity of the seed field was consistent. In order to explore the effect of seed feeding volume and air blowing pressure on the uniformity of Venturi feeding tube, orthogonal experiment was carried out to measure the uniformity of seed supply for the variation coefficient of seed quantity. The range analysis of the test results showed that the primary and secondary factors affecting the uniformity were the quantity of feeding and the air blowing pressure. The variance analysis showed that the quantity of feeding was a very significant factor, and the air blowing pressure was a significant factor, and the interaction terms of the two were not significant factors. The test results were optimized to obtain the best uniformity when the quantity of feeding was 1.8 kg/min and the air blow pressure was 7 kPa. The seeding performance test was carried out on the above combination when the seed meter rotation speed was 136 r/min. The qualified index was 92.18%, the leakage index was 0, and the multiple index was 7.82%. The results showed that no leakage can explain the combination was the best. Under this circumstance, the performance of Venturi feeding tube was uniform, which was basically consistent with the theoretical optimization results.

Key words: Venturi feeding tube; gas-solid coupling; feeding; uniformity; simulation; experiment

收稿日期: 2018 – 07 – 10 修回日期: 2018 – 08 – 12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)、国家自然科学基金项目(51575515)和国家玉米产业技术体系建设项目(CARS – 02)

作者简介: 高筱钧(1990—),男,博士生,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: gxj_1234@126.com

通信作者: 崔涛(1985—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: cuitao850919@163.com

0 引言

高速精量播种^[1-2]是指精密播种机以较高的作业速度,依据农艺要求的播种密度,按照一致的行距、均匀的粒距和精确的深度将种子播入土壤中并准确定位的过程。高性能的高速精量播种机是获得优良播种质量的有效方式^[3-5],可节省种子、减少间苗作业,同时达到苗齐、苗全、苗壮的效果,既节约成本又提高产量^[6-7]。气送式集排器具有适应作物种类多、高速和高效等优点,已成为国内外播种机排种器发展的主要趋势^[8],其中文丘里供种管直接影响管道中种子的分布和供种的均匀性。

文丘里供种管结构不仅影响种子的运动状态,对排种器的充种性能也有重要影响。由于种子在管道内形成的气固两相流较复杂,用数学模型难以准确描述种子的运动特性及气流场,需采用辅助软件进行分析。近年来,随着离散单元法 (DEM) 和计算流体动力学 (CFD) 的发展,数值模拟技术已成为研究多相流和结构优化的重要工具^[9-16]。气固耦合广泛用于研究颗粒与颗粒间和颗粒与壳体间的运动状态及气流场的特征^[17-19]。并且,气固耦合在农业工程领域被用于研究颗粒在气流场的分布及优化工作参数^[20-21]。

由于文丘里供种管结构影响供种均匀性能,且直接关系到排种器工作性能,本文对文丘里供种管结构进行理论分析并采用离散元仿真软件 EDEM 与计算流体动力学软件 Fluent 耦合的方法,对种子供种管道中的运动过程进行气固两相流模拟。仿真研究供种管道结构对种子运动特性和气流场的影响,确定结构参数,并通过试验研究气吹风压与种子喂入量对供种均匀性的影响,确定最佳组合。

1 气送式高速玉米精量排种器供种管结构

1.1 排种器结构与工作原理

气送式玉米精量排种系统主要由风机、文丘里供种管、机架、供种驱动电机、定量供种装置、排种器驱动电机、排种器、控制柜组成,如图 1a 所示。排种器工作时,由控制柜控制 2 个电机和风机。风机与文丘里供种管连接为排种器提供风压。供种驱动电机转动带动定量供种装置排种,种子进入文丘里管内,管内的气流与种子形成气固两相流,在管内两相流充分混合后进入排种器,种子在排种器内经过充种、携种、清种、投种,最终完成播种过程。

文丘里供种管是实现气流与种子均匀混合以及连续均匀供种的关键部件,其结构如图 1b 所示。文丘里供种管包括喷嘴、接收室、进种口、过渡室、混合

室,其中喷嘴和接收室相互连接,喷嘴口收缩角用 α 表示。进种口与定量供种装置相互连接,过渡室收缩角用 θ 表示。

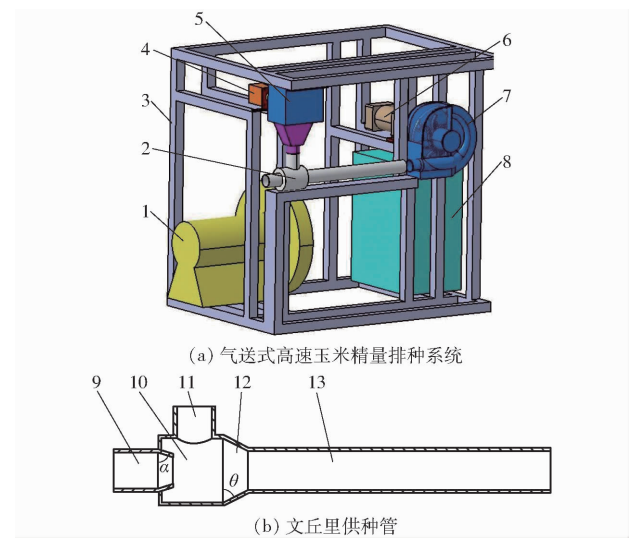


图 1 气送式排种系统与文丘里供种管结构图
Fig. 1 Structure diagrams of pneumatic seed metering system and Venturi feeding tube

