



邹 翌, 郝向泽, 何瑞银. 基于 EDEM-Fluent 耦合的气流分配式排种器数值模拟与试验[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(4): 110-116.

基于 EDEM-Fluent 耦合的气流分配式排种器 数值模拟与试验

邹 翌, 郝向泽, 何瑞银

(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】解决水稻机械直播速度慢、效率低的问题。【方法】采用气流分配式排种器进行水稻直播, 优化设计一种由 R 可调节的喇叭口式内腔与 α 可变的分流密封盖组成的 α - R 式气流分配式排种器, 利用 EDEM-Fluent 耦合模块, 对气流分配排种过程进行数值模拟; 并进行排种性能台架验证试验。【结果】仿真结果显示, α - R 组合式分配器中水稻颗粒最高运动速度为 $5.416\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且旋涡滞种区域面积也低于传统结构, 水稻颗粒在分配器中排出顺畅; $R=180\text{ mm}$ 、 $\alpha=20^\circ$ 时, 排种均匀性变异系数为 24.56%, 各行一致性变异系数为 3.79%, 总排量稳定性变异系数为 1.23%, 3 项指标均为最优。采用 3D 打印的分配器进行台架试验, 结果显示该排种器排种均匀性变异系数为 29.17%~30.86%, 各行一致性变异系数为 4.13%~4.33%, 总排量稳定性变异系数为 1.4%~1.7%, 满足水稻机械直播要求。【结论】多次试验结果稳定, 与仿真结果较为接近, 说明本次设计的气流分配式排种器满足要求, 也表明利用 EDEM-Fluent 耦合模拟的正确性与可行性。

关键词: 气流分配; 排种器; 水稻; EDEM-Fluent; 模拟
中图分类号: S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2017)04-0110-07

Numerical simulation and experiment of air distribution seed-metering device based on coupled EDEM-Fluent

ZOU Yi, HAO Xiangze, HE Ruiyin

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract:【Objective】To solve the problems of slow speed and inefficiency in mechanical seeding of rice.【Method】Rice was directly seeded using the air distribution seed-metering device. An α - R air distribution seed-metering device was designed and optimized. It consisted a bell type lumen with adjustable R and a shunt seal cap with adjustable α . Numerical simulations of air distribution and metering process were performed by using EDEM-Fluent coupling module, and the bench test on seeding performance was carried out.【Result】The simulation results showed that the highest velocity of rice particles in the combined α - R distributor was $5.416\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The area of vortex stagnation was smaller than that of the traditional structure. Rice particles were discharged smoothly from the dispenser. When $R=180\text{ mm}$ and $\alpha=20^\circ$, the variation coefficient of uniformity was 24.56%, the variation coefficient of consistency among rows was 3.79%, the variation coefficient of total displacement stability was 1.23%, and the three indicators were all the optimum values. Bench test was carried out using distributors printed by 3D printer and the results showed that the variation coefficient of uniformity for the seed-metering device was 29.17%–30.86%, the variation coefficient of consistency among rows was 4.13%–4.33%

收稿日期:2016-09-20 优先出版时间:2017-06-22
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170622.1010.012.html>
作者简介: 邹 翌 (1991—), 男, 硕士研究生, E-mail: zou_wudi@sina.com; 通信作者: 何瑞银 (1964—), 男, 教授, 博士, E-mail: ryhe@njau.edu.cn
基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203059); 苏北科技专项 (BN2015042)
<http://xuebao.scau.edu.cn>

and the variation coefficient of total displacement stability was 1.4% - 1.7% , which met the requirements of mechanical seeding of rice. 【 Conclusion 】 The results from multiple tests are stable and close to the simulation results. The designed air distribution seed-metering device can meet practical requirements, suggesting that using the EDEM-Fluent coupling simulation is correct and feasible.

