

油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验

王磊^{1,2} 廖宜涛^{1,2} 万星宇^{1,2} 肖文立^{1,2} 王宝山^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对宽幅、高速播种作业中缺少与播种机相匹配、油菜及小麦兼用、稳定排种的气送式集排器分配装置的生产实际问题,设计了一种可实现24行排种的穹顶状分配装置。阐述了穹顶状分配装置的工作原理,确定了分配装置穹顶状曲面方程及关键参数间的关系,分析了输送气流及分配装置结构对种子速度的影响。通过二次旋转正交组合试验,应用DEM-CFD气固耦合仿真,分析了穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度对分配装置各行排量一致性的影响,结果表明:当穹顶状上弧板所处球体半径为245 mm、导流隔板长度为20 mm、导种口高度为20.5 mm时,油菜及小麦种子各行排量一致性较优;在较优参数组合下,穹顶状分配装置内可有效实现种子与输送气流的二次混合,油菜、小麦种子各行排量一致性变异系数分别为4.96%、3.82%。利用智能种植机械测试平台进行了较优参数组合下穹顶状分配装置排种性能验证试验,结果表明:气送式集排器供种装置转速为20~50 r/min时,油菜各行排量一致性变异系数低于5%、单行排量稳定性变异系数低于5.3%,小麦各行排量一致性变异系数低于3.9%、单行排量稳定性变异系数低于4.9%,破损率均不高于0.05%,满足油菜及小麦排种性能要求。

关键词: 油麦兼用宽幅播种机; 气送式集排器; 分配装置; DEM-CFD; 穹顶

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0043-11 OSID: 

Design and Test on Distributor Device of Air-assisted Centralized Metering Device for Rapeseed and Wheat

WANG Lei^{1,2} LIAO Yitao^{1,2} WAN Xingyu^{1,2} XIAO Wenli^{1,2} WANG Baoshan^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problem that in the broad width and high speed planting operation, there is a lack of distributor device of air-assisted centralized metering device which can match the planter to realize the stable seeding for rapeseed and wheat, a prototype of dome shaped distributor device that could achieve 24 rows seeding was developed. The working principle of the dome shaped distributor device was elaborated. The equation of the dome shaped surface of the distributor device and the relationship among the key parameters were determined. The influence of the conveying airflow and the structure of the distributor device on the seed delivery velocity were analyzed. The influence of the sphere radius of dome shaped upper arc plate, length of diversion baffle, and height of guiding seed outlet was tested with the quadratic rotation orthogonal combination experiment by DEM-CFD gas and solid coupling simulation. The experiment results indicated that when the sphere radius of dome shaped upper arc plate was 245 mm, the length of diversion baffle was 20 mm, and the height of guiding seed outlet was 20.5 mm, the uniformity variation coefficient of seeding quality was better. Under the optimal parameters combination, the secondary mixing of seeds and conveying airflow could be realized effectively in the dome shaped distributor device, and the uniformity variation coefficient of seeding quality of rapeseed and wheat was 4.96% and 3.82%, respectively. The intelligent test platform for planting machines was used to carry out the seeding performance verification test of dome shaped distributor device under the better parameter combination. The bench test results showed that when the rotating speed of seed feeding device

收稿日期: 2020-07-08 修回日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229)、国家油菜产业体系专项(CARS-12)和湖北省科技厅农业科技创新行动项目

作者简介: 王磊(1988—),男,博士生,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail: wangchong12356@126.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

of air-assisted centralized metering device was 20 ~ 50 r/min, the uniformity variation coefficient of seeding quality of the rapeseed was less than 5%, the variation coefficient of single row seeding stability of rapeseed was lower than 5.3%, the uniformity variation coefficient of seeding quality of the wheat was less than 3.9%, the variation coefficient of single row seeding stability of wheat was lower than 4.9%, and the damage rate was no higher than 0.05%, which met the performance requirements of rapeseed and wheat seeding.