1. 风机 2. 文丘里供种管 3. 机架 4. 供种驱动电机 5. 定量供种装置 6. 排种器驱动电机 7. 排种器 8. 控制柜 9. 喷嘴 10. 接收室 11. 进种口 12. 过渡室 13. 混合室

1.2 供种管主要结构参数

文丘里供种管结构参数主要有混合室输送管道直径 D_2 、长度 L_1 、喷嘴入口直径 D_1 、喷嘴口收缩角 α 、过渡室收缩角 θ ,如图 2 所示。

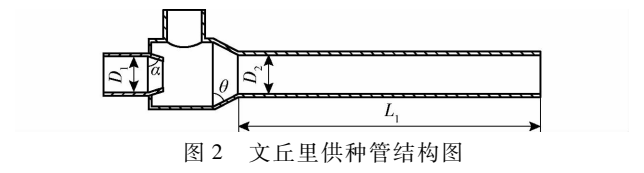


图 2 文丘里供种管结构图
Fig. 2 Structure diagram of Venturi feeding tube

喷嘴口收缩角 α 为与竖直方向的夹角,起到提高局部压强增加种子流速的作用,其对管内流场有着重要的影响, α 取 70° ,后文将详细分析。过渡室收缩角 θ 为与竖直方向的夹角,其主要作用是连接混合室,收拢种子,防止种子滑落回接收室,因此 θ 应不大于玉米种子摩擦角 30° ^[22], θ 取 28° 。由于喷嘴入口与风机出风口相互连接,因此入口直径 D_1 选取与风机出风口的尺寸一致,为 36 mm。根据颗粒在管道内的输送原理^[23],入口风速可表示为

$$v_g = k_t \sqrt{\rho_p} + k_d L_1 \quad (1)$$

式中 v_g ——入口风速, m/s
 k_t ——物料粒度系数
 ρ_p ——颗粒密度, kg/m³
 k_d ——物料特性系数
当颗粒粒径在 1 ~ 10 mm 时, k_t 取值为 16 ~ 20,

由于所用品种玉米籽粒当量直径低于 10 mm,因此取 k_l 为 18。玉米籽粒密度为 $1\,975\text{ kg/m}^3$ 。物料特性系数 k_d 为 $(2\sim5)\times10^{-5}$,而输种管道长度一般不超过 2 m,研究中忽略物料特性系数对风速的影响。因此入口风速为 20.5 m/s 。料气输送比是衡量种子在气流中的质量比例,可表示为

$$\psi=\frac{G_p}{G_g}\tag{2}$$

其中

$$G_g=\rho_g\frac{\pi D_2^2}{4}v_g\tag{3}$$

式中 ψ ——料气输送比
 G_p ——单位时间颗粒输送质量, g/s
 G_g ——单位时间气流输送质量, g/s
 ρ_g ——空气密度,取 1.205 kg/m^3

综合式(1)~(3),得

$$D_2=\sqrt{\frac{4G_p}{\pi\psi\rho_gv_g}}\tag{4}$$

根据玉米播种量要求,单行单位时间玉米播种量约为 1.5 g/s 。由于种子在输种管道中的气固两相流为稀相流,料气输送比 ψ 取值范围为 $0.1\sim1.0$,本研究取值为 0.9 ,得输种管道直径为 43 mm 。管道的长度应当满足种子与气流场充分混合稳定^[24],因此管长 L_1 取 300 mm 。

2 模型建立

离散元法(Discrete element method, DEM)和计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)近年来广泛应用于农业工程等领域,在文丘里供种管内,种子以颗粒体的形式进入管内与高速气流相互混合,并以一定的速度吹出管外。由于种子颗粒在模拟区域受到流场的影响,同时种子运动对流场也产生影响,因此采用 DEM-CFD 耦合方法进行分析。

2.1 流场数学模型

DEM-CFD 进行耦合模拟时,由于颗粒体积分数较大不可忽略,且 Eulerian 模型采用多相流框架求解,有体积分数方程项,考虑了颗粒对流场的影响,实际情况中,气吹供种试验颗粒相对于流场是有明显作用的,因此本文采用 Eulerian 模型对气吹供种试验进行模拟。

在 Eulerian 模型中,流体的连续方程中加入了体积分数项,即

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t}+\nabla(\rho\varepsilon v)=0\tag{5}$$