Key words: air distribution; seed-metering device; rice; EDEM-Fluent; simulation

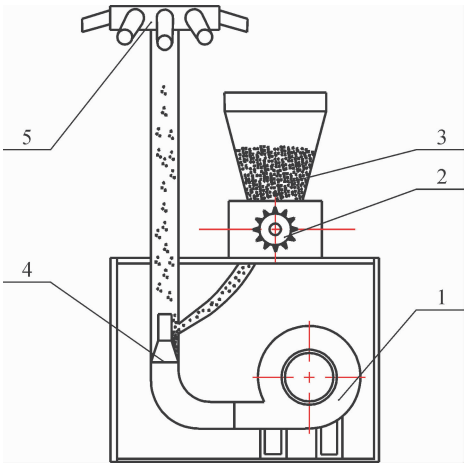
我国水稻种植面积约占世界的 20% ,总产量占世界的 34% ,随着社会发展,劳动力成本的提高与水资源的缺乏,水稻直播越来越受到关注^[1-3]。我国现有水稻以机械直播为主,作业速度一般为 4 ~ 5 km · h⁻¹ ,国外气力式播种机作业速度普遍为 8 ~ 15 km · h⁻¹。气流分配式播种具有工作效率高、节约成本、伤种率低、通用性强等特点,符合目前水稻直播机高速、宽幅作业的发展趋势^[4-6]。李中华等^[7]对气流分配式排种器进行了优化设计,并结合 CFD 模拟的方式对苜蓿种子进行仿真。常金丽等^[8]设计了一种 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统对小麦种子进行了试验分析。沈景新^[9]系统地设计了一种气流一阶集排式播种机,可满足小麦的基本播种要求。Kumar等^[10]对气流分配器进行了结构分析,提出了分配器要设计成流线型才会使气流场分布达到最优。德国的 Accord 气流集排条播机气流分配器虽然消除了涡流,但仍有滞留区和气流收缩现象^[11]。

EDEM-Fluent 耦合仿真是目前解决气固两相流问题的重要途径,该方法的基本思路:通过 Fluent 求解流场,使用 EDEM 计算颗粒系统的运动受力情况,两者以一定的模型进行质量、动量和能量等的传递,实现耦合^[12]。心男^[13]、张强强^[14]采用 EDEM-Fluent 耦合对气固两相流问题进行耦合仿真,均取得了理想的效果。但目前采用此方法对气力式排种器进行数值模拟的相关报道较少,因此开展气流分配排种过程数值模拟对气力式排种器设计研究具有一定的指导意义。

1 排种器工作原理与关键部件设计

1.1 排种器工作原理

气流分配式排种器如图 1 所示,排种器主要由风机、种子定量器、种箱、喷射器、气流分配器等部分组成。工作时,种箱内的种子经过种子定量器,形成一股均匀的种子流进入喷射器中,风机产生高速气流进入喷射器,高速气流在喷射器下腔产生负压,将种子吸入喷射器内并与种子均匀混合,沿管道将种子向上输送,在分配器的作用下完成分配工作,种子再沿排种管输送至各行开沟器,实现了统一送种、一器多行排种^[9,15]。



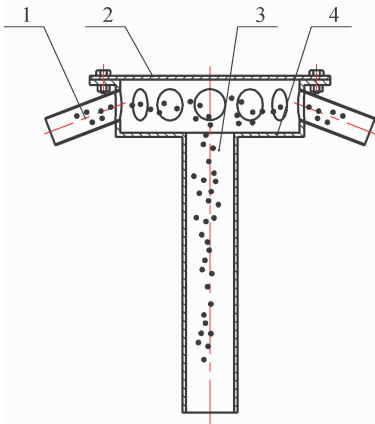
1: 风机; 2: 种子定量器; 3: 种箱; 4: 喷射器; 5: 气流分配器。

图 1 气流分配式排种器结构图

Fig. 1 Structural diagram of airflow distribution seed-metering device

1.2 关键部件设计

气流分配器见图 2,分配器由排种管、导种管、密封上盖、分配器壳体等部分组成。排种过程中,气流流动中管道截面突然扩大,由于惯性流体规模不可能按照管道形状突然扩大,因此在管壁的拐角处形成旋涡,导致大量的机械能变成热能而消散。另外,从小直径管道流出的流体有较高的流速,必然要碰撞到大直径管道中较低流速的流体,产生局部损失^[16]。在传统结构的气流分配器基础上,本文优化了分配器壳体内腔与密封盖结构形状,设计了一种新式的气流分配器。



