

播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究

高筱钧 王世同 吴晓鹏 黄玉祥 闫小丽
(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 播种机气送式集排器增压管是种子颗粒输送过程中的重要组成部分,其结构直接影响到播种机的作业性能。本文运用理论分析与 EDEM-Fluent 耦合相结合的方法来研究增压管内种子流运移特性。经过理论分析后,得出影响种子颗粒的因素主要有增压管结构、输送气流和装置材料等。由于装置材料和输送气流均是外部因素,本文主要以油菜种子为例,研究增压管结构对种子颗粒运动状态的影响。耦合分析得出:常用增压管中 V 型波纹式的增压管对种子流有较好的扰动分散等作用;在气流速度为 16 m/s 时,增压管直径为 30 mm、长度为 100 mm、宽度为 10 mm、深度为 2 mm 时出口种子流质量较为均匀,其变异系数为 17.32%。开展台架试验验证了耦合参数和模型选择的正确性。

关键词: 气送式集排器; 增压管; 运移特性; 耦合分析

中图分类号: S223.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0047-10

Seed Flow Migration Characteristics in Booster Tube of Gas-fed Collector

GAO Xiaojun WANG Shitong WU Xiaopeng HUANG Yuxiang YAN Xiaoli
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Compared with traditional mechanical seed metering, pneumatic seed collectors are beneficial for the configuration and efficiency improvement of seeders, and have become the main trend in the development of seed collectors both domestically and internationally. The pressurization pipe of the pneumatic collector of the seeder is an important component of the seed particle conveying process, and its structure directly affects the operational performance of the seeder. A combination of theoretical analysis and EDEM-Fluent coupling was used to study the transport characteristics of seed flow in a pressurized pipe. After theoretical analysis, it was found that the main factors affecting seed particles included the structure of booster tube, the conveying airflow, and the material of device. Due to the external factors of device materials and conveying airflow, rapeseed seeds were mainly taken as an example to study the influence of pressure pipe structure on the motion state of seed particles. Coupling analysis showed that the commonly used V-shaped corrugated booster pipe had a good disturbance and dispersion effect on the seed flow. When the airflow speed was 16 m/s, the mass of the outlet seed flow was relatively uniform when the diameter of the booster pipe was 30 mm, the length was 100 mm, the width was 10 mm, and the depth was 2 mm, with a coefficient of variation of 17.32%. The correctness of coupling parameters and model selection was verified through bench tests.

Key words: pneumatic exhaust collector; booster tube; migration characteristics; coupling analysis

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更加灵活,从而有利于播种机的配置和提高效率^[1]。目前我国已有气流输送式排种方式主要应用于小麦和油菜等相关作物^[2]。提高通用

性是提高农作物产量和机具利用率的重要途径,而气送式集排器具有适应农作物种类多、高速以及高效等优点,目前已成为国内外播种机集排器发展的主要趋势^[3-5]。

增压管是排种系统中连接种子-气流混合室与分配器的主要部件,其主要功能是将管内的空气-种

子两相流进行扰动并将其打散,保证种子进入分配器前的分布均匀性,从而保证播种均匀性^[6-7]。种子在增压管气流场中减速增压,从而使种子分布更均匀,其中增压管结构不仅影响种子的运动状态,对播种机的整机结构和压强损失等也会产生影响。国外相关学者对增压管内壁结构的优化提供了部分理论基础^[8-9],国内学者对气送式排种系统中的关键部件进行了优化,同时对种子流的运动特性也有相关研究^[10-20],但针对增压管的研究较少。

由于种子颗粒在增压管内形成的气固两相流的情况较为复杂,用常规的数学模型很难建立粒子运动模型,难以准确描述粒子碰撞和团聚等特征及气流场,则需借助软件来进行分析^[21]。近年来,随着计算机技术的迅速发展,数值模拟技术已被运用于研究多相流模型并使其结构优化,特别是离散元法(DEM)能克服上述问题,已被广泛应用于颗粒行为的研究中^[22-23]。显然,离散元方法能够探究种子颗粒的运动特性和有效优化设计,提高工作性能^[24]。同时基于 EDEM-Fluent 的气固两相流耦合模拟研究增压管内种子动力学特性具有理论价值和实际应用意义,不仅可以直观地看到种子的运动情况和气流分布,同时还可以提高研发效率、节约研发成本^[25]。

由于种子流在增压管内的运动状态对集排器排种均匀性的影响较大且难以通过数学模型来具体描述,本文以油菜种子为例,研究气送式集排器增压管内种子流的运动特性,研究种子流在不同结构的增压管内的运动轨迹、速度、压力以及均匀性等参数,采用理论分析与耦合分析的方法研究影响种子运移特性的因素,并开展台架试验验证仿真结果,以优化增压管结构和提高排种均匀性。

1 理论分析

种子颗粒在增压管内运动过程较为复杂,种子颗粒在气力作用下进行输送、混合以及分离等过程,在该过程中种子颗粒与种子颗粒之间、种子颗粒与增压管之间会发生接触碰撞,因增压管内存在空气流动、颗粒流动且增压管结构比较复杂,内部气流和颗粒动态信息难以测量,为了明确种子颗粒在增压管中的运动过程,需要对种子颗粒在增压管内气力输送理论进行研究,分析种子颗粒在增压管内的运动过程,构建种子颗粒在增压管内气力输送的理论框架,为增压管的设计和试验研究提供理论基础。

1.1 种子无碰撞情况分析

种子颗粒在增压管内的气流输送过程可简化为

二维流场进行分析,根据气固两相流体力学理论可知,种子颗粒在气流场中受到的力包括种子颗粒自身的重力、气流对种子颗粒产生的浮力、种子颗粒运动过程中产生的气流阻力、种子颗粒运动过程中因自身旋转产生的升力、种子颗粒上部和下部速度差产生的升力、种子颗粒上部和下部压力梯度差产生的压力梯度力等。但在种子颗粒无碰撞的情况下,仅有种子颗粒的重力、浮力和阻力这3种力有相同的数量级,对种子颗粒的运动影响较大,因此对种子颗粒进行受力分析时可忽略其他的力,仅考虑种子颗粒的重力、浮力和阻力,受力情况如图1所示。