式中 ρ ——气体密度, kg/m^3
 t ——时间, s

v ——气体速度, m/s
 ε ——气体体积分数相
 ∇ ——哈密顿微分算子
流体的运动微分方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho v)}{\partial t}+\nabla(\rho\varepsilon v^2)=-\nabla P+\nabla(\mu\varepsilon\nabla v)+\rho\varepsilon g-S\tag{6}$$

式中 P ——气体微元体上的压力, Pa
 g ——重力加速度, m/s^2
 μ ——气体动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 S ——动量源项

为了探寻气吹供种对种群的影响,需对供种管内流场进行模拟,供种管内空气流动状态与其 Re (雷诺数)有关,公式为

$$Re=\frac{\rho v D_1}{\mu}\tag{7}$$

喷嘴入口直径为 36 mm ,气流平均流速 20.5 m/s ,得出 Re 值远大于紊流流动的临界值,因此整个过程气体的运动形态为紊流。

2.2 接触模型

离散元法描述的是颗粒之间碰撞的过程,即接触的产生和发生作用的过程。离散元中根据接触方式的不同可分为硬颗粒接触和软颗粒接触,软颗粒接触方式允许颗粒之间接触点间出现重叠部分,并根据接触颗粒的物理属性和法向重叠量、切向位移计算接触力,而颗粒间内摩擦力即切向力与法向力有着密切的联系,因此本文采用软颗粒接触模型。考虑到玉米种子表面无粘附力,故本文选取 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型。

软颗粒接触使用的是软球模型,如图 3 所示,软球模型在颗粒 i 和颗粒 j 间设定了弹簧、阻尼器、滑动器和耦合器,引入了弹性系数 k 和阻尼系数 c 来量化弹簧、阻尼器、滑动器的作用。

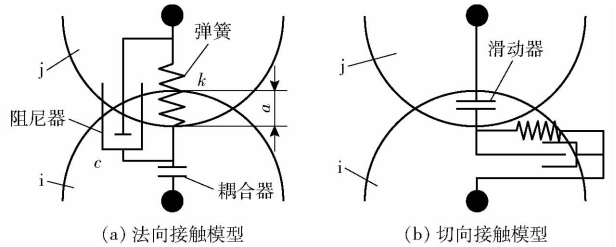


图 3 软球模型对颗粒间接触力的简化模型

Fig.3 Simplified model of particles contact force from soft-sphere model

耦合器是用来确定发生接触的颗粒配对关系,不引入任何力。在切向,如果切向力超过屈服值,两颗粒在法向力和摩擦力作用下滑动,由滑动器实现这一目的。

2.3 离散元模型

排种器在 CATIA 软件中建立几何模型, 导入 ANASYS 软件下的 MESHING 模块进行几何体网格划分, 将划分好网格的几何体分别导入 EDEM。采用郑单 958 玉米种子进行仿真试验, 经测量得到种子的几何尺寸与力学特征参数^[25], 如表 1 所示。

表 1 种子特征参数

Tab.1 Seeds characteristic parameters

参数	数值
种子尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm)	11.13×8.71×5.70
泊松比	0.4
种子剪切模量/Pa	1.37×10^8
种子密度/(kg·m ⁻³)	1 197
种间恢复系数	0.18
种间静摩擦因数	0.034
种间滚动摩擦因数	0.002

种子颗粒通过多球面组合填充的方式在 EDEM 软件中生成并将籽粒图像映射到颗粒模型, 如图 4 所示。

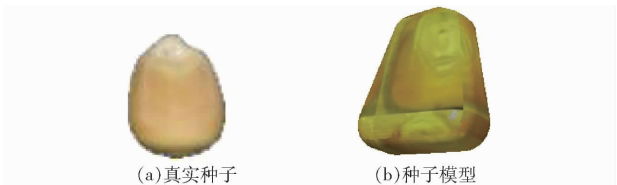


图 4 种子

Fig. 4 Seeds

2.4 流场模型

针对气固耦合分析区域即文丘里供种管内进行网格划分。采用 ANASYS 软件下的 MESHING 模块对供种管进行网格划分, 划分所得网格总数为 98 680, 其中最大网格体积为 45 mm³, 最小体积为 1.8×10^{-4} mm³。由于气流从喷嘴入口进入, 并由另一端的开口处流出, 因此选取喷嘴入口为压力进口边界条件, 进种口和管道另一端开口为压力出口边界条件, 如图 5 所示。