1: 排种管; 2: 密封上盖; 3: 导种管; 4: 分配器内腔。

图 2 气流分配器结构图

Fig. 2 Structural diagram of airflow distribution device

1.2.1 分配器壳体内腔设计 局部损失系数变大、高速气流形成的真空旋涡滞种现象,大大降低了分配器排种质量。因此,设计分配器壳体内腔应着眼于最小化旋涡区的大小和强度,减少滞种现象的发生。对于减小这种变径管道的局部阻力,通常采用渐扩或者渐缩管道,本研究采用改变边壁形状的方式减小局部损失,把水平的导种管边壁改成喇叭口式渐扩管道(图3)。

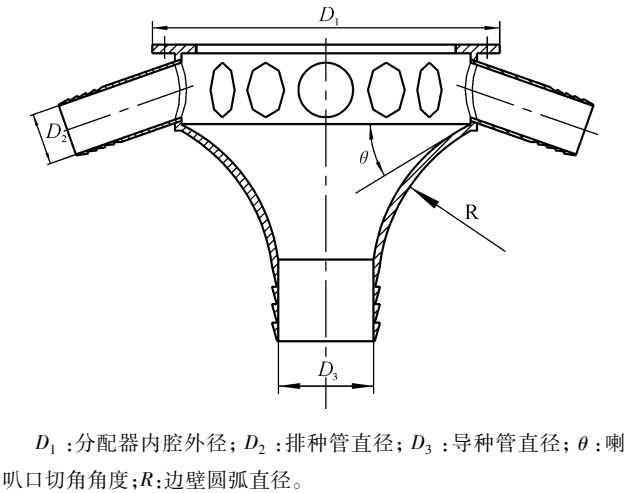


图3 喇叭口式壳体内腔

喇叭口式管道的局部阻力系数(ζ)计算公式为:

$$\zeta = \frac{\lambda}{8\sin(90 - \theta)} \left[1 - \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^2 \right] + K \left(1 - \frac{D_3}{D_1} \right),$$

式中, λ 表示沿程损失系数, K 表示微压计系数($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), D_1 为分配器内腔外径(mm), D_2 为排种管直径(mm), D_3 为导种管直径(mm), θ 为喇叭口切角角度($^\circ$)。

设计分配器内腔结构时以减小局部阻力系数为原则,图3为喇叭口式分配器内腔, $D_1 = 140 \text{ mm}$, $D_2 = 26 \text{ mm}$, $D_3 = 50 \text{ mm}$,壁厚 2.5 mm,边壁圆弧直径为 R ,通过调节 R 的大小改变圆弧形状,改变排种器的结构形状,从而降低局部阻力系数。

1.2.2 分配器密封上盖设计 根据流体力学知识,射流在通过管道撞向壁面时,壁面会给气流一个反向的作用力,一部分气流会沿着出口方向向外流动,但是另外一部分沿着气流的反方向回弹,与射流发生碰撞,形成真空域。因此,密封盖应避免气流回弹产生的真空域,减少滞种情况。结合文献[17]得出结论:分配器安装分流圆锥比不安装的变异系数要低 2% 左右,本研究设计了一种锥形分流式的密封盖(图4),将气流均匀分配至各排种管。外径 $D_4 = 140$