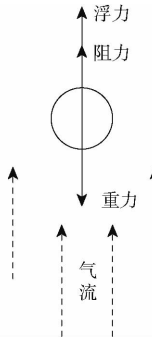


图1 种子颗粒受力简图

Fig. 1 Schematic of force on seed particles

根据牛顿第二定律可得

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_g + F_f \tag{1}$$

其中

$$F_g = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g \tag{2}$$

$$F_f = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_g g \tag{3}$$

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\rho_g (v_g - v_p)^2}{2} \tag{4}$$

- 式中 m_p ——颗粒质量,kg t ——时间
 F_D ——流体阻力,N
 F_g ——重力,N
 F_f ——浮力,N
 v_p ——颗粒速度,m/s
 d_p ——种子颗粒直径,m
 ρ_p ——种子颗粒密度,kg/m³
 g ——重力加速度,m/s²
 ρ_g ——流体密度,g/cm³
 C_D ——阻力系数,与管道内气流的运动有关,为颗粒雷诺数 Re_p 的函数
 v_g ——气流速度,m/s

流体输送中颗粒的阻力系数根据颗粒雷诺数的大小划分为3个区域,分别是粘性摩擦阻力区或斯托克斯(Stokes)区(小雷诺数区)($Re_p \leq 1$)、过渡区

或阿连 (Allen) 区 ($1 < Re_p \leq 1\,000$)、涡流压差阻力区或牛顿 (Newton) 区 (大雷诺数区) ($1\,000 < Re_p \leq 2 \times 10^5$)，不同种子颗粒直径对应不同的雷诺数区域，其计算方法也不同。阻力系数计算公式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & (Re_p \leq 1) \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & (1 < Re_p \leq 1\,000) \\ 0.44 & (1\,000 < Re_p \leq 2 \times 10^5) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $Re_p = \frac{\rho_g d_p |v_g - v_p|_{\max}}{\mu_g}$ (6)

式中 μ_g ——气体粘度, Pa·s

1.2 种子与壁面碰撞情况分析

种子颗粒在输送过程中, 种子颗粒与增压管之间的碰撞是影响种子颗粒运动的重要因素, 种子颗粒与增压管碰撞过程如图 2 所示, 种子颗粒以速度 v_A 的与增压管壁面发生碰撞, 碰撞角度为 α_A , 种子颗粒为类球形, 可将其视为球形颗粒, 碰撞完成后种子颗粒速度变为 v_B , 反射角度变为 α_B , 因碰撞过程中材料的摩擦力及其他力的作用, 种子颗粒的角速度在碰撞前后也发生相应的变化^[26]。

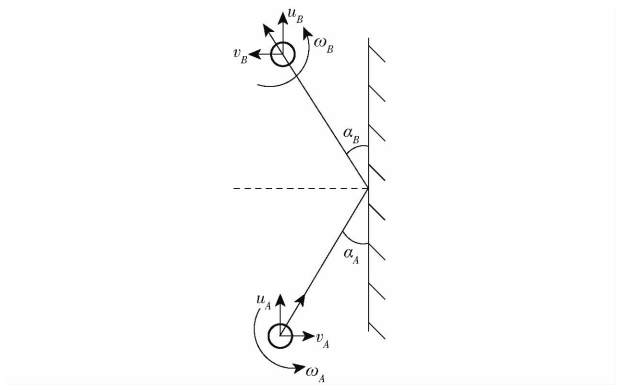


图 2 种子颗粒与壁面碰撞简图

Fig.2 Schematic of collision between seed particles and wall surface

在种子颗粒与增压管的碰撞过程中, 种子颗粒的速度在法向和切向的分量、角速度由于材料阻尼作用产生一定的变化, 一般采用碰撞恢复系数描述该变化损失, 根据碰撞恢复系数的定义有

$$\begin{cases} e_n = -\frac{v_B}{v_A} \\ e_t = \frac{u_B}{u_A} \\ e_\alpha = \frac{\omega_B}{\omega_A} \end{cases} \quad (7)$$

式中 e_n ——种子颗粒与增压管碰撞时法向碰撞恢复系数

e_t ——种子颗粒与增压管碰撞时切向碰撞恢复系数

e_α ——种子颗粒与增压管碰撞时角速度碰撞恢复系数

v_A, v_B ——种子颗粒碰撞前后法向分量, m/s

u_A, u_B ——种子颗粒碰撞前后切向分量, m/s

ω_A, ω_B ——种子颗粒碰撞前后角速度, rad/s

根据碰撞过程速度分解, 各速度分量满足

$$\begin{cases} u_B = (v_B + u_B) \cos \alpha_B \\ v_B = (v_B + u_B) \sin \alpha_B \\ u_A = (v_A + u_A) \cos \alpha_A \\ v_A = (v_A + u_A) \sin \alpha_A \end{cases} \quad (8)$$

碰撞过程中法向的碰撞恢复系数 e_n 主要与种子颗粒及增压管的材料相关, 在碰撞后, 可以用碰撞前各个速度分量和法向碰撞恢复系数的关系式来表达种子颗粒各个速度的分量。此外, 由于摩擦力的存在, 种子颗粒与增压管的碰撞过程可以分为滑移碰撞和无滑移碰撞两种情况。

1.3 种子与种子碰撞情况分析

种子颗粒在增压管内的输送过程中, 由于外界的气流作用, 颗粒群内各个颗粒的速度大小和方向基本相同, 因此种子颗粒之间的碰撞概率相对较低。不过, 在输送的过程中, 可能会由于各种原因导致种子颗粒之间的碰撞, 如输送管道的弯曲、气流流动的不稳定、颗粒自身的自转等。在发生颗粒间的碰撞时, 因其相对速度较小, 碰撞可以被认为是弹性碰撞, 与此同时, 碰撞对整个输送系统而言能量损失较小, 对颗粒群的输送影响也相对较小。由动量定理和动能定理可得