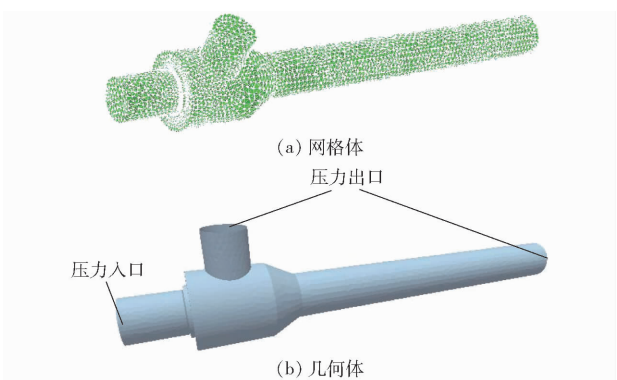


图 5 文丘里供种管边界条件与网格划分

Fig. 5 Model meshing and boundary of pipe

2.5 供种管供种过程仿真

种子由进种口处颗粒工厂生成, 生成的种子在自身重力的作用下进入文丘里供种管内, 设置动态生成种子数量为 50 颗/s。高速气流从喷嘴入口进入在收缩口与种子汇合, 设置流场压力入口边界条件为 8 kPa 压力入口。种子受到高速气流作用被吹入混合室内与气流均匀混合后吹出管外, 实现供种。在此过程中 EDEM 软件获取实时颗粒体的位置与接触信息, 将获取的信息传递到 Fluent 软件中, 软件根据获取的信息模拟计算颗粒体对流场的影响情况, 在将所获得的流场信息反馈到 EDEM 软件中, 模拟流场对颗粒体的影响, 依次循环, 达到双向流固耦合的效果。仿真过程中设置 EDEM 时间步长为 1×10^{-5} s, Fluent 时间步长为 5×10^{-4} s, 为 EDEM 的 50 倍; 设置 Fluent 步数为 6 000 步, 即仿真时间为 3 s; 设置每个时间步最多迭代 50 次; 为尽可能详细提取颗粒运动信息, 在 EDEM 和 Fluent 内, 每 0.003 s 保存一次数据。

为了研究文丘里供种管供种均匀性能, 本文对喷嘴口收缩角 α 进行考察。通过 EDEM - FLUENT 模拟不同收缩口角情况下, 流场、耦合场以及颗粒场的变化, 探寻影响供种特性的机理以及最佳角度。

3 模拟分析与讨论

3.1 喷嘴口收缩角对管内气流流场的影响

随着喷嘴口收缩角的增加, 喷嘴收缩口处压强逐渐减小且压强梯度变化延长, 由于压强减弱进种口处负压逐渐变小, 即吸种能力减弱(图 6)。收缩角过小即 50° 时, 出现局部压强过大, 且范围较小, 流场不均匀。收缩角过大即 90° 时, 出现压强变化不明显, 失去了收缩口增加压强的作用。综合考虑在收缩角为 70° 时, 压强变化明显且范围合理, 流场较为均匀。

3.2 喷嘴口收缩角对管内气固耦合场的影响

随着喷嘴口收缩角的增加喷嘴收缩口处流速降低, 流线逐步散开, 动压下降(图 7)。玉米籽粒堆积量逐渐减少, 在收缩角为 70° 时基本不存在籽粒堆积。籽粒之间的间距也随着收缩角的增加而增大。收缩角过小即 50° 时, 由于加速范围较小出现大量玉米籽粒堆积于接收室内, 少量的被吹出。收缩角过大即 90° 时, 加速范围大, 压强变化不明显, 所有种子被吹出但是种子之间间距过大, 造成不连续。综合考虑在收缩角为 70° 时, 未出现种子堆积且压强变化明显, 种子连续均匀被吹出。