Key words: broad width planter for rapeseed and wheat; air-assisted centralized metering device; distributor device; DEM - CFD; dome

0 引言

油菜和小麦是我国重要的油料和粮食作物,其机械化播种工序相似^[1-3]。开发油菜、小麦兼用的播种机对降低机械化生产的固定资产投资、提高机械化发展水平具有重要意义^[4-6]。随着农业机械化和农业规模化经营的发展,研制高速、宽幅的高效播种机成为发展趋势^[7-8],油麦兼用的宽幅高效播种机需要能够实现高速、宽幅播种的油麦兼用型排种器^[9]。气送式集排器集中供种,以气流为载体完成输种、分种、排种等过程,对种子外形尺寸要求低,且不易伤种,其作业幅宽可达3~12 m,作业效率高达6 hm²/h,在国内外已广泛使用^[10-11]。分配装置是气送式集排器实现分种与排种的核心部件,其结构形式影响宽幅播种作业中气送式集排器排种行数、不同种子兼用性、排种效率及各行排量一致性^[12-14]。

为提高油菜、小麦排种器排种性能,实现油菜及小麦兼用排种,YATSKUL等^[9]利用法国库恩公司的气送式播种机进行了气送式集排器分配装置倾斜角度、输种管长度、排种口堵塞对排种性能的影响试验;LEI等^[15]设计了一种油麦兼用型气送式集排器,采用碗式枝状分配装置来提高排种均匀性;为减少排种环节、解决机械式排种器种子易破损、堵塞等问题,邢鹤琛等^[16]设计了一种无需清种和护种装置的油麦兼用斜锥型孔轮式集排器;为实现小麦低播量精密播种,刘彩玲等^[17]设计了一种具有渐开线导条的锥面导流水平盘式小麦集排器,并应用EDEM仿真分析优化了渐开线导条结构;AHMADI等^[18]应用气吸式排种原理设计了一种油菜精量排种器,通过台架试验确定了排种器型孔尺寸、气压及排种较优的转速范围;为提高气送式集排器的排种性能,KUMAR等^[19]设计了3种不同结构形式的分配装置,进行了种子类别、种子速度、种量对排种性能的影响试验,确定为分配装置采用流线型结构时排种性能较优。现有对油菜及小麦排种器的研究主要集中在油菜及小麦兼用精量排种及排种器结构对排种性能的影响等方面,而对作业幅宽大于4 m、单体气送式集排器分配装置播种多于20行、油麦兼用排种

的分配装置研究较少。

针对宽幅、高速播种作业中缺少与播种机相匹配的油菜及小麦兼用、稳定排种的气送式集排器分配装置生产实际问题,设计一种可实现24行排种的穹顶状分配装置,分析确定分配装置穹顶状曲面方程及关键参数间的关系,应用DEM - CFD气固耦合仿真研究穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度对穹顶状分配装置各行排量一致性的影响,以期为气送式集排器分配装置的结构改进提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

气送式排种系统主要由风机、种箱、供种装置、送料装置、穹顶状分配装置、排种口、输种管等组成,其结构如图1所示。

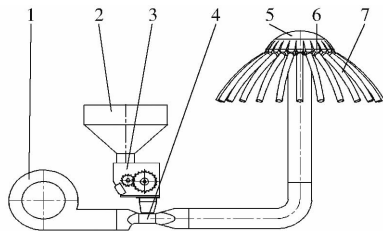


图1 气送式排种系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of air-assisted metering system

1. 风机 2. 种箱 3. 供种装置 4. 送料装置 5. 穹顶状分配装置 6. 排种口 7. 输种管

穹顶状分配装置主要由送料管、导种口、穹顶状下弧板、导流隔板、穹顶状上弧板等组成,其结构如图2所示。

1.2 工作过程及工作原理

播种作业时,种箱中的种子经供种装置进入送料装置,风机产生的输送气流在送料装置中与种子实现一次混合,气流裹挟种子经送料管进入穹顶状分配装置均匀分配成行,种子与输送气流由排种口经输种管进入播种开沟器所开的种沟内,完成播种作业。

穹顶状分配装置排种原理如图3所示,种子与输送气流两相流进入送料管中的送种区,输送气流

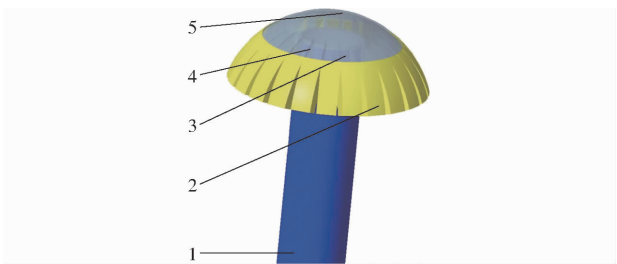


图 2 穹顶状分配装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of dome shaped distributor device
1. 送料管 2. 导种口 3. 穹顶状下弧板 4. 导流隔板 5. 穹顶状上弧板