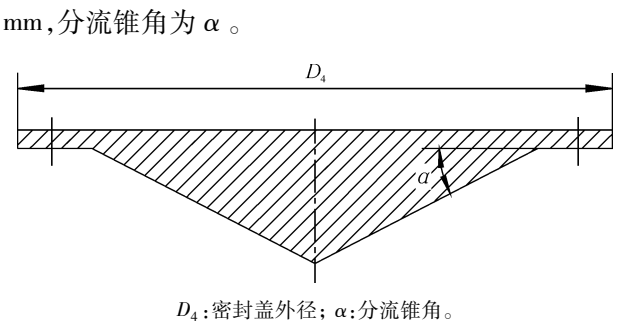


图4 密封盖模型图

1.2.3 种子定量器 本研究设计的气流分配式排种器属于“一器多行”式排种,对种子定量器的播量需求较高,传统的外槽轮排种器已经不能满足其需求。本研究选取了一种旋进轴移式外槽轮种子定量器^[18],结构如图5所示。该种子定量器与传统的外槽轮排种器种子定量器最大的区别在于排种量很大,而且可以通过螺纹状的旋进轴控制阻塞轮的位置,从而实现播量无极调节控制。

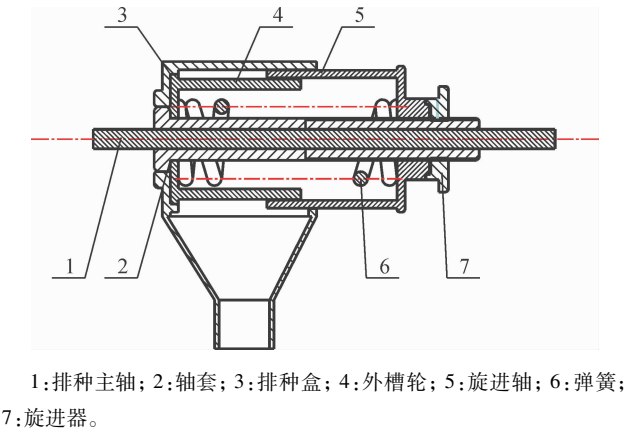


图5 种子定量器结构

2 排种性能数值模拟

传统的 CFD 模拟和 DEM 模拟受其方法限制,无法准确模拟气流分配式排种器内受力复杂情况下种子颗粒的运动情况,从而难以准确模拟其工作过程。在 EDEM-Fluent 耦合模拟中,基于离散元的数值模拟可以准确分析种子颗粒的力学行为,提供种子颗粒的实际位置和运动情况,从而得到更加丰富的模拟结果^[13]。

2.1 Lagrangian 耦合模型

本研究基于 Fluent14.5 与 EDEM2.5 软件对气流分配式排种器排种过程进行数值模拟。由于水稻颗粒在分配器中所占体积分数不足 10%,因此仿真模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的 Lagrangian 耦合算法。

Lagrangian耦合不仅能够实现气固两相之间的动量、能量交换,还能计算离散相颗粒对连续相的影响^[19]。

2.2 建立仿真模型

2.2.1 建模与划分网格 考虑到整个气流分配排种过程仿真的困难性,本研究仅对核心工作部分进行排种仿真。使用 Solidworks 软件建立气流分配器模型;然后使用 ICEM14.5 进行混合网格划分^[20-21](图 6),即在结构复杂区域进行非结构化网格划分^[22-24],其他区域进行结构化网格划分,网格数 351~518,节点数为 61~741。常规水稻种子外形整体呈椭圆形,颗粒扁平,两头尖锐,长宽高 3 轴平均尺寸为 8.5 mm×2.7 mm×1.7 mm,根据 EDEM2.4 软件说明书基于球形颗粒物的计算原理,本研究采取球形颗粒堆积的方法对水稻种子进行了建模(图 7)。

