

气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验

李衍军¹ 刘 瑞² 刘春晓³ 刘立晶^{1,4}

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 内蒙古拉布大林农牧场, 呼伦贝尔 022250; 4. 土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 设计气流输送式排种系统时需确定种子速度, 以小麦种子为试验对象, 采用计算流体动力学和离散元耦合的方法在不同播种量与风速情况下对输种管内种子速度进行数值模拟。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的 Lagrangian 耦合算法进行气固两相流耦合仿真, 在台架试验中运用高速摄像技术对输种管内的种子运动过程进行图像采集, 将采集的图像进行二值化、反色、差分、腐蚀去噪声等图像处理, 根据种子面积与质心位置特征提取种子的移动距离, 并计算得到种子实际运动速度。仿真模拟与试验表明, 输种管内种子速度主要受风速影响, 播种量对其影响很小; 不同风速下输种管内种子速度仿真值与试验值的相对误差范围为 4.28% ~ 6.06%, 相同位置处不同风速种子速度仿真值与试验值的相对误差范围为 4.86% ~ 5.70%, 通过计算得到输种管内种子速度的修正系数平均值为 0.95。基于气固两相流耦合的输种管内种子速度仿真具有较高的准确度, 验证了基于 EDEM-Fluent 耦合仿真测定输种管内种子速度的可行性。

关键词: 气流输送式; 排种系统; 输种管; 气固耦合; 种子速度; 数值模拟

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)04-0054-08

OSID:



Simulation and Test of Seed Velocity Coupling in Seed Tube of Pneumatic Seed Metering Device

LI Yanjun¹ LIU Rui² LIU Chunxiao³ LIU Lijing^{1,4}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Labdalin Farm in Inner Mongolia, Hulunbuir 022250, China

4. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: For the design of the pneumatic conveyor type metering system, wheat seeds were taken as test object to provide a reference basis, and through the calculation on the fluid dynamics and the coupling of the discrete element method to make numerical simulation. The standard $k-\varepsilon$ model of unsteady coupling Lagrangian algorithm coupling simulation was used to simulate the gas-solid two-phase flow. The high-speed camera technology was used to capture images of the seed movement process in the seed tube for the experiment. The collected image was processed by binaryzation, color inversion, differential and corrosion and processing. The seed movement distance was extracted according to the characteristics of the seed area and the position of the center of mass, and the actual movement speed of the seed was calculated. The simulation and test results showed that the seed velocity in the seed tube was mainly affected by the wind speed, but the seed application rate had little influence. The relative error range between the simulated and experimental values of seed velocity at different wind speeds was 4.28% ~ 6.06%, and the ratio of simulation test results to real test results was approximately constant, which was supposed to be due to the influence of seed sphericity on movement speed. The results showed that the correction coefficient of the seed velocity in the seed tube was 0.95. Therefore, the simulation test of seed velocity through fluid solid coupling simulation had a high accuracy, which verified the feasibility of the method of measuring the seed velocity of the seed tube based on EDEM-Fluent gas-solid two-phase flow coupling simulation. The research can provide a new method for measuring the seed velocity in the seed tube.

Key words: pneumatic conveying; seeding system; seed tube; gas-solid coupling; seed velocity; numerical simulation

收稿日期: 2020-12-21 修回日期: 2021-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)

作者简介: 李衍军(1989—),男,博士生,主要从事农业机械装备与技术研究,E-mail: 1047996083@qq.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械装备研究,E-mail: xylilj@ sina.com

0 引言

与传统的机械式排种方式相比,气流输送式排种空间布置灵活,有利于播种机的配置。目前我国已有气流输送式排种方式应用于小麦精量播种机的相关研究^[1-4]。在气流输送式播种机排种系统设计中,过低的气流速度会导致种子在输种管道内堵塞,过高的气流速度会增大种子破碎率,还会增加能耗和管道磨损等。

文献[5]利用高速摄像技术研究了不同输种管内径的种子分布状态,发现种子随机分布在输种管内,主要集中于管道中间,随着管径的增加与供种量的减少,种子的分布趋于分散,但并未研究种子在输种管内的运动状态;文献[6]根据种子下落时其动力学能量的变化规律,研究了不同输种管倾斜角下的动力学能量损失,结果表明,倾斜角为 45°时的动力学能量损失最小,管径对能量损失无影响,还进一步研究了输种管倾斜角对排种性能的影响;文献[7]通过试验研究了输种管内气流速度、输种管材料、管道直径、管道弯曲半径等因素对气流输送式播种机排种均匀性的影响;文献[8]研究了输种管内径与长度对排种均匀性影响,但只针对 0.3、0.5 m 两种长度进行研究;文献[9]研究了输种管长度对气流输送式播种机管内气流分布机理的影响,发现随着输种管长度的增加,管内气流的平均流速逐渐降低,导致排种量减小。尽管相关学者研究了输种管结构等因素对排种均匀性的影响,但种子在输种管内的运动较为复杂,难以准确描述和分析种子运动特性。