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \quad (10)$$

式中 m_1, m_2 ——两粒种子颗粒质量, kg

v_1, v_2 ——种子颗粒碰撞前速度, m/s

v'_1, v'_2 ——种子颗粒碰撞后速度, m/s

联立可得

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_2 \quad (11)$$

$$v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_2 \quad (12)$$

综上, 通过对种子颗粒的理论分析, 发现影响种子颗粒运动的因素有多种, 在无碰撞情况下, 影响种子颗粒运动的因素较为单一, 主要受气流输送速度和增压管的结构参数影响。气流输送速度过大或过小均会对种子颗粒的输送造成不同程度的影响。气流输送速度过大会导致种子颗粒受力过大, 容易发

生破碎等意外情况,从而影响其应用效果。气流输送速度过小则会导致种子颗粒输送受阻,影响生产效率。增压管的结构参数也会对种子颗粒运动产生影响。在实际应用中,为了保障种子颗粒的质量和运动效率,需要对气流输送速度和增压管的结构参数进行合理的优化设计。在有碰撞的情况下,影响种子颗粒运动的因素更为复杂。种子颗粒受碰撞影响的主要因素包括种子颗粒和增压管的材料以及增压管的结构参数等。尤其是增压管的结构参数在碰撞过程中至关重要,不同的结构参数将导致种子颗粒受到不同的碰撞力,进而影响其后续运动轨迹。此外,这种分析方法并不是只针对球形颗粒,非球形种子在计算过程中会稍有变化,即受力公式会发生变化,以及不能忽视一些重要力的影响。

2 耦合仿真分析

2.1 耦合仿真方法

在 EDEM – CFD 耦合仿真中,采用 Fluent 2020 和 EDEM 2021 软件进行仿真。由于油菜种子体积与增压管内气流场体积相差较大,故该模型选用拉格朗日多相流模型,该模型着眼于流体质点,主要思想是追踪一个颗粒样本,使其穿过连续流的介质,从而形成运动轨迹,根据轨迹便可求得颗粒的位置和速度,更适合于离散相体积分数较小的情况。

2.2 网格划分与边界条件设置

该耦合过程采用 SolidWorks 软件三维建模,用 Spaceclaim 抽取流体域,用 Meshing 划分网格。EDEM 仿真中选取默认的接触模型,增压管模型材料选取为铝合金,种子和铝合金的材料特性参数见表 1,重力加速度为 9.81 m/s^2 。查阅文献后设置种子入口速度为 8 m/s ,产生种子速率为 480 粒/s 。气体流动为湍流运动,连续相的气流场模拟采用 Fluent 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。入口设为气流速度入口,速度为 16 m/s ,出口设为压力出口。为了保证仿真精度的同时还可以提高仿真速度,设置 Fluent 时间步长为 $2\times 10^{-3}\text{ s}$,步数为 500 步,即总时长为 1 s 。

2.3 增压管类型选择

查阅文献资料后可知目前应用较广的增压管类型有普通直筒式、C 型波纹式、V 型波纹式以及窝眼式,其结构简图如图 3 所示。对这 4 种类型进行耦合后选择一种较优的类型。

2.3.1 压力云图分析

仿真结果显示该气固耦合模型有较好的收敛

表 1 材料特性参数

Tab. 1 Material property parameters

参数	油菜种子	铝合金
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 060	2 700
泊松比	0.25	0.30
杨氏模量/Pa	1.1×10^7	2.7×10^{10}
种子与种子碰撞恢复系数		0.6
种子与铝合金碰撞恢复系数		0.6
种子与种子静摩擦因数		0.5
种子与铝合金静摩擦因数		0.3
种子与种子动摩擦因数		0.01
种子与铝合金动摩擦因数		0.01

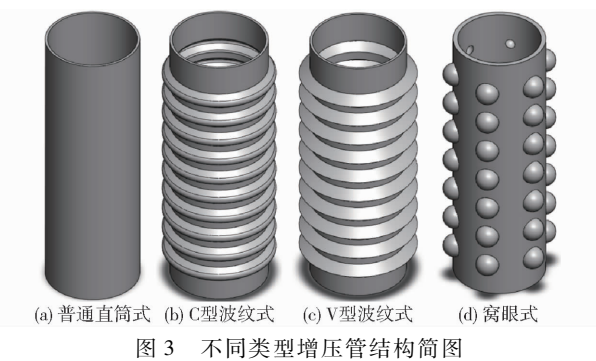


图 3 不同类型增压管结构简图

性,图 4 为各个模型的气流场压力云图。由图 4 可知,普通圆筒式的气流压力在管道轴线两侧对称分布性不如其他 3 种;普通圆管式与窝眼式气流压力的整体趋势均是从底部到顶部逐渐降低,但窝眼式相对于普通直管式气流压力降低的程度较大。其中普通直筒式从入口到出口的压降约为 11.68 Pa ,C 型波纹式与 V 型波纹式入口到出口的压降约为 60 Pa ,窝眼式从入口到出口的压降约为 28.71 Pa 。C 型波纹式与 V 型波纹式二者气流压力混合程度较好,可以使种子达到减速排列的效果。

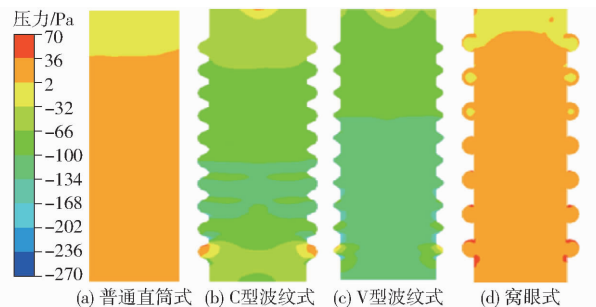


图 4 不同类型增压管压力云图

2.3.2 速度云图分析

图 5 为各个模型的气流场速度云图。由图 5 可知,4 种模型均有较好的对称性,普通直筒式由中心向壁面气流速度基本没有发生变化,只是在靠近壁

面的地方有较明显的降低;窝眼式在窝眼的地方气流速度极低,在竖直方向上入口气流速度先减小后增大,径向在靠近壁面的地方速度较低,其他地方速度基本相同。C 型波纹式与 V 型波纹式二者整体上都是从底部到顶部,从中心到壁面逐渐降低,但 C 型波纹式在入口处气流速度先降低后增大,V 型波纹式相对于 C 型波纹式气流速度整体降低的趋势更显著。