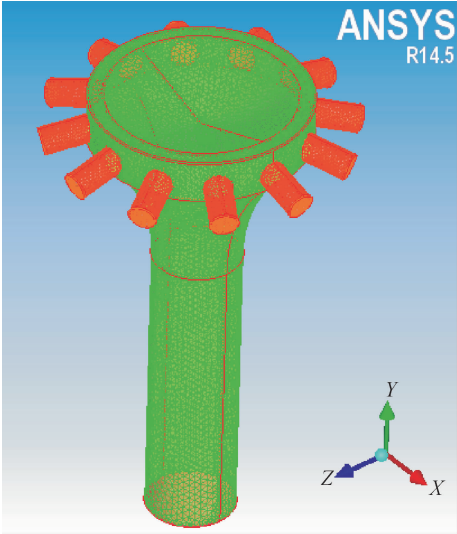


图 6 网格模型
Fig. 6 Mesh model

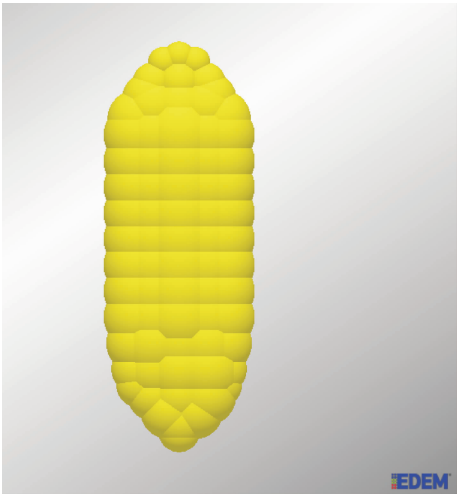


图 7 水稻模型
Fig. 7 Rice model

2.2.2 设置参数与边界条件 水稻悬浮速度^[25]为 $7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;整体气流输送速度(v_a)主要根据经验数据确定,一般物料的输送风速为悬浮速度的 2.4~4.0 倍,根据文献^[25]可知,水稻的气流输送速度为 $16\sim25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,考虑到整个系统的密封性,本次试验选取气流输送速度 $v_a=25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据播种时一般田间环境,采用 Velocity-inlet 速度入口条件,入口风速为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,方向垂直于入风平面;排种出口设置为 Outflow 边界条件;壁面采用静止边界条件;在 EDEM 中设置颗粒与颗粒、壁面之间均采用 Hertz Mindlin(No Slip)碰撞模型;水稻泊松比为 0.3,剪切模量为 $2.6\times10^8\text{ MPa}$,密度为 $1\,670\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;工程塑料泊松比为 0.5,剪切模量为 $1\times10^8\text{ MPa}$,密度为 $900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;颗粒-颗粒、颗粒-壁面的接触参数均采用默认设置;Fluent 软件中时间步长设置为 2.5×10^{-3} ,保存频率设置为 20 步,保存时间设置为 0.1 s;EDEM 软件中时间步长设置为 2.5×10^{-5} ,保存频率设置为 40 步,保存时间设置为 0.001 s;颗粒大小设置为 normal(正态分布),颗粒生成位置为随机分布;设置颗粒工厂为动态生成颗粒,假设水稻亩播量为 4 kg ^[26],前进速度 $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,12 行机器幅宽为 2.4 m,将创建速率设为 $538\text{ 粒}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2.3 耦合参数设置 耦合参数设置时,采用 Lagrangian 耦合;设置采样点为 10,为保证每次迭代计算的收敛性,设置动量亚松弛、体积亚松弛因子为 0.3,热源亚松弛因子为 0.7;耦合时,Fluent 与 EDEM 之间每个迭代步都会有大量数据信息经由耦合模块进行交换^[27],为保证计算时的稳定,EDEM 时间步一般是瑞利时间步的 10%~30%,两者时间步长和数据保存频率也必须成整数匹配,总体仿真时间为 5 s。

2.2.4 仿真模型验证 为证明本研究设计的仿真模型合理可行,进行网格无关性验证与时间步长独立性验证。网格无关性验证为逐步对网格进行细化直到网格步长对计算结果没有影响,图 8 表示其他条件相同时,用 6 组不同网格尺寸模拟排种器 3 号出口固定点气流速度值,得出结论:当网格数量从 35 万变至 200 万时,随着网格数增加,3 号出口固定点流速值变化很小,说明增加网格数量对计算结果影响很小,可认为 35 万网格已满足仿真要求。