随着计算机数字化模拟技术的发展,EDEM 离散元仿真与基于 Fluent 有限元的流体动力学仿真被广泛应用于农业机械设计领域^[10-13],EDEM - Fluent 气固两相流耦合仿真为输种管内种子速度的测定提供了新方法。在利用 EDEM 软件进行仿真试验前,需要设定各个材料间的接触参数。目前,物料间的接触参数还没有系统的测试方法,很难通过真实试验直接获得^[14-16],一般采取真实试验与虚拟试验相结合的方式参数标定^[17]。由于农业物料个体差异性大、形状不规则,影响了标定参数的准确性,从而导致仿真结果与试验结果存在一定的误差。在对输种管内种子速度进行测定时,气固两相流中种子的体积分数通常小于总体积分数的 10%,种子间的接触参数不会对种子速度测定产生显著影响。基于 EDEM - Fluent 气固两相流耦合模拟预测输种管内种子速度对分析种子动力学特性和进行排种系统设计具有理论价值和实际应用意义,同时还

可以提高研发效率、节约研发成本^[18-19]。

本文以小麦种子为研究对象,进行耦合仿真分析和试验研究,对两种结果进行对比,以验证基于 EDEM - Fluent 气固两相流耦合测定输种管内种子速度的可行性,根据试验对数值模拟结果进行修正,以期通过耦合仿真确定进口风速,为气流输送式排种系统进口风量的选择提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用小麦品种为农麦 3 号,平均长度为 5.95 mm,平均宽度 3.13 mm,平均厚度 3.00 mm,千粒质量为 39.98 g,含水率为 10.47%。

在中国农业机械化科学研究院的土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室 2PST 型排种器性能测试系统基础上,增设了独立的气流输送式排种系统与丹麦 JAI 公司的 SP-I2000C-CXP4 型高速摄像机。试验装置选用北方规模化种植常用播种机型——24 行播种机配套的气流输送式排种系统(图 1),输种管选用透明的 PVC 软管。通过查阅资料确定种子与所选材料的泊松比,计算得剪切模量,测定小麦种子密度、三轴尺寸等,结果如表 1 所示。

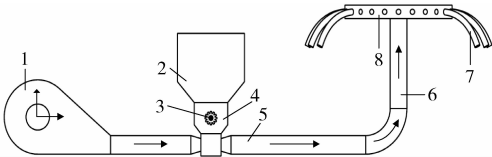


图 1 气流输送式排种系统原理图

Fig. 1 Schematic of pneumatic seeding system

1. 风机 2. 种箱 3. 集中式排种器 4. 空气-种子混合室 5. 过渡输种管 6. 导流管 7. 分配器 8. 输种管

表 1 材料基本参数

Tab.1 Basic material parameters		
材料	参数	数值
小麦	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	5.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 350
	等效直径/mm	3.83
PVC 管	泊松比	0.32 ~ 0.47
	剪切模量/Pa	$1.50 \times 10^9 \sim 3.92 \times 10^{10}$
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	418

1.2 工作原理

工作过程为:气流输送式排种系统种箱内种子,以风机产生的气流为载体输送空气-种子两相流,先后经过过渡输种管和导流管到达分配器,通过分配器将空气-种子两相流均匀分配,经过输种管落入接种杯中。

1.3 试验方法

首先通过受力分析得到种子在输种管内的运动方程;其次基于 EDEM – Fluent 气固两相流耦合模拟种子在输种管内运动过程,分析得到小麦种子在输种管内速度的预测值;最后采用高速摄像技术拍摄种子在不同播种量与风机风量下的运动状态,利用图像处理技术分析种子速度,并与仿真值进行对比。

1.4 试验设计

试验方案设计参照文献[20],选定风机频率 x_1 和播种量 x_2 为试验因素。根据我国不同地区农艺要求,播种量满足 $150 \sim 300 \text{ kg/hm}^2$,进口风量由控制风机的电机进行调整,为便于试验过程参数设置和计算简便,采用风机频率作为试验因素,风量经试验取值范围为 $7.2 \sim 9.0 \text{ m}^3/\text{min}$,转换成风机频率为 $40 \sim 50 \text{ Hz}$,输种管长度 3.5 m ,内径 32 mm [9]。选用二次回归通用旋转组合设计[21],试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码		
Tab.2 Coding of experimental factors		
编码	因素	
	风机频率 x_1/Hz	播种量 $x_2/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$
-1.414	40.0	150
-1	41.5	172
0	45.0	225
1	48.5	278
1.414	50.0	300

2 种子受力分析与仿真模拟

气流输送种子时,如果两粒种子相距很近,会相互影响,使种子受到的作用力发生变化,从而影响种子在输种管内的运动。但研究表明:若球径为 d ,两球的前后距离为 X ,当 $X/d > 2.5$ 时,两球在气流中互无干涉[22]。把种子视为球体,实际播种时,种子之间 X/d 大于 2.5,故相邻种子之间无影响,因此,本文对单粒种子的气流输送过程进行分析。为便于理论分析作如下假设:①管道中气流流速稳定后同一断面上各点的气流速度相同,均为平均速度。②不计沿程压力损失。③不规则形状的小麦种子悬浮速度相同。