3.3 喷嘴口收缩角对管内种子运动的影响

随着喷嘴口收缩角的增加, 被吹出的种子逐渐

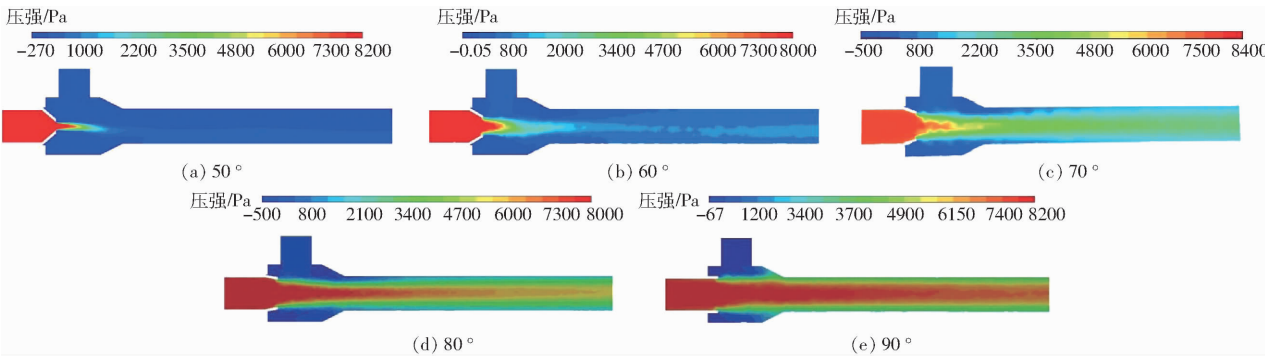


图6 流体场云图

Fig.6 Maps of fluid field

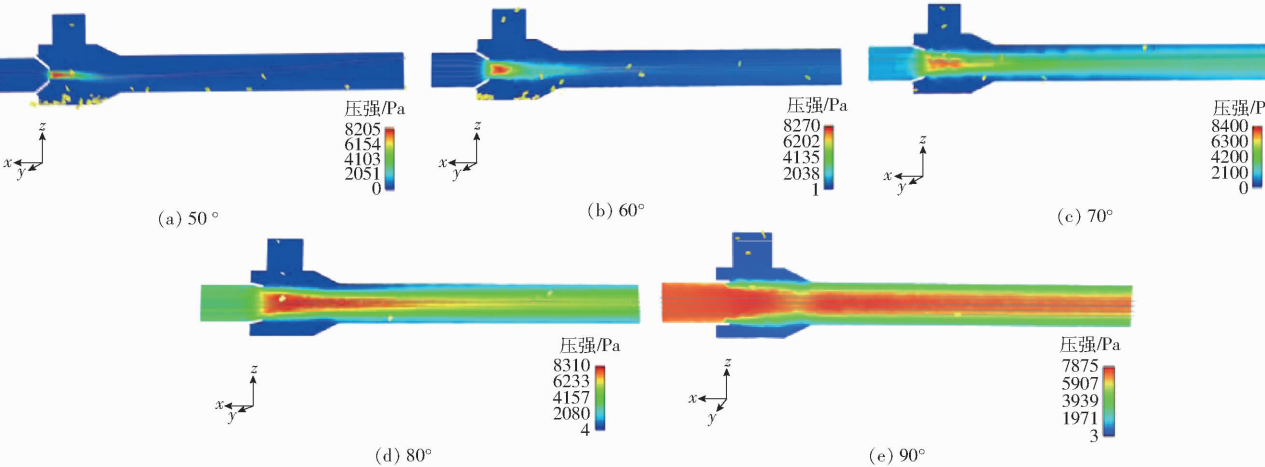


图7 耦合场云图

Fig.7 Maps of coupled field

增多,即被气流作用加速的种子增多。在收缩角较小时,多数种子仅在自身重力下落入接收室,速度无明显变化,只有少数种子受到收缩口处喷出的高速气流作用。在收缩角较大时,由于范围增大,多数种子受到来自收缩口处喷出的高速气流作用而被吹出,但是出现了速度变化悬殊的现象,即种间距较大,出现了不连续的现象。综合考虑在收缩角为

70°时,多数种子受到来自收缩口处喷出的高速气流作用而被吹出,且种子速度变化一致,未出现较大差异,种子连续均匀被吹出,如图8所示。

4 模拟试验

以气吹风压、种子喂入量为因素,以供种量变异系数为模拟试验指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试

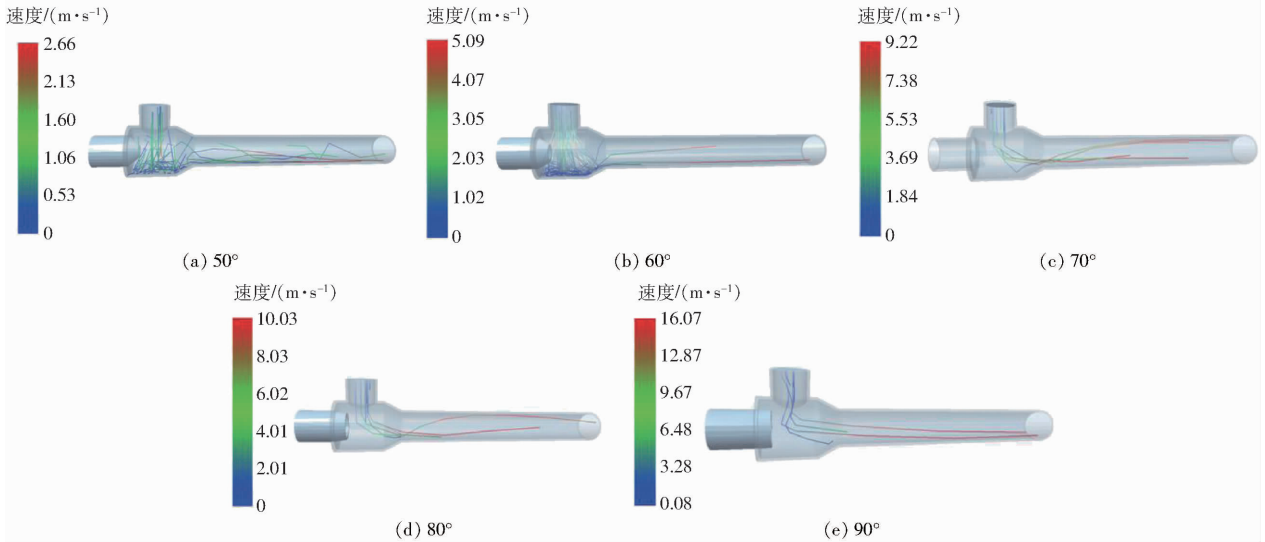


图8 颗粒场图

Fig.8 Maps of granule field

验。仿真试验采取每 2 s 测量一次吹出种子质量，每组仿真时间为 10 s。因素水平表如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素	
	种子喂入量/(kg·min ⁻¹)	气吹风压/kPa
1	1.0	6.5
2	1.5	7.5
3	2.0	8.5