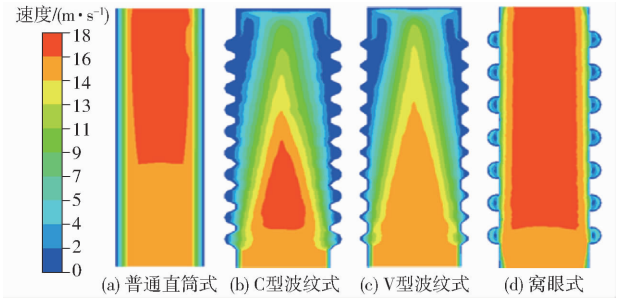


图 5 不同类型增压管速度云图

Fig. 5 Cloud charts of velocity for different types of booster tubes

2.3.3 种子颗粒受力分析

图 6 为所有种子颗粒在不同类型增压管内受到的平均合力随时间变化的曲线。由图 6 可知,普通直筒式增压管内,种子颗粒的受力不会发生太大变化,同时也比较小;窝眼式增压管相对于普通直筒式有一些波动,但整体与普通直筒式相差不大;C 型波纹式增压管内种子颗粒受力有较大波动,但波动不稳定且整体受力情况相较前两种类型有了很大改观;V 型波纹式增压管内种子颗粒受到的合力呈现出正弦式变化,在这 4 种类型中受力情况最好,能很好地达到种子减速和排列的目的。

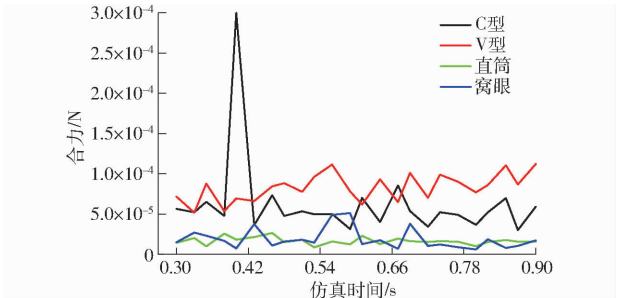


图 6 种子颗粒所受合力变化曲线

Fig. 6 Variation curves of combined force on seed particles

2.3.4 种子颗粒速度分析

图 7 为全部种子颗粒在不同类型增压管内的平均速度随时间变化曲线。由图 7 可知,普通直筒式增压管内种子颗粒速度基本在同一水平面上,没有发生太大变化;窝眼式增压管内种子颗粒速度相对于普通直筒式稍有降低,且有一定的微小波动;C 型

波纹式增压管内种子颗粒的速度整体趋势明显降低,但产生的波动具有随机性;V 型波纹式增压管内种子颗粒的速度不仅有降低的趋势,同时在整个过程中的速度均有较大的波动,比较适用于气送式集排器。

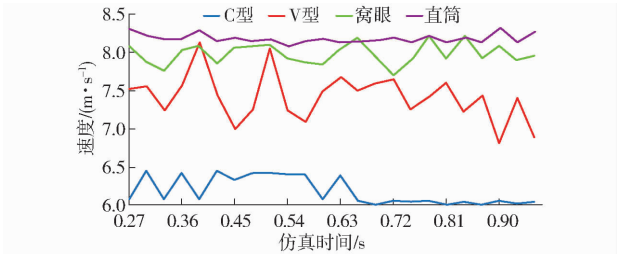


图 7 种子颗粒速度变化曲线

Fig. 7 Seed particle velocity variation curves

2.3.5 种子颗粒运动状态分析

种子在增压管内的运动状态主要有 2 种情况,在普通直筒式和窝眼式中,大多数种子都呈直线形上升,在 C 型波纹式与 V 型波纹式中,许多种子都会与增压管壁面相碰撞,从而以折线形上升。在 C 型波纹式中会有种子一直在波谷处的地方周向运动,短时间内不会运动到增压管出口。另外种子颗粒在几种增压管中的分布状态差异较小,都是均匀分布在增压管内。

综上所述,在这 4 种类型中,V 型波纹式有较好的效果。在 V 型波纹式增压管中,由于波峰波谷迭代的结构会使气流压力和速度均呈现出正弦形变化趋势,正是在这种趋势的影响下,增压管内部会形成扰动较大的湍流,不仅整体上影响了种子颗粒的速度,同时也增加了种子颗粒与壁面的碰撞概率,促使种子颗粒在增压管的内部分布更加离散和均匀,提高集排器的排种均匀性。因此在后续的优化过程中选择增压管类型为 V 型波纹式。

2.4 增压管结构优化

增压管结构如图 8 所示,为了分析增压管结构对排种性能的影响,使用 SolidWorks 软件建立直径分别为 20、30、40、50 mm、长度分别为 75、100、125、150 mm、波纹宽度分别为 6、8、10、12 mm、波纹深度分别为 1、2、3、4 mm 的增压管模型。对以上增压管模型进行耦合仿真,达到进一步优化增压管结构的

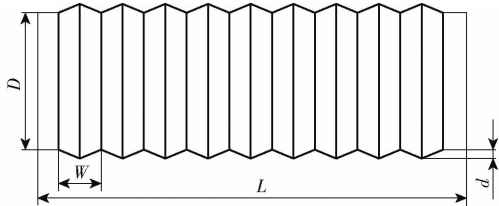


图 8 增压管结构简图

Fig. 8 Structure diagram of booster pipe

目的。

为研究增压管结构对排种均匀性的影响,在耦合完成后对一定时间内出口种子流质量进行统计。出口方格如图 9 所示。

2.4.1 不同直径对增压管排种性能的影响

增压管内流场速度的分布与气流和物料颗粒的流动状态有关,增压管内气流和物料颗粒的流动状态可根据雷诺数 Re 判断,而增压管直径可直接影响雷诺数 Re 。表 2 显示了出口种子质量均匀性在不同增压管直径下的影响,结果表明,在增压管直径为 30 mm 时,其出口种子质量的变异系数为 27.83%,排种均匀性较好。图 10 为增压管内部气流场云图,