2.1 受力分析

种子和气流的速度方向与水平方向呈 θ 角运动且没有碰撞时,种子受力如图 2 所示。根据气固两相流理论,等效直径为 d_s 的小麦种子在气流中受到的作用力 F_p 为

$$F_p = k\rho Au_r^2 \tag{1}$$

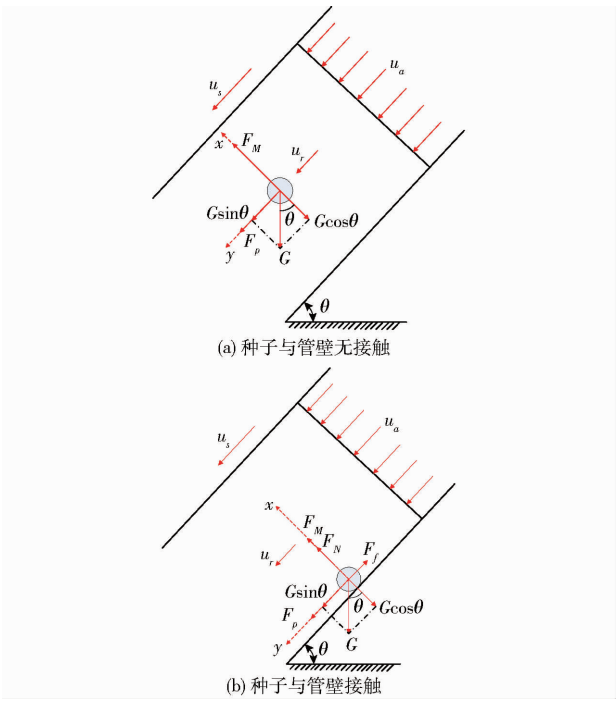


图 2 种子受力分析

Fig.2 Schematics of pneumatic seeding

其中

$$u_r = u_a - u_s \tag{2}$$

$$u_a = \frac{Q}{A_r} \tag{3}$$

式中 k ——种子阻力系数,取 0.22
 ρ ——工作状态下 (20°C) 空气的密度,取 1.205 kg/m^3
 A ——种子迎流面积, m^2
 u_r ——种子对气流相对速度, m/s
 u_a ——气流平均速度, m/s
 u_s ——种子速度, m/s
 Q ——气流流量, m^3/s
 A_r ——输种管截面积, m^2

根据种子受力分析得

$$\begin{cases} F_x = F_M - G\cos\theta \\ F_y = F_p + G\sin\theta \\ G = mg \end{cases} \tag{4}$$

式中 F_x ——种子垂直运动方向受力, N
 F_y ——种子沿运动方向受力, N
 G ——种子重力, mN
 F_M ——马格努斯效应力
 m ——种子质量, kg
 g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2

种子重力分力 $G\cos\theta$ 可认为和气流产生的压差力、马格努斯效应力 F_M 相平衡;在种子运动方向受气流阻力 F_p 和 $G\sin\theta$ 的共同作用,根据达朗培尔原理得到种子运动微分方程为

$$\begin{cases} \frac{du_{sx}}{dt} = \frac{F_M}{m} - g\cos\theta \\ \frac{du_{sy}}{dt} = \frac{k\rho A \left(\frac{Q}{A_T} - u_s\right)^2}{m} + g\sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中 u_{sx} 、 u_{sy} —— x 、 y 方向种子速度, m/s

因分配器位置与输种管布置的关系限制,种子在运动过程中不可避免与输种管发生碰撞,则除受上述力之外,还受输种管管壁的支持力 F_N 及摩擦阻力 F_f 。根据达朗培尔原理得到种子运动微分方程为

$$\begin{cases} F_f = \mu F_N \\ \frac{du_{sx}}{dt} = \frac{F_M + F_N}{m} - g\cos\theta \\ \frac{du_{sy}}{dt} = \frac{k\rho A \left(\frac{Q}{A_T} - u_s\right)^2}{m} + g\sin\theta - \frac{\mu F_N}{m} \end{cases} \quad (6)$$

式中 μ ——输种管摩擦因数

由式(5)、(6)可知,种子在输种管内运动加速度受气流平均速度 u_a 、种子速度 u_s 及输种管与水平方向夹角 θ 的影响。由于气流作用力 F_p 的作用,种子在输种管出口处的投种速度和加速度明显增加,可能导致种子入土时发生弹跳;因输种管内径固定即输种管截面积 A_T 固定,气流平均流速 u_a 主要受入口气流流量 Q 的影响;同时在田间作业时各输种管的安装位置不同导致输种管与水平方向夹角 θ 不一致,在输种管垂直方向加速度与气流扰动的作用下种子与管壁发生碰撞;输种管内种子数量增多,导致输种管相对截面积减小从而导致气流平均流速 u_a 增大,进而影响种子速度。因此,影响种子速度的因素主要包括气流流量与种子量,在试验中通过风机频率与播种量来控制。受力分析为试验设计与仿真模拟提供了理论依据。