对仿真结果进行极差分析,结果见表 3, A 、 B 为种子喂入量和气吹风压水平值。结果表明:影响变异系数的主次因素顺序依次为 A 、 B ,对变异系数来说越小越好,因此影响其较优参数组合为 A_2B_3 。

表 3 试验方案及试验结果

Tab.3 Experimental scheme and test results

试验号	因素				变异 系数/%
	A	B	空	空	
1	1	1	1	1	9.23
2	1	2	2	2	8.33
3	1	3	3	3	8.00
4	2	1	2	3	7.66
5	2	2	3	1	6.54
6	2	3	1	2	5.42
7	3	1	3	2	5.92
8	3	2	1	3	8.03
9	3	3	2	1	9.22
变异系数	k_1	8.52	7.60		
	k_2	6.54	7.63		
	k_3	7.72	7.55		
	R	1.98	0.08		

为验证试验仿真可靠性,对最优组合进行台架试验,即种子喂入量 1.5 kg/min,风压 8.5 kPa,其他条件保持与模拟仿真试验一致,试验 5 次取变异系数平均值为 5.56%,与模拟仿真试验结果基本一致,表明模拟方法准确可靠。

5 台架试验

5.1 试验条件

文丘里供种管放置在台架上,其上端与定量供种装置连接,采用步进电机进行驱动,文丘里供种管喷嘴进口与风机相连,出口安装一次性密封袋,用来收集吹出的种子。如图 9 所示。

为了获得最佳组合,台架试验同样以风机风压、种子喂入量为因素,以供种量变异系数为试验指标衡量供种均匀性,并增大样本量。当风压与种子喂入量稳定情况下,每间隔 5 s 为一组,测量收集到种子的质量,每组试验重复 3 次,进行 12 组,计算其排

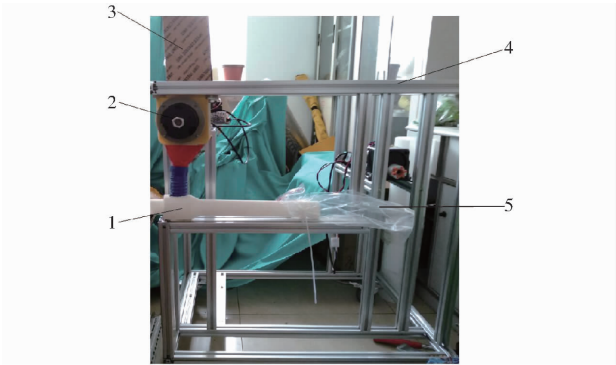


图 9 试验台架

Fig.9 Test bench

1. 文丘里供种管 2. 定量供种装置 3. 种箱 4. 台架 5. 密封袋

出种子质量变异系数。

5.2 正交试验

5.2.1 正交试验设计

为了探寻气吹风压和种子喂入量的最佳组合,采用 $L_{25}(5^6)$ 交互作用正交表安排试验^[26],试验选取种子喂入量为 1 ~ 2 kg/min,气吹风压为 6.5 ~ 8.5 kPa 以及因素之间的交互作用为试验因素。因素水平表如表 4 所示。

表 4 试验因素水平

Tab.4 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素	
	种子喂入量/(kg·min ⁻¹)	气吹风压/kPa
1	1.0	6.5
2	1.2	7.0
3	1.5	7.5
4	1.8	8.0
5	2.0	8.5

5.2.2 试验结果分析

变异系数越小越好。对其极差分析结果见表 5,结果表明:影响变异系数的主次因素顺序依次为 A 、 B ,而交互项 $A \times B$ 的极差相对较小,对变异系数影响较小;对影响变异系数较优参数组合为 A_4B_2 。

为进一步分析各个因素对变异系数影响的显著性,本文应用 Design-Expert 8.061 软件对主要因素进行方差分析,如表 6 所示。从表 6 可知,种子喂入量 A 对于变异系数影响极显著 ($P < 0.01$),气吹风压 B 对于变异系数影响显著 ($P < 0.05$),而交互项 $A \times B$ 对于变异系数影响不显著 ($P > 0.05$)。