2.3 数值模拟方案

试验参照标准 GB/T 25418—2010^[28],选取排种均匀性、各行排种一致性、总排量稳定性 3 个指标对本次设计的气流分配式排种器进行性能试验。

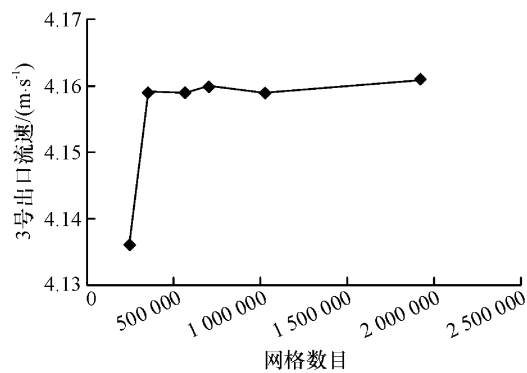


图 8 网格无关性验证结果

Fig. 8 Result of grid-independent verification

分配器设计时,设计了一种 R 可调的喇叭口式内腔与一种 α 可变的锥形分流密封盖进行组合。以 10° 为间隔选取 $\alpha \in [10^\circ, 50^\circ]$; 以 50 mm 为间隔选取 $R \in [30, 330]$ 。通过组合不同尺寸的内腔与密封盖进行分配器排种性能试验,试验结果显示 $\alpha \in \{20^\circ, 30^\circ\}$ 、 $R \in \{80, 130, 180\}$ 时,排种均匀性变异系数介于 $[24.56\% \sim 32.14\%]$ 之间,各行排量一致性变异系数介于 $[3.79\% \sim 4.98\%]$ 之间,满足国家标准规定,并以此结果为技术安排了试验因素水平(表 1),以确定最优的分配器结构参数。

表 1 试验因素水平		
Tab. 1 Factors and levels of experiment		
水平	试验因素	
	密封锥角 (A)/(°)	边壁直径 (B)/mm
1	20	80
2	25	130
3	30	180

3 数值模拟结果分析

图 9 为传统结构与 α - R 结构的分配器在仿真时间内的气固合速度分布图。观察气固合速度分布图可知,2 种结构的分配器中水稻颗粒最低运动速度一致,均为 $4.885 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 在 α - R 结构分配器中最高速度为 $5.416 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且每一阶色带速度均高于传统结构分配器,表明水稻颗粒在 α - R 结构的分配器中获得的加速效果更明显;对比图 9a 与 9b,图 9b 中 α - R 结构分配器内水稻颗粒运动空间较大,且蓝色负压带区域小于前者,意味着分配器内滞种区域明显减小,颗粒排出顺畅。