2.2 仿真模拟与分析

传统的 CFD 模拟无法准确模拟排种系统中种子的运动情况,不能准确模拟其工作过程。而 EDEM-Fluent 耦合仿真中,基本离散元的数值模拟可以准确分析种子的力学行为,提供种子的实际位置和运动情况,从而得到更加丰富的模拟结果^[23]。

本研究基于 EDEM 2018 软件分析种子运动情况,基于 Fluent 18.0 软件计算流体动力学。在 EDEM 软件中进行仿真设置,由于小麦种子表面几乎没有粘附力,所以种子与种子间、种子与壁面间均采用 Hert-Mindlin 无滑动接触模型,并设置重力加速度为 x 轴正向。仿真中所有材料的参数参照文献[5]中小麦种子的参数,如表 3 所示。由于小麦种子在输种管内所占体积分数不足 10%,因此

Fluent 中仿真模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的 Lagrangian 耦合算法。Lagrangian 耦合不仅能够实现气固两相流之间的动量、能量交换,还能计算离散相颗粒对连续相的影响^[24]。

表 3 仿真参数

Tab.3 Parameters used in simulation

类型	参数	数值
种子-种子	碰撞恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.35
	动摩擦因数	0.05
种子-PVC	碰撞恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.40
	动摩擦因数	0.05

2.2.1 建模与网格划分

利用 SolidWorks 软件对气流输送式排种系统进行建模并对模型进行简化;然后利用 ICEM 18.0 进行混合网格的划分,即对分配器与输种管进行非结构化网格划分,其余部分采用结构网格进行划分,如图 3 所示。

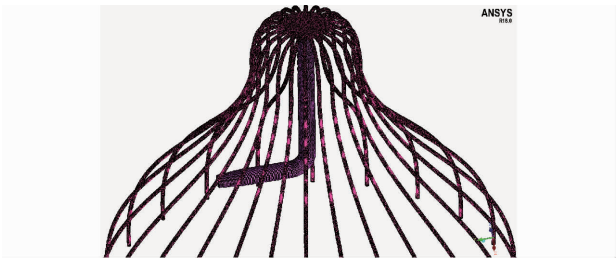


图 3 网格模型

Fig.3 Mesh model

2.2.2 设置参数与边界条件

边界条件和工程目标是控制计算有解和收敛目标的前提。本研究对于气流相,气流入口设置为气流速度入口,方向垂直于入口平面,入口速度按照试验方案依次进行设置;壁面采用静止边界条件;种子入口和输种管出口设置为气流压强出口。

按 EDEM 软件与 Fluent 软件耦合计算的数据传递需要,Fluent 软件中的时间步长必须是 EDEM 软件中时间步长的整数倍。为保证计算稳定,EDEM 的时间步长一般是瑞利时间步长的 10%~30%^[24],因此 EDEM 软件中时间步长设置为 1.5×10^{-6} s,保存时间步长设置为 40 步,保存时间设置为 0.001 s;Fluent 时间步长设置为 EDEM 时间步长 100 倍: 1.5×10^{-4} s,迭代计算 20 000 步,总仿真时间为 3 s。仿真中具体设置的播种量与风速经换算如表 4 所示。

2.2.3 仿真结果与分析

通过 Fluent 软件进行后处理,得到输种管内气

表 4 仿真方案

Tab.4 Schemes of simulation				
方案	播种量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	播种量仿真 值/($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	风机频率/ Hz	风速仿真值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	150	160.00	45.0	55.20
2	172	183.45	41.5	52.81
3	172	183.45	48.5	58.60
4	225	240.00	40.0	50.16
5	225	240.00	50.0	60.00
6	225	240.00	45.0	55.20
7	278	296.50	41.5	52.81
8	278	296.50	48.5	58.60
9	300	320.00	45.0	55.20

流场速度分布云图如图 4 所示,气流经分配器分配到输种管内气流速度逐渐减小,当气流流经一段长度后气流速度逐渐稳定;在输种管气流入口处气流速度处于减速阶段,在减速阶段任意截面上的气流速度从管道中心至管壁逐渐减小;当气流速度稳定以后任意截面上的气流速度相同。因此,在气流减速阶段种子表面会产生压力差,气流在吹动种子向下运动的同时也会将种子吹向管壁方向,当种子靠近管壁处气流速度减小从而使种子与管壁接触甚至发生碰撞。

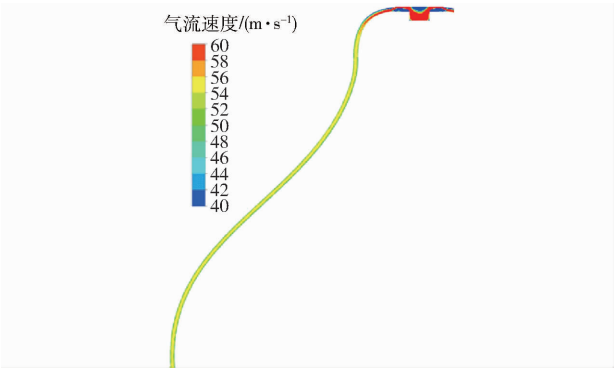


图 4 输种管内气流速度流场分布
Fig.4 Velocity flow field distribution of seed tube

通过 EDEM 仿真分析得到种子在输种管中的运动轨迹如图 5 所示。由图 5 可以看出,种子在输种管内沿管方向运动过程中与管壁发生数次碰撞从而降低速度,随后在气流作用下种子继续加速运动,如此反复运动直至种子从输种管内排出。