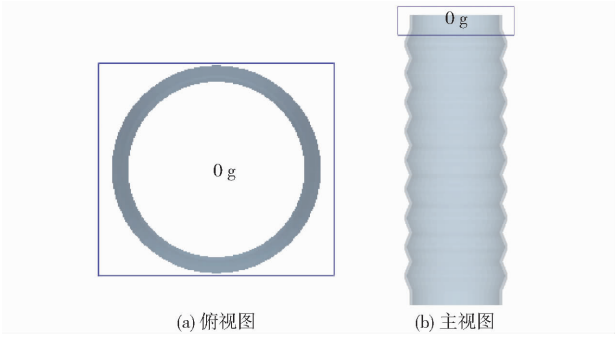


图 9 出口方格图

Fig.9 Exit grid

由图 10 可知,直径对气流压力的影响较大,且直径为 30 mm 与 40 mm 的进出口压力差较小。

表 2 不同直径的排种性能

Tab.2 Seeding performance of different diameters

直径/ mm	0.2~0.3 s 内出 口种子质量/mg	0.3~0.4 s 内出 口种子质量/mg	0.4~0.5 s 内出 口种子质量/mg	0.5~0.6 s 内出 口种子质量/mg	0.6~0.7 s 内出 口种子质量/mg	0.7~0.8 s 内出 口种子质量/mg	0.8~0.9 s 内出 口种子质量/mg	变异系 数/%
20	14.486	7.423	13.627	14.423	5.621	10.367	17.288	32.86
30	19.117	14.662	13.923	10.100	9.975	10.131	8.655	27.83
40	5.852	15.936	13.505	4.242	17.565	9.171	4.150	51.79
50	11.792	17.137	11.153	2.906	5.428	9.610	12.271	43.24

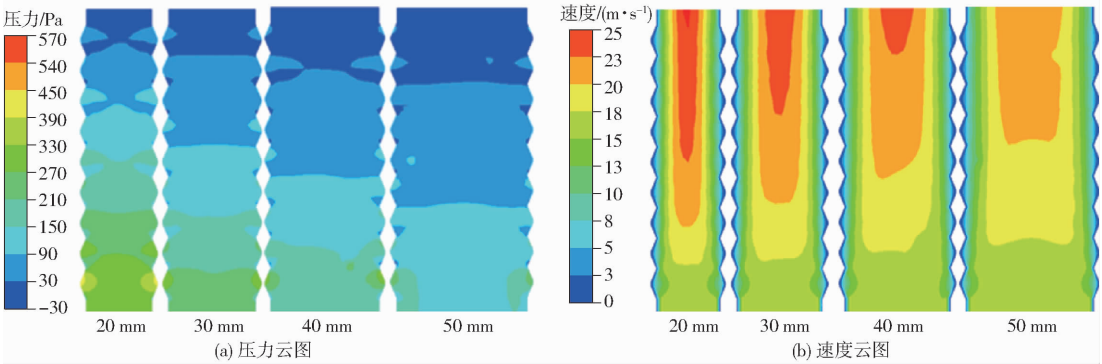


图 10 不同直径增压管内气流场云图

Fig.10 Cloud charts of air flow field in booster tubes with different diameters

2.4.2 不同长度对增压管排种性能的影响

增压管的长度对种子流在增压管内的运动时间有影响,从而间接影响了种子颗粒所受到的阻力 F_D 。表 3 显示了出口种子质量均匀性在不同增压管长度下的影响,结果表明,在增压管长度为 100 mm 时,其出口种子质量的变异系数为 27.83%,排种均匀

性较好。由图 11 可知,长度对气流场压力的影响大于对气流速度的影响,且随着长度的增加,增压管进出口的气流压差不断增加。

2.4.3 不同宽度和深度对增压管排种性能的影响

增压管的宽度和深度主要影响增压管壁面波纹的形状,从而影响种子流与壁面碰撞后的方向。

表 3 不同长度的排种性能

Tab.3 Seeding performance of different lengths

长度/ mm	0.2~0.3 s 内出 口种子质量/mg	0.3~0.4 s 内出 口种子质量/mg	0.4~0.5 s 内出 口种子质量/mg	0.5~0.6 s 内出 口种子质量/mg	0.6~0.7 s 内出 口种子质量/mg	0.7~0.8 s 内出 口种子质量/mg	0.8~0.9 s 内出 口种子质量/mg	变异系 数/%
75	11.693	15.041	9.987	5.416	5.535	12.761	6.948	36.24
100	19.117	14.662	13.923	10.100	9.975	10.131	8.655	27.83
125	12.869	20.173	17.533	13.249	12.183	8.376	5.341	36.42
150	28.069	18.761	32.185	19.396	10.632	6.641	16.985	43.83