均匀输送种子;当种子与输送气流经送料管进入由穹顶状上弧板与穹顶状下弧板形成的区域,种子与输送气流接触穹顶状上弧板后速度降低,且穹顶状上弧板截面积大于输种管截面积,穹顶状上弧板形成高压区,种子接触穹顶状上弧板后,在穹顶状上弧板与送料管间形成的二次混合区内与输送气流实现二次混合;通过输送气流的持续作用,种子经穹顶状上弧板、穹顶状下弧板及导流隔板的导流而进入导种口后由排种区排出,完成均匀排种。

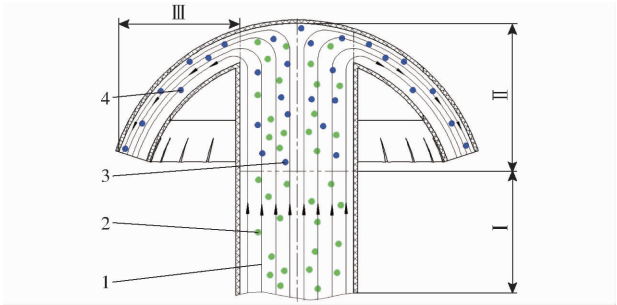


图 3 穹顶状分配装置排种原理图

Fig. 3 Seeding principle sketch of dome shaped distributor device

1. 输送气流 2. 送种区种子 3. 二次混合区种子 4. 排种区种子
I. 送种区 II. 种子与输送气流二次混合区 III. 排种区

2 穹顶状分配装置设计

2.1 送料管

油菜兼用型气送式精量免耕播种机作业效率影响气送式集排器分配装置的结构尺寸参数及排种量,气送式集排器排种量决定分配装置内种子浓度,气送式集排器排种量计算式为

$$q = \frac{vBQ}{10} \quad (1)$$

式中 q ——集排器排种量,kg/h
 v ——播种机作业速度,取 6 ~ 12 km/h
 B ——播种机作业幅宽,取 4.8 m
 Q ——播种机播量,kg/hm²

根据长江中下游及新疆地区多年田间播种试验

可知,油菜播量为 3.75 ~ 7.5 kg/hm²、小麦播量为 150 ~ 225 kg/hm²,代入式(1)可得油菜排种量为 10.8 ~ 43.2 kg/h,小麦排种量为 432 ~ 1 296 kg/h。气送式集排器排种量即为分配装置内种子流量,种子流量影响分配装置内种子浓度,送料管内种子浓度计算式为

$$m_z = \frac{q}{3\,600\pi r^2 \rho_a v_a} \quad (2)$$

式中 m_z ——送料管内种子浓度
 ρ_a ——输送气流密度,取 1.29 kg/m³
 r ——送料管半径,m
 v_a ——送料管内输送气流速度,m/s

由式(1)、(2)可知,种子浓度计算式为

$$m_z = \frac{vBQ}{36\,000\pi r^2 \rho_a v_a} \quad (3)$$

根据式(3)可知,分配装置内种子浓度与播种机的作业速度、作业幅宽、播量成正比,与输送气流密度、输送气流速度、送料管半径成反比。集排器排种量一定时,种子浓度越大,越有利于增大分配装置的输送能力,降低输送气流量及送料管的半径,但种子浓度过大,种子易滞留或堵塞送料管及导种口,且输送气流压力损失增加。

比较油菜及小麦播量可知,分配装置气流场内播种小麦比播种油菜种子浓度高,则送料管的结构应满足小麦种子输送的种子浓度要求。确定送料管为圆柱形结构以利于种子稳定输送,送料管内径是影响种子浓度的关键参数,由式(3)可得送料管内径计算式为

$$d = \left(\frac{1\,000vBQ}{9\pi \rho_a v_a m_z} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

低压气流输送方式适用于种子由送料管集中向分配装置中各导种口均匀分散输送。油菜及小麦种子采用低压气流输送方式,种子浓度应低于 10^[20],为避免种子滞留或堵塞输种管,设置种子浓度小于 3。气流输送速度应大于小麦种子的悬浮速度,小麦种子悬浮速度为 8.9 ~ 11.5 m/s,小麦种子输送气流速度为 18 ~ 30 m/s,播种机高速作业时小麦最大排种量为 1 296 kg/h,代入式(4)计算可得送料管内径应大于 80.42 mm。

综合考虑分配装置整体结构及与不锈钢直通接头螺纹连接匹配,并满足油菜及小麦种子低压气流输送方式要求,确定送料管内径为 81 mm。

根据油菜和小麦种子浓度差异,以送料管内径及小麦种子输送气流速度为依据,确定送料管所需输送气流量为

$$Q_a = \frac{9v