利用 EDEM 后处理得到种子在输种管内的分布状态如图 6 所示,分析得到种子经分配器分配后连续分布于各输种管中。

在 EDEM 中利用块功能分析不同输种管位置处种子速度,得到仿真结果如图 7 所示。由图 7 可知,在相同进口风速作用下种子速度随输送距离的增加逐渐增大;由于速度曲线的斜率逐渐减小,说明随输送距离的增加种子加速度逐渐减小;在进口风速固定不变情况下,随播种量的增加,相同输种管位

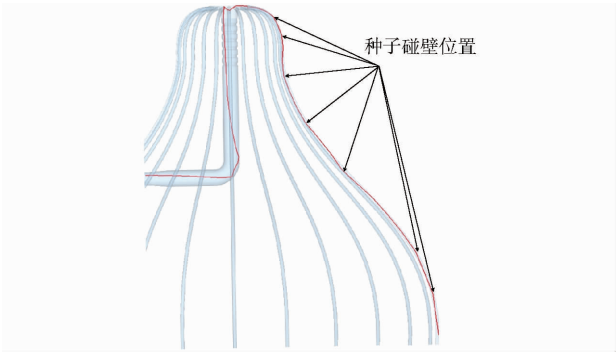


图 5 种子运动轨迹
Fig.5 Motion track of seed

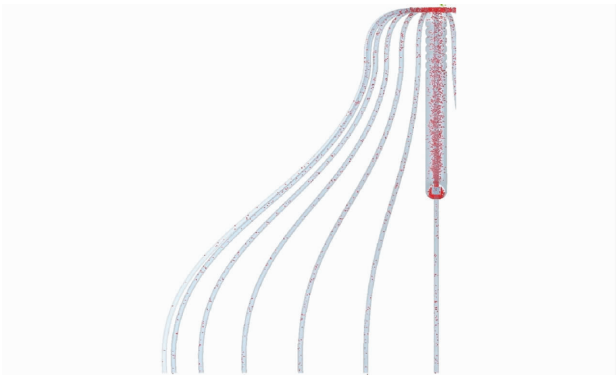


图 6 种子分布
Fig.6 Distribution of seeds

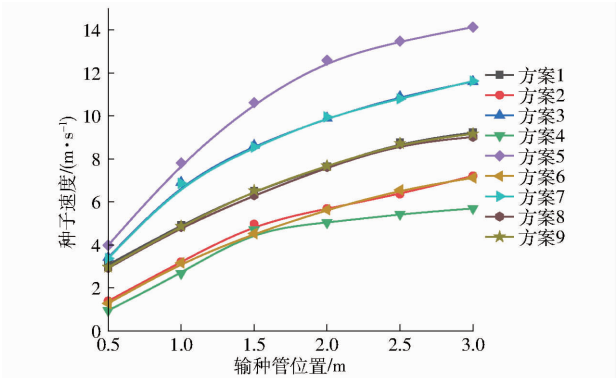


图 7 种子速度仿真曲线
Fig.7 Simulation value of seed velocity in seed tube

置处种子速度基本相同。

通过 EDEM – Fluent 耦合仿真分析得到种子在输种管内分布与运动状态,以及在不同进口风速与播种量情况下种子在输种管不同位置处的种子速度,为验证试验的设计提供了依据。