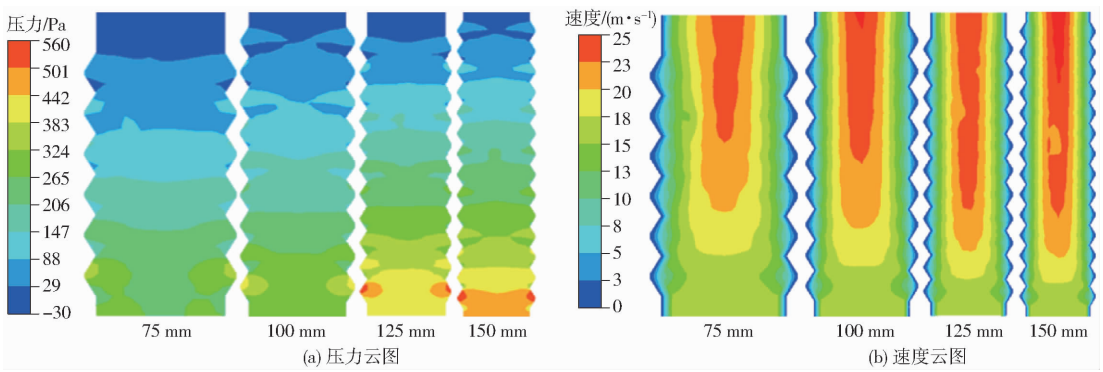


图 11 不同长度增压管内气流场云图

Fig. 11 Cloud charts of air flow field in booster tubes of different lengths

表 4 显示了在不同增压管宽度下出口种子质量均匀性,表 5 显示了不同增压管深度下出口种子质量均匀性,结果表明,在增压管宽度为 10 mm,深度为 2 mm时,其出口种子质量的变异系数为 17.32%,排种均匀性较好。由图 12 可知,宽度与增压管内气流场速度成负相关,即随着宽度的增加,出口速度逐渐降低,宽度为 10 mm 的增压管进出口压差最小。图 13 为不同深度增压管内部气流场云图,深度越大,增压管出口气流速度越大,同时进出口的压力差也在增大。

表 4 不同宽度的排种性能

Tab.4 Seeding performance with different widths

宽度/ mm	0.2~0.3 s 内出 口种子质量/mg	0.3~0.4 s 内出 口种子质量/mg	0.4~0.5 s 内出 口种子质量/mg	0.5~0.6 s 内出 口种子质量/mg	0.6~0.7 s 内出 口种子质量/mg	0.7~0.8 s 内出 口种子质量/mg	0.8~0.9 s 内出 口种子质量/mg	变异系 数/%
6	10.031	5.064	12.023	11.357	16.201	5.420	10.887	35.43
8	13.814	15.132	11.563	10.899	7.545	20.618	11.542	29.27
10	19.117	14.662	13.923	10.100	9.975	10.131	8.655	27.83
12	6.108	13.974	16.053	12.762	11.789	25.914	5.642	47.99

表 5 不同深度的排种性能

Tab.5 Seeding performance at different depths

深度/ mm	0.2~0.3 s 内出 口种子质量/mg	0.3~0.4 s 内出 口种子质量/mg	0.4~0.5 s 内出 口种子质量/mg	0.5~0.6 s 内出 口种子质量/mg	0.6~0.7 s 内出 口种子质量/mg	0.7~0.8 s 内出 口种子质量/mg	0.8~0.9 s 内出 口种子质量/mg	变异系 数/%
1	12.933	14.570	8.986	8.018	6.931	11.073	7.724	26.69
2	8.877	13.246	9.722	11.037	10.936	8.456	13.688	17.32
3	19.117	14.662	13.923	10.100	9.975	10.131	8.655	27.83
4	14.646	13.018	12.361	10.562	6.726	13.145	6.236	27.80

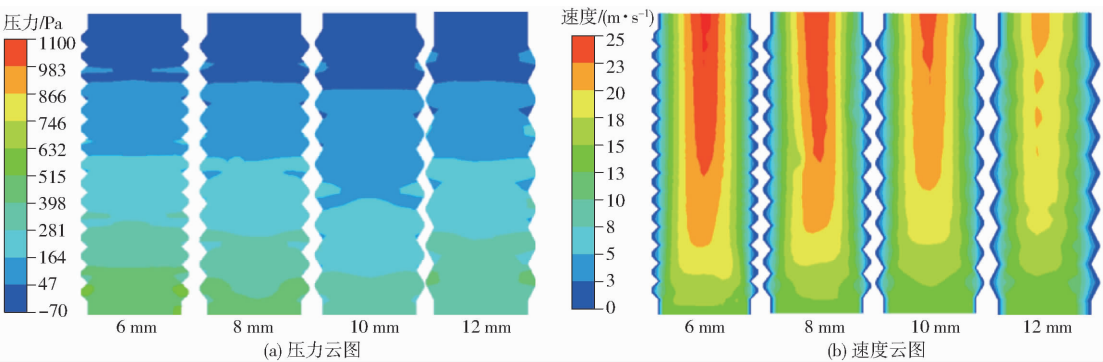


图 12 不同宽度增压管内气流场云图

Fig. 12 Cloud charts of air flow field in booster tubes of different widths

通过耦合仿真分析,选出目前结构类型较好的 V 型波纹式增压管,该类型波纹管可以更好地促使种子在管内的分布更加离散和均匀。针对 V 型波纹式增压管结构优化,采用的方法是建立多

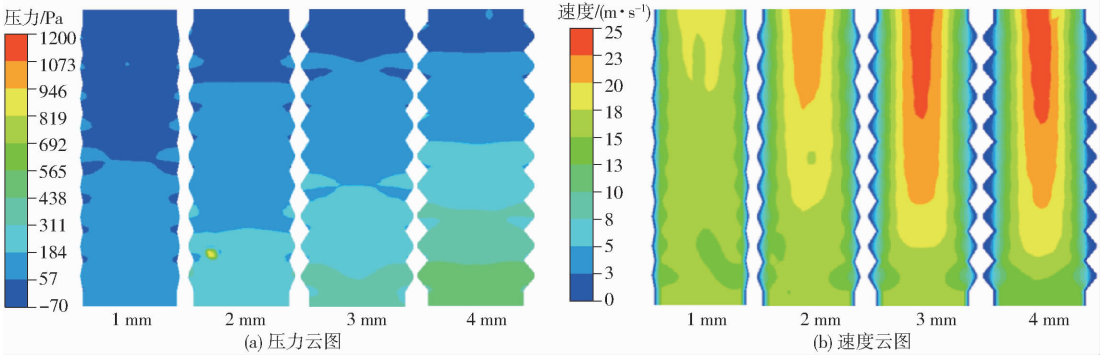


图 13 不同深度增压管内气流场云图

Fig. 13 Cloud charts of air flow field in booster tubes of different depths

种结构参数不同的增压管模型,通过耦合结果对增压管出口种子质量进行统计,用变异系数来评价增压管的排种均匀性。结果表明,当增压管直径为 30 mm、长度为 100 mm、宽度为 10 mm、深度为 2 mm 时,增压管排种均匀性较好,其出口种子质量变异系数为 17.32%。增压管直径、长度、宽度以及深度均对管内气流压力影响较大,直径与长度对增压管内气流速度影响较小,宽度与增压管内气流场速度呈负相关,深度与增压管内气流场速度呈正相关。