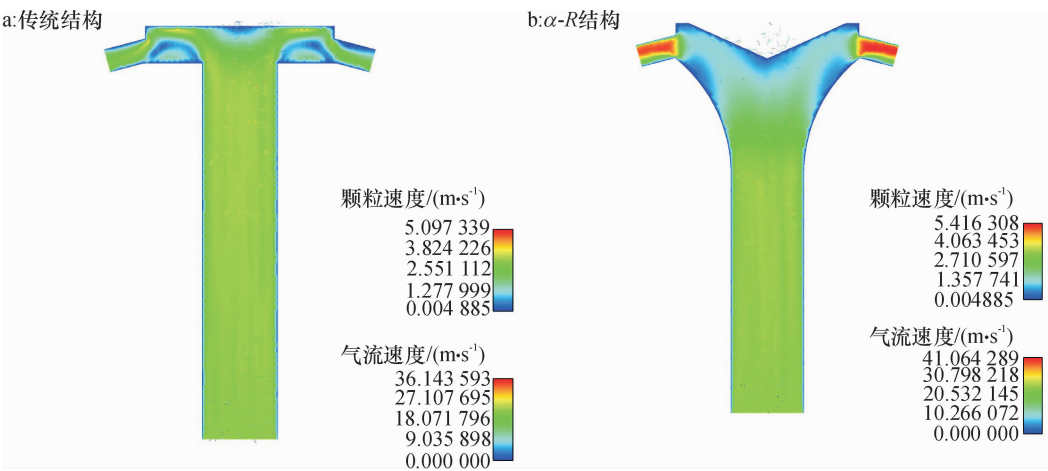


图 9 不同结构分配器中气固合速度分布图

Fig. 9 Air-solid velocity distribution in distributors of different structures

在仿真的 5 s 内,随机抽取行为检测行,计算其在仿真时间内的排种均匀性变异系数和各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数。表 2 为试验结果,表 3 为结果分析,从表 3 中可知影响排种均匀性、排量一致性、总排量稳定性的主次因素均为:边壁直径(R) > 密封锥角(α)。对于排种均匀性的最优方案为 A_1B_3 ; 对于各行排种一致性的最优方案也为 A_1B_3 , 且因素 B 的 $k_3 < k_2 < k_1$, 说明各行排种

一致性随着边壁直径 R 的增大呈提高趋势,原因是边壁直径 R 增加降低了旋涡滞种区域,增加了颗粒的排出效率。因此,根据极差分析的结果确定较为适合的气流分配式排种器结构为 A_1B_3 , 即密封锥角 $\alpha = 20^\circ$ 、边壁直径 $R = 180\text{ mm}$, 此时排种均匀性变异系数为 24.56%, 各行一致性变异系数为 3.79%, 总排量稳定性变异系数为 1.23%, 满足水稻直播要求。

表 2 仿真试验结果

Tab.2 Results of simulation experiment

试验编号	因素水平		试验指标		
	密封锥角	边壁直径	均匀性	各行一致性	总排量稳定性
	(A)/(°)	(B)/mm	变异系数/%	变异系数/%	变异系数/%
1	1	1	25.77	4.25	1.84
2	1	2	26.62	4.11	1.75
3	1	3	24.56	3.79	1.23
4	2	1	29.14	4.53	1.79
5	2	2	30.06	4.20	1.66
6	2	3	29.89	4.08	1.48
7	3	1	32.14	4.98	1.91
8	3	2	31.86	4.75	1.78
9	3	3	30.59	4.34	1.37

表 3 仿真结果分析

Tab.3 Analysis of simulation results

分析项	均匀性变异系数/%		各行一致性变异系数/%		总排量稳定性变异系数/%	
	A	B	A	B	A	B
k_1	25.650	29.017	4.050	4.587	1.607	1.847
k_2	29.697	29.513	4.270	4.353	1.643	1.730
k_3	31.530	28.347	4.690	4.070	1.687	1.360
极差	5.880	1.166	0.640	0.517	0.080	0.487
较优水平	A ₁	B ₃	A ₁	B ₃	A ₁	B ₃
主次因素	A ₁ B ₃		A ₁ B ₃		A ₁ B ₃	

4 验证试验

在南京农业大学工学院自行研制的排种性能试验台上进行排种性能验证试验。试验材料为:PLA材料3D打印的 α -R结构气流分配器;淮稻5号水稻种子;富力HG250型漩涡气泵,最大风量为 $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;TD8901风速仪;压力表等。调节传送带前进速度分别为 $5、6、7\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,以此模拟不同大田播种速度;调节入口风速至 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对本次设计的密封锥角 $\alpha=20^\circ$ 、边壁直径 $R=180\text{ mm}$ 的气流分配排种器,进行 10 s 的排种试验。测定项目为:排种均匀性变异系数、各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数。试验结果(表4)显示,3种不同传送带速度条件下,各项性能指标比较稳定,排种均匀性变异系数介于 $29.17\%\sim30.86\%$ 之间;各行排种一致性变异系数介于 $4.13\%\sim4.33\%$ 之间;总排量一致性变异系数介于 $1.40\%\sim1.70\%$ 之间,3指标均略高于仿真结果,原因是试验过程中存在着气流密封性能方面的缺陷,影响了分配器内部气流分布效果,在以后的台架试验或者大田试验中需要加强整个排种系统的密封性能。但3指标均满足了国标

要求,说明该排种器满足了水稻直播要求,且利用EDEM-Fluent耦合软件对其进行仿真是可行的。

表 4 台架试验结果

Tab.4 Bench test results

传送带前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	排种均匀性 变异系数/%	各行一致性 变异系数/%	总排量稳定性 变异系数/%
5	30.55	4.16	1.70
6	29.17	4.13	1.40
7	30.86	4.33	1.70

5 结论

本研究设计了一种由边壁直径(R)可调节的喇叭口式内腔与密封锥角(α)可变的分流密封盖组成的 α -R式气流分配式排种器,采用EDEM-Fluent耦合软件对排种过程进行仿真分析,并进行了台架验证试验。

数值模拟得出水稻颗粒运动情况与分配器内部气流分布情况, α -R结构的气流分配器中的旋涡滞种区域明显低于传统结构;影响排种均匀性、各行排量一致性、总排量稳定性的主次因素均为: $R>\alpha$,确定了 $\alpha=20^\circ$ 、 $R=180\text{ mm}$ 时,分配器内部的旋涡滞

种区域明显降低,排种性能最优,排种均匀性变异系数为 24.56%,各行一致性变异系数为 3.79%,总排量稳定性变异系数为 1.23%,且 α 相同, R 增大时各项性能指标呈变优趋势。

台架试验结果表明:3 种不同传送带前进速度条件下,试验结果较为稳定,排种均匀性变异系数为 29.17%~30.86%,各行一致性变异系数为 4.13%~4.33%,总排量稳定性变异系数为 1.40%~1.70%。满足水稻机械化直播要求,表明利用 EDEM-Fluent 耦合仿真具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 张国忠,罗锡文,臧英,等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 13-20.
- [2] 王洋,张祖立,张亚双,等. 国内外水稻直播种植发展概况[J]. 农机化研究, 2007(1): 48-50.
- [3] 罗锡文,谢方平,区颖刚,等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 136-139.
- [4] 杨慧. 气流输送式排种系统性能试验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014.
- [5] 杨慧,刘立晶. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究, 2013(12): 216-220.
- [6] 梅婷,李仲恺,王小龙,等. 国内气力式精密播种器的研究综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2013, 51(4): 17-21.
- [7] 李中华,王德成,刘贵林,等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 64-68.
- [8] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 136-141.
- [9] 沈景新. 2BQ-12 型气流一阶集排式播种机的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [10] KUMAR V J F, DIVAKER DURAIRAJ C. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J Agric Engng Res, 2000, 75(1): 81-95.
- [11] LI A J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. Solids deposition in low-velocity slug flow pneumatic conveying[J]. Chem Eng Process, 2005, 44(2): 167-173.
- [12] 北京海基科技发展有限公司. 流体-颗粒系统数值模拟的 FLUENT-EDEM 解决方案[Z], 2009.
- [13] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [14] 张强强. 基于 DEM-CFD 耦合的颗粒在水中沉降过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [15] KARAYEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosyst Eng, 2004, 87(4): 437-444.
- [16] 周欣. 工程流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 205-214.
- [17] 秦军伟,张晓辉,陈彬,等. 集中式排种系统中分配器的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2007(6): 131-133.
- [18] 常金丽. 机械定量气流式集中排种系统的研究及其排种特性试验分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [19] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010: 213-255.
- [20] 石林榕,吴建民,赵武云,等. 基于 CFD-EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 273-278.
- [21] 黄波,陈晶晶. 基于 CFD-EDEM 重介质旋流器内煤颗粒运动特性分析[J]. 煤矿机械, 2015, 36(7): 268-270.
- [22] 刘立意,郝世杨,张萌,等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27-32.
- [23] 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等. 基于 CFD-DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 117-122.
- [24] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
- [25] 王汉青. 通风工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 276-279.
- [26] 邵文奇,钟平,孙春梅,等. 沿淮地区直播稻品种筛选与播种处理试验[J]. 现代农业科技, 2009(23): 71-72.
- [27] 王国强,郝万军,王继新,等. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 159-178.
- [28] 中国机械工业联合会. GB/T 25418—2010 水稻覆土直播机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 2-3.

【责任编辑 庄 延】