3 种子速度测定试验

为了验证耦合仿真的合理性,开展不同进口风速与播种量下输种管内种子运动速度的试验,采用高速摄像技术拍摄种子的运动状态,并进行分析得到种子速度。

3.1 种子图像采集

采用的高速摄像机曝光时间为 1 998 μs ,帧速

为 400 f/s,高速摄像机到输种管所处平面的水平距离为 500 mm,采集过程如图 8 所示。试验对象为小麦种子,样本质量为 20 kg。

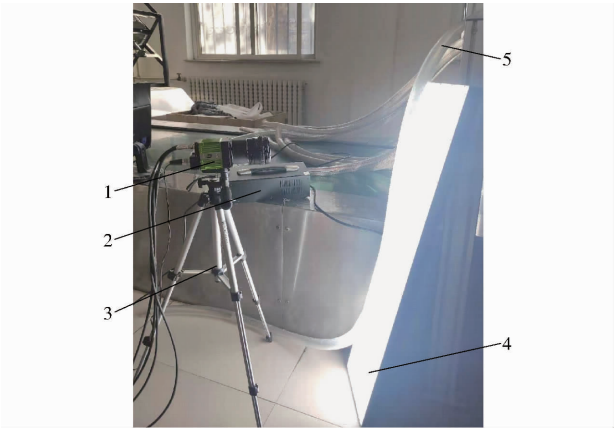


图 8 图像采集试验系统

Fig. 8 Image acquisition of test chart

1. 高速摄像机 2. 控制器 3. 摄像机固定支架 4. LED 光源
5. 输种管

启动风机,待排种系统稳定工作后,开启高速摄像系统,拍摄一段时间内输种管不同位置处种子运动状态。图像采集结束后,通过图像处理技术分析种子速度。

3.2 图像处理

高速摄像系统采集的图像不能直接进行目标提取,因为图像在采集及传输过程中,容易受到各种干扰,使得图像中除了有用信号外,还包含随机噪声。为了消除噪声干扰,提取种子运动距离,本文采用

Matlab 编程,对图像进行了二值化、反色、差分、腐蚀去噪声等处理^[25],具体操作过程如图 9 所示。

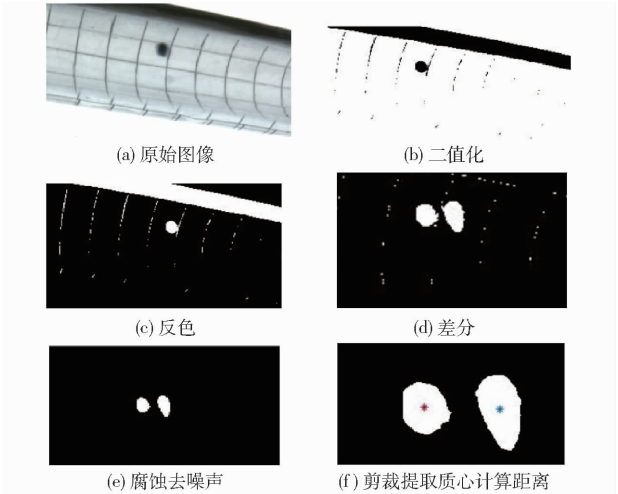


图 9 图像处理

Fig. 9 Image processing

采集序列帧图像的时间间隔(拍摄帧速)是确定的,因此可以通过高速摄像系统获得种子的运动时间和运动距离,从而计算得到种子在输种管内的速度为

$$u_m = \frac{l}{t}$$

(7)

- 式中 u_m ——台架试验种子速度, m/s
- l ——种子运动距离, m
- t ——种子运动时间, s

对试验台采集的图像进行处理后计算得到不同播种量与风速下,不同位置处种子速度(表 5)。分

表 5 输种管内不同位置处种子速度

Tab. 5 Different locations of seed velocity in seed tube

方案	种子速度仿真值/(m·s ⁻¹)						种子速度试验值/(m·s ⁻¹)						误差 均值/%
	输种管位置/m						输种管位置/m						
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
1	3.07	4.93	6.51	7.65	8.76	9.23	2.91	4.56	6.38	7.29	8.22	8.87	4.87
2	1.39	3.21	4.97	5.69	6.36	7.21	1.29	2.98	4.52	5.58	6.06	6.93	5.72
3	3.41	6.91	8.62	9.89	10.89	11.59	3.23	6.48	8.30	9.29	10.08	11.05	5.55
4	0.95	2.67	4.70	5.03	5.431	5.69	0.92	2.55	4.54	4.84	5.15	5.18	5.28
5	3.98	7.81	10.62	12.58	13.47	14.13	3.90	7.52	9.97	11.99	12.77	13.08	4.87
6	2.92	4.83	6.30	7.61	8.68	9.02	2.65	4.53	6.18	7.32	8.35	8.93	4.28
7	1.28	3.17	4.53	5.64	6.56	7.12	1.22	3.05	4.23	5.13	6.16	6.53	6.06
8	3.37	6.86	8.54	9.95	10.79	11.62	3.17	6.60	7.96	9.12	10.38	11.07	5.58
9	2.97	4.87	6.53	7.68	8.72	9.17	2.75	4.69	6.19	7.53	7.94	8.69	5.43
误差均值/%							5.64	4.96	5.03	4.86	5.70	5.32	

析得到,种子在输种管内一直处于加速运动,种子速度逐渐增大,与理论分析相吻合;不同进口速度下,种子速度随进口速度的增大而逐渐增大;相同进口速度下,种子速度随播种量的变化波动很小,与仿真分析结果相吻合。

对输种管出口处种子速度进行方差分析,结

果见表 6。分析得到模型 $P < 0.000\ 1$,模型极显著;风机频率 x_1 (即进口风速) $P < 0.000\ 1$,风机频率对种子速度影响极显著;播种量 x_2 的 $P > 0.05$,说明播种量对种子速度影响不显著;风机频率 x_1 与播种量 x_2 的交互作用 x_1x_2 对种子速度影响不显著。通过对不同位置种子速度分析及输种管出口

处种子速度方差分析得到,在固定播种量情况下,随着风速的增大,种子在输种管内的速度逐渐增大;在固定风速情况下,随着播种量的变化,种子在输种管内速度变化很小,说明在输种管内种子速度主要受进口风速影响。