3 台架试验

为了验证通过耦合得到的较优增压管模型,用三维绘图软件绘制台架试验所需模型,之后使用 3D 打印机加工出实物,安装在台架上,通过增压管出口种子质量的变异系数与种子在增压管内的运动状态来判断增压管排种均匀性的效果。三维模型与台架试验如图 14 所示。

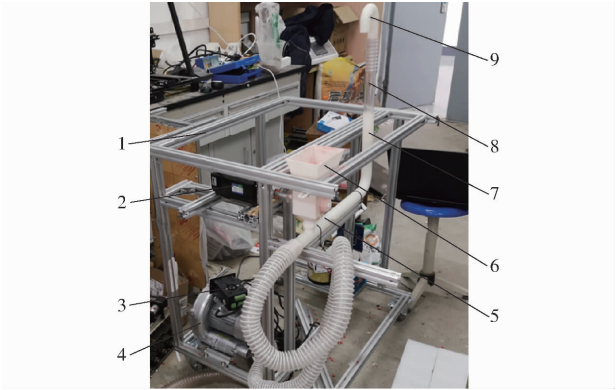


图 14 台架试验模型

Fig. 14 Bench test model

1. 台架 2. 驱动电机 3. 变频器 4. 风机 5. 文丘里管 6. 种箱 7. 过渡输种管 8. 增压管 9. 收集管

3.1 试验材料与方法

本次试验用种子材料为苏州青,其千粒质量为 4.44 g,悬浮速度与种子直径有关,在 6.0 ~ 7.5 m/s。增压管模型选择透明光敏树脂材料可以很好地观察

到种子在增压管内的运动状态。驱动电机选择 86 全闭环高速步进伺服电机 86HSE12N,该电机具有平滑和高速响应等优点,比较适合此试验。风机选用 XGB-370 型高压漩涡风机,将其与变频器相互连接后可实现对风速的调控。试验过程中供种轮转速为 0.5 r/s,气流输送速度应大于种子悬浮速度,一般取悬浮速度的 1.5 ~ 2.5 倍,该试验选择 16 m/s。

为了分析增压管结构对集排器排种均匀性的影响,并且验证耦合结果的合理准确性,将对增压管出口种子质量进行统计。做 3 组试验,其中每组试验每隔 5 s 统计 1 次,统计 3 次,最后取 3 组变异系数的均值,分析增压管的排种均匀性并与耦合结果对比。

3.2 试验结果分析

3.2.1 试验模型的验证

为了验证耦合结果的合理准确性,通过采集种子在增压管分布的图像并且对图像进行二值化处理与耦合时的图像进行对比分析,结果如图 15 所示。对比分析后可发现,种子在增压管内分布比较离散均匀,由于种子运动有太多不确定因素,因此种子的分布状态与耦合时不是完全一致,但整体趋势大致相同。另外也有相关文献已经验证了耦合模型及参数的准确性,结合本次的试验结果,可以表明

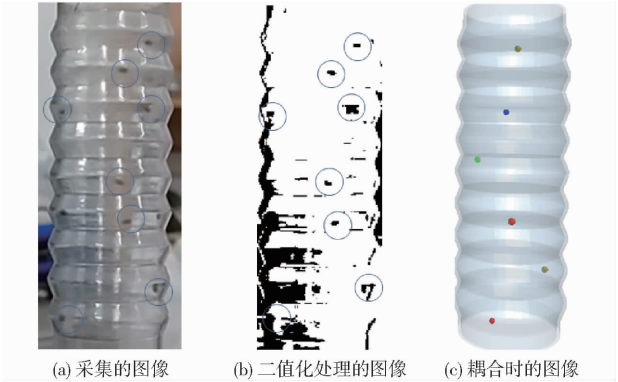


图 15 种子颗粒状态对比图

Fig. 15 Comparison diagram of seed particle states

耦合参数以及模型的选择是正确且合理的。

3.2.2 试验数据分析

对试验过程中增压管出口种子质量进行统计处理,结果如表 6 所示,结果表明 3 组试验的变异系数均值为 14.03%,而耦合结果的变异系数为 17.32%。二者的相对误差为 19.00%,造成误差的原因可能有:耦合时间较短,导致统计区间较小,数据可能存在偶然性;实际试验过程中,风速与电机的转速与耦合时不是完全匹配;由于油菜种子较小,在收集过程中会有一些种子被气流吹走,导致误差。且由于油菜种子颗粒较小,在整个过程中未发现种子破损等情况。

表 6 试验数据及处理结果

Tab.6 Test data and processing results

试验 次序	0~5 s 内种 子质量 1/g	0~5 s 内种 子质量 2/g	0~5 s 内种 子质量 3/g	平均 质量/g	变异 系数/%
1	1.836	1.553	2.134	1.841	12.89
2	1.679	1.356	1.784	1.606	11.34
3	2.332	1.845	1.507	1.895	17.87

综上所述,通过台架试验与耦合结果的对比分析,种子颗粒在增压管内的分布与耦合时虽有差异,但整体趋势一致,出口种子质量均匀的变异系数与耦合结果相对误差为 19.00%。无论是排种均匀性还是种子颗粒在增压管内的运动状态都与耦合结果相差较小,可以表明耦合模型和参数的选择都是合理准确的。

4 结论

(1)在理论分析方面,通过将种子流分为无碰撞情况、与增压管壁面碰撞情况以及种子颗粒之间互相碰撞 3 种情况,用受力分析、能量守恒、动量守恒等方法对种子进行了简单分析,得到影响种子运动的因素有较多,其中比较重要的因素是增压管的结构与输送气流速度。

(2)耦合仿真方面,运用 Fluent 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型与 EDEM 离散元气固耦合方法模拟了种子在增压管中的运动状态。通过气固两相流耦合仿真分析了气流和种子颗粒两相流在增压管中的流动特性以及增压管结构参数对种子颗粒运动特性的影响。根据耦合结果和云图选出目前较优的 V 型波纹式增压管,结合理论分析后,建立不同参数的增压管模型。耦合仿真结果表明,在气流速度为 16 m/s,增压管直径为 30 mm、长度为 100 mm、宽度为 10 mm、深度为 2 mm 时,出口种子流质量的变异系数为 17.32%,增压管的排种均匀性较好,同时也优化了增压管的结构。

(3)开展了增压管模型验证的台架试验,选取耦合仿真得到的最优增压管模型进行 3D 打印,通过对比种子颗粒在增压管内的运动情况和出口种子质量的统计,得到出口种子质量的变异系数为 14.03%,与耦合结果的相对误差为 19.00%。通过台架试验验证了耦合仿真的准确合理性。

参 考 文 献

[1] 李衍军. 小麦气流输送式排种系统关键部件研制与分析[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2021.
LI Yanjun. Development and analysis of key components of wheat airflow conveying seeding system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2021. (in Chinese)

[2] 席日晶. 小麦气送式集排器关键部件设计与仿真试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
XI Rijng. Design and simulation test of key components of wheat air transport collector[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[3] 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 experiment of 2BQ-10 airflow first stage centralized seed metering system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)

[4] 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 two phase flow in seed pipeline of oil and wheat dual use pneumatic collecting and discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57-68. (in Chinese)

[5] 秦军伟, 张晓辉, 姜忠爱, 等. 气力输送技术的发展及其在农业领域的应用[J]. 农业装备技术, 2004(3):14-15.
QIN Junwei, ZHANG Xiaohui, JIANG Zhongai, et al. The development of pneumatic conveying technology and its application in the agricultural field[J]. Agricultural Equipment Technology, 2004(3): 14-15. (in Chinese)

[6] 雷小龙, 廖宜涛, 王磊, 等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19):67-75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation and parameter optimization of gas-solid two-phase flow in the pressurized pipe of an oil wheat dual purpose pneumatic exhaust collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67-

75. (in Chinese)
- [7] 李衍军, 刘瑞, 刘春晓, 等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 54–61, 133.
LI Yanjun, LIU Rui, LIU Chunxiao, et al. Simulation measurement and experiment of the coupling of seed velocity in the seed delivery tube of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 54–61, 133. (in Chinese)
- [8] AFANASYEV V N, CHUDNOVSKY Y P, LEONTIEV A I, et al. Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, 7(1): 1–8.
- [9] MOHAMMAD A E, ALI R, DANESH K T. Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement in compact heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(11): 2950–2966.
- [10] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98–109.
- [11] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM–CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43–51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of an internal inflatable blow seeding device based on EDEM–CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43–51. (in Chinese)
- [12] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM–CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 92–100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of seed supply uniformity in a venturi seed tube based on DEM–CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.1): 92–100. (in Chinese)
- [13] 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]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 55–64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Mechanism analysis of the influence of the length of the seed delivery tube on the airflow distribution inside the tube of an air seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55–64. (in Chinese)
- [14] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 36–42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of a pneumatic rice seed sorter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36–42. (in Chinese)
- [15] 孙齐磊. 气流—阶集排式播种机的研制与试验分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
SUN Qilei. Development and experimental analysis of an air flow first stage centralized seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [16] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 1–10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and testing of pneumatic centralized fertilizer discharge system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1–10. (in Chinese)
- [17] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 16–26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Optimization and experiment of the parameters of the pneumatic direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16–26. (in Chinese)
- [18] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10–18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaocong, et al. Design and testing of a seed supply device for oil and wheat dual purpose pneumatic collector[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)
- [19] 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 testing of hybrid components for oil and wheat dual purpose pneumatic collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68–79, 97. (in Chinese)
- [20] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 43–53.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and testing of an oil wheat dual purpose pneumatic exhaust distributor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43–53. (in Chinese)
- [21] NAVEED I, CORNELIA R. Coupling of discrete element model (DEM) with computational fluid mechanics (CFD): a validation study[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 277: 154–163.

corn seed feeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):47-56. (in Chinese)

[18] JB/T 9783—2013 播种机 外槽轮排种器[S]. 2013.

[19] 韩丹丹. 内充气吹式玉米精量排种器仿真优化与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
HAN Dandan. Simulation optimization and experimental research of internal aerated blowing precision seed discharge device for corn[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[20] 闫青. 电控排种系统设计与试验研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
YAN Qing. Design and experimental research of electronic control seeding system[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2020. (in Chinese)

[21] 刘振威. 印刷与包装设备 PLC 控制共性模块化软件研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
LIU Zhenwei. Research on PLC control common modular software for printing and packaging equipment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)

[22] 韦尔密. 单片机在智能电子设备中的应用研究[J]. 科学大众, 2020(3):139.
WEI Ermi. Research on the application of single chip microcomputer in intelligent electronic equipment[J]. Science Popular, 2020(3):139. (in Chinese)

[23] 蓝土庆, 郑光熙. 基于单片机的激光投影图像抑噪控制系统[J]. 激光杂志, 2020, 41(9):196-200.
LAN Tuqing, ZHENG Guangxi. Laser projection image noise suppression control system based on single chip computer[J]. Laser Journal, 2019, 41(9):196-200. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 56 页)

[22] 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]. 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 a centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81-89. (in Chinese)

[23] YANG Shiliang, LUO Kun, ZHANG Ke, 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.

[24] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingqi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131:29-39.

[25] GAO Xiaojun, XIE Guanfu, XU Yang, et al. Application of a staggered symmetrical spiral groove wheel on a quantitative feeding device and investigation of particle motion characteristics based on DEM[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117650.

[26] 张鹤, 刘马林, 黄志勇, 等. 大颗粒与壁面碰撞的离散单元法模拟与分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(12):2212-2217.  
ZHANG He, LIU Malin, HUANG Zhiyong, et al. Simulation and analysis of large particle wall collision using discrete element method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2212-2217. (in Chinese)