5.3 参数优化与试验验证

利用软件优化模块,根据各因素的取值范围以及试验指标期望达到的标准(变异系数小于 4%),最终优化出 4 组参数组合满足要求,结果如表 7 所示。

表 5 试验方案及试验结果

Tab.5 Experimental scheme and test results

试验号	试验因素						变异系数/%
	A	B	空	A×B	空	空	
1	1	1	1	1	1	1	8.93
2	1	2	2	2	2	2	8.14
3	1	3	3	3	3	3	8.21
4	1	4	4	4	4	4	8.11
5	1	5	5	5	5	5	8.19
6	2	1	2	3	4	5	8.14
7	2	2	3	4	5	1	7.52
8	2	3	4	5	1	2	8.17
9	2	4	5	1	2	3	10.65
10	2	5	1	2	3	4	9.34
11	3	1	3	5	2	4	7.85
12	3	2	4	1	3	5	7.21
13	3	3	5	2	4	1	6.74
14	3	4	1	3	5	2	7.62
15	3	5	2	4	1	3	5.53
16	4	1	4	2	5	3	5.34
17	4	2	5	3	1	4	3.15
18	4	3	1	4	2	5	3.72
19	4	4	2	5	3	1	8.26
20	4	5	3	1	4	2	4.97
21	5	1	5	4	3	2	5.85
22	5	2	1	5	4	3	5.44
23	5	3	2	1	5	4	8.51
24	5	4	3	2	1	5	9.60
25	5	5	4	3	2	1	8.90
变异系数	k ₁	8.31	7.22	8.05			
	k ₂	8.76	6.29	7.83			
	k ₃	6.99	7.07	7.20			
	k ₄	5.09	8.85	6.15			
	k ₅	7.66	7.39	7.58			
	R	3.67	2.56	1.90			

优化结果与试验分析结果一致,因此最优组合为A₄B₂,即种子喂入量为1.8 kg/min,气吹风压为7 kPa。

5.4 验证试验

试验所用排种器为自主研发气送式高速玉米精量排种器,所用检测装置为中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪,如图10所示。试验时,检测仪风机为排种器提供风压,将定量排种装置排出的种子经由供料管吹入气送式高速玉米精量排种器,导种管安装于排种器投种口下方,用于检测排种器性能的传感器安装在导种管中间。作业时,当种子经过导种管时,触发传感器,检测仪通过记录相邻种子间的时间间隔并同时将其转换为实际株距,计算和判断排种情况,并显示重播指数、漏播指数和合格指数。该检测仪的检测结果与美国 Precision Planting 研发的 MeterMax 检测仪相比合格指数误差不超过0.7%^[27]。

试验种子为河南省农科院种业有限公司生产的秋乐牌郑单958玉米杂交种,籽粒黄色,半马齿型,千粒质量351 g,含水率12.5%,未分级。根据GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[28]的规定,试验指标包括:

合格指数

$$Q' = n_1 / N' \times 100\%$$

(8)

重播指数

$$M' = n_2 / N' \times 100\%$$

(9)

漏播指数

$$L' = n_3 / N' \times 100\%$$

(10)

式中 n₁——单粒排种数
n₂——2粒以上排种数
n₃——漏排种数 N'——理论排种数

表 6 方差分析结果

Tab.6 Results of variance analysis

项目	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
变异系数	A	41.369 86	4	10.342 46	10.812 78	0.000 6	**
	B	17.292 62	4	4.323 154	4.519 745	0.018 6	*
	A×B	11.258 86	4	2.814 714	2.942 710	0.065 7	
	残差	11.478 05	12	0.956 504			
	总和	81.399 38	24				

注: * 表示显著(P<0.05), **表示极显著(P<0.01)。

表 7 参数优化结果

Tab.7 Parameter optimization results

序号	变异系数/%	可取度/%	优组合
1	2.80	100	A ₄ B ₂
2	3.58	77	A ₄ B ₃
3	3.73	69	A ₄ B ₁
4	3.89	60	A ₄ B ₅

在种子喂入量为1.8 kg/min,气吹风压7 kPa,排种器转速为136 r/min时,合格指数为92.18%,漏播指数为0,重播指数7.82%。整个试验过程中漏播指数为0,说明未出现种子流不连续的现象,供种均匀性良好,与理论优化结果基本一致。

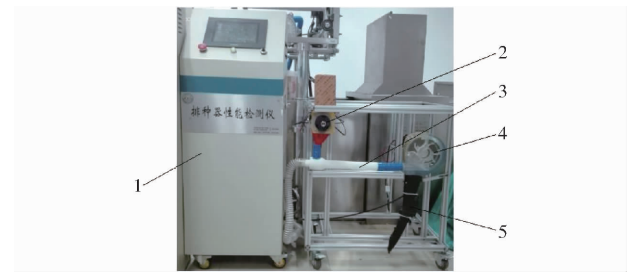


图 10 试验装置图

Fig. 10 Picture of experiment equipment

1. 排种器性能检测仪 2. 定量排种装置 3. 供料管 4. 排种器
5. 导种管

6 结论

(1)采用 DEM - CFD 耦合方法,利用 EDEM - FLUENT 软件耦合的方式,模拟不同喷嘴口收缩角下,流体场、耦合场、颗粒场的变化规律,得出在喷嘴

口收缩角为 70°时,流场压强变化明显,作用范围合理,未出现籽粒堆积现象且吹出种子连续均匀速度一致。

(2)台架试验研究种子喂入量与气吹风压对文丘里供种管供种均匀性的影响,以供种量变异系数为试验指标衡量供种均匀性,进行了正交试验并对结果进行了分析,得出影响均匀性的主次因素为种子喂入量(极显著)、气吹风压(显著)。试验优化结果为种子喂入量为 1.8 kg/min,气吹风压 7 kPa 时均匀性最佳。