表 6 出口处种子速度方差分析

Tab.6 Variance analysis of seed velocity at exit

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	53.02	3	17.67	164.84	<0.000 1 **
x_1	52.63	1	52.63	490.90	<0.000 1 **
x_2	0.37	1	0.37	3.49	0.094 7
x_1x_2	0.013	1	0.013	0.12	0.733 5
残差	0.96	9	0.11		
误差	0.032	4	8.02×10^{-3}		
总和	53.98	12			

注:**表示差异极显著($P<0.001$)。

试验发现在不同播种量与风速下得到的种子速度均小于仿真模拟得到的种子速度,因为小麦种子是不规则物体,在试验过程中种子在气流作用下不停旋转导致种子的迎风面积不断变化,从而使种子所受风力不断变化;输种管的布置也没有仿真模拟理想,导致碰撞次数增多,降低了种子速度。

由于输种管内不同位置处种子速度不同,分别对不同位置处的种子速度进行相对误差计算,最后取平均值作为整个输种管内种子速度的相对误差,计算公式为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{u_{\bar{f}i} - u_{mi}}{u_{\bar{f}i}}}{n} \times 100\%$$

(8)

式中 $\bar{\varepsilon}$ ——相对误差平均值, %
 $u_{\bar{f}i}$ ——仿真试验种子速度, m/s
 u_{mi} ——验证试验种子速度, m/s
 n ——取值次数, 取 6

计算得到不同风速下输种管内种子速度仿真值与试验值的相对误差为 4.28% ~ 6.06%, 相同输种管位置处不同风速下种子速度仿真值与试验值相对误差为 4.86% ~ 5.70%。

种子在输种管内一直做加速运动且输种管各处种子速度的相对误差近似常数,因此可以通过速度修正系数对仿真结果进行修正,修正系数计算公式

为

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{u_{mi}}{u_{\bar{f}i}}}{n}$$

(9)

式中 $\bar{c}$ ——种子速度修正系数平均值

由表 7 可知,通过计算得到输种管内种子速度修正系数平均值为 0.95,验证了基于 EDEM-Fluent 耦合仿真测定输种管内种子速度方法的可行性。

表 7 修正系数

Tab.7 Correction coefficients

方案	输种管位置/m						平均值
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
1	0.95	0.93	0.98	0.95	0.94	0.96	0.95
2	0.93	0.93	0.91	0.98	0.95	0.96	0.94
3	0.95	0.94	0.96	0.94	0.93	0.95	0.94
4	0.96	0.95	0.95	0.96	0.95	0.91	0.95
5	0.98	0.96	0.94	0.95	0.95	0.93	0.95
6	0.95	0.96	0.94	0.91	0.94	0.92	0.94
7	0.94	0.96	0.93	0.92	0.96	0.95	0.94
8	0.91	0.94	0.98	0.96	0.96	0.99	0.96
9	0.93	0.96	0.95	0.98	0.91	0.95	0.95
平均值	0.95	0.94	0.94	0.95	0.96	0.95	0.95

4 结论

(1)EDEM-Fluent 耦合仿真与高速摄像台架试验表明:输种管内种子速度随进口风速的增大而逐渐增大,随播种量的增加,种子速度变化很小,结合方差分析得出,输种管内种子速度主要受进口风速的影响。

(2)不同风速下输种管内种子速度仿真值与试验值的相对误差为 4.28% ~ 6.06%,相同输种管位置处不同风速种子速度仿真值与试验值的相对误差为 4.86% ~ 5.70%。

(3)通过耦合仿真模拟与试验,计算得到输种管内种子速度修正系数平均值为 0.95,说明基于气固两相流耦合的输种管内种子速度仿真模拟具有较高的准确度,验证了基于 EDEM-Fluent 耦合仿真测定输种管内种子速度的可行性。在气流输送式排种系统设计中,可由耦合仿真确定进口风速,从而为进口风量的选择提供理论参考。

参 考 文 献

[1] 张晓辉,王永振,张利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):59-67. ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)

[2] 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 conveying system[J]. Transactions of

- the CSAE,2011,27(1):136-141. (in Chinese)
- [3] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15.
QI Bing,ZHANG Dongxing,CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(18):8-15. (in Chinese)
- [4] 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216-220.
YANG Hui,LIU Lijing,ZHOU Junping,et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,35(12):216-220. (in Chinese)
- [5] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作原理[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2017. (in Chinese)
- [6] ENDREERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. J. Agric. Engng. Res.,1999(74):177-184.
- [7] 何友璋. 气流输种管结构及气流参数的研究[J]. 成都农机学院学报,1982,1(1):24-31.
- [8] 廖庆喜,舒彩霞. 精播机输种管对排种均匀性影响对试验研究[J]. 湖北农业科学,2004,49(4):126-128.
- [9] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):55-64.
LI Yanjun,LIU Youhua,LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):55-64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200606&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.006. (in Chinese)
- [10] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):43-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200505&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.005. (in Chinese)
- [11] 刘正道,王庆杰,李洪文,等. 耦合 CFD-DEM 的气力式种肥穴施装置投肥路径分析与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(21):18-25.
LIU Zhengdao,WANG Qingjie,LI Hongwen,et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD-DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(21):18-25. (in Chinese)
- [12] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):81-89.
YANG Qinglu,LI Zihan,LI Hongwen,et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):81-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190809&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [13] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
LI Liwei,MENG Zhijun,WANG Xiaou,et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):171-180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018023&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023. (in Chinese)
- [14] MARTINA C L,BOUVARDA D,SHIMAB S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2003,51(4):667-693.
- [15] CLEARY P W. Predicting charge motion,power draw,segregation and wear in ball mills using discrete element methods[J]. Minerals Engineering,1998,11(11):1061-1080.
- [16] 徐泳,李红艳,黄文彬. 耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J]. 农业工程学报,2003,19(2):34-38.
XU Yong,LI Hongyan,HUANG Wenbin. Modeling and methodological strategy of discrete element method simulation for tillage soil dynamics[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(2):34-38. (in Chinese)
- [17] 龚明. 材料物料特性参数标定[R]. 北京: EDEM 用户大会报告,2013.
- [18] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):69-77.
WEN Xiangyu,JIA Honglei,ZHANG Shengwei,et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-Fluent coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):69-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200308&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.008. (in Chinese)
- [19] 杨慧. 气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.
YANG Hui. Experimental study on performance of pneumatic conveying system[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science,2014. (in Chinese)
- [20] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

Xinjiang Province[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)

[13] 王林娜. 枣林间作牧草品种筛选及综合评价[D]. 塔里木:塔里木大学, 2017.
WANG Linna. Screening and evaluating forages under jujube forest [D]. Tarim:Tarim University, 2017. (in Chinese)

[14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:1141 – 1144.

[15] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):374 – 383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374 – 383. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200943&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.043. (in Chinese)

[16] 刘志刚,王德成,郝兴玉,等. 自走式灌木平茬机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 95 – 98.
LIU Zhigang, WANG Decheng, HAO Xingyu, et al. Design and experiment on self-propelled shrub cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 95 – 98. (in Chinese)

[17] 祝强. 林地履带底盘动力传动系统参数匹配与性能分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
ZHU Qiang. Parameters matching and performance analysis of the power transmission system of forestry machines track chassis [D]. Changsha:Central South University of Forestry and Technology, 2017. (in Chinese)

[18] 于庆有,司俊山,陆怀民. 森林消防车沼泽地通过性研究[J]. 农业机械学报,1996,27(1):80 – 85.

[19] 唐升武. 轮胎下沉量理论计算方法在结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 2004,24(1):16 – 17.

[20] 张卓. 基于玉米大豆轮作模式的大豆精密播种技术研究及配套耕播机设计[D]. 长春:吉林大学,2019.
ZHANG Zhuo. Research on the soybean precision seeding technology and till-planter design under corn and soybean rotation model [D]. Changchun:Jilin University, 2019. (in Chinese)

[21] 高爱民,韩正晟,吴劲锋. 割草机对苜蓿地土壤压实的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):101 – 105.
GAO Aimin, HAN Zhengsheng, WU Jinfeng. Experimental research on alfalfa soil compaction by mowing machine [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 101 – 105. (in Chinese)

[22] 付作立,王德成,李卫,等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):214 – 220.
FU Zuoli, WANG Decheng, LI Wei, et al. Design and experiment of two-disc rotary mower of alfalfa [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 214 – 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s028&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.028. (in Chinese)

[23] 卿上乐,颖刚华,刘庆庭. 甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J]. 农业机械学报,2006,37(1):51 – 54.
QING Shangle, YING Ganghua, LIU Qingting. Kinematics of single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 51 – 54. (in Chinese)

[24] 李耀明,李有为,徐立章,等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报,2014,30(18):30 – 37.
LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester cutting bench [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 30 – 37. (in Chinese)

[25] 吴伟斌,廖劲威,洪添胜,等. 山地果园轮式运输机车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报,2016,32(11):39 – 47.
WU Weibin, LIAO Jinwei, HONG Tiansheng, et al. Analysis and optimization of frame structure of wheeled transport locomotive in mountain orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 39 – 47. (in Chinese)

(上接第 61 页)

[21] 李飞雄,何东健. 种子在气流管道中运动规律的研究[J]. 西北农业大学学报,1986,14(1):12 – 24.
LI Feixiong, HE Dongjian. Research on the moving regularity of seeds in pneumatic pipes[J]. Act. Univ. Sept. Occi. Agri., 1986, 14(1): 12 – 24. (in Chinese)

[22] 费学通. 基于 DEM – CFD 耦合的气吹式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2011.
FEI Xuetong. Simulation analysis of working process of air blown corn precision seed-metering device based on DEM – CFD coupling method [D]. Changchun:Jilin University, 2011. (in Chinese)

[23] 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.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 – 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007. (in Chinese)

[24] 胡明国. 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.

[25] 陈兵旗. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.