(3)对优化结果进行排种性能试验验证,在种子喂入量为 1.8 kg/min,气吹风压为 7 kPa,排种器转速为 136 r/min 时,合格指数为 92.18%,漏播指数为 0,重播指数 7.82%。试验中未出现漏播情况足以说明此种情况下文丘里供种管供种均匀稳定,与理论优化结果基本一致。

参 考 文 献

- 1 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20161106&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):38-48. (in Chinese)
- 2 张宇文.机械式多功能精密排种器的设计[J].农业机械学报,2005,36(3):51-53.
ZHANG Yuwen. Research and design for making a new type of mechanized and multiple functions of precision seed drilled appliance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(3):51-53. (in Chinese)
- 3 王庆和.国内气力式精密播种机的研制简况[J].农牧与食品机械,1991(1):9-11,26.
- 4 李国林,宋炜,毛俐,等.国内外几种主要排种器的特点[J].农业科技与装备,2011(8):70-71,73.
LI Guolin, SONG Wei, MAO Li, et al. Features of some main seed-metering devices at home and abroad[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2011(8):70-71,73. (in Chinese)
- 5 张泽平,马成林,左春姪.精播排种器及排种理论研究进展[J].吉林工业大学学报,1995,25(4):112-117.
ZHANG Zeping, MA Chenglin, ZUO Chuncheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995,25(4):112-117. (in Chinese)
- 6 STEFFEN R, WOLFF R, ILTIS R, et al. Effect of two seed treatment coatings on corn planter seeding rate and monitor accuracy [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999, 15(6):605-608.
- 7 ESS D R, HAWKINS S E, YOUNG J C, et al. Evaluation of the performance of belt metering system for soybeans planted with a grain drill[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(6):965-969.
- 8 KUMAR V, DURAIRAJ C. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1):81-95.
- 9 QIAN F P, HUANG N J, LU J L, et al. CFD-DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure[J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 71:478-488.
- 10 YANG S, LUO K, ZHANG K, et al. Numerical study of a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with the parallel CFD-DEM coupling approach[J]. Powder Technology, 2015, 272:85-99.
- 11 IQBAL N, RAUH C. Coupling of discrete element model (DEM) with computational fluid mechanics (CFD) a validation study [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 277:154-163.
- 12 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/OL].农业机械学报,2017,48(3):57-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20170307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow seed conveying tube for rapeseed wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):57-68. (in Chinese)
- 13 韩丹丹,张东兴,杨丽,等.内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM - CFD 模拟与试验[J].农业工程学报,2017,33(13):23-31.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of insid-filling air-blowing maize preision seed

- metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13):23–31. (in Chinese)
- 14 林达平,周涛,李精精,等. 细颗粒在粗糙管壁管道内运动特性的研究[J]. 动力工程学报,2015,35(5):424–428.
LIN Daping, ZHOU Tao, LI Jingjing, et al. Research on flow and deposition characteristics of fine particles in rough narrow channels[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(5):424–428. (in Chinese)
- 15 赖庆辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):27–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20160505&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed metering device for *Panax notoginseng*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):27–37. (in Chinese)
- 16 苏微,高筱钧,任闯,等. 种子颗粒群的悬浮速度模拟预测方法[J]. 华南农业大学学报,2016,37(1):110–116.
SU Wei, GAO Xiaojun, REN Chuang, et al. A simulation prediction method of suspension speed of seed particles swarm[J]. Journal of South China Agriculture University, 2016,37(1):110–116. (in Chinese)
- 17 AKBARZADEH V, HRYMAKA N. Coupled CFD–DEM of particle-laden flows in a turning flow with a moving wall[J]. Computers and Chemical Engineering, 2016, 86:184–191.
- 18 AKHSHIK S,BEHZAD M, RAJABI M. CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127:229–244.
- 19 TONG Z B, ZHENG B, YANG R Y, et al. CFD–DEM investigation of the dispersion mechanisms in commercial dry powder inhalers[J]. Powder Technology, 2013,240:19–24.
- 20 LI H C, LI Y M, GAO F. CFD–DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88:111–119.
- 21 黄震宇,李腾,喻志成,等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):70–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010.
HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air-screening machine for vegetable seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):70–76. (in Chinese)
- 22 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 23 常金丽,张晓辉. 2BQ–10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136–141.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):136–141. (in Chinese)
- 24 邢金龙. 基于CFD–DEM耦合的气流一阶集排式排种系统仿真与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
XING Jinlong. Simulation and test of one-step centralized pneumatize seeding system based on CFD–DEM coupling method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- 25 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 parameter for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):36–42. (in Chinese)
- 26 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 27 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):19–27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20161003&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experimental of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):19–27. (in Chinese)
- 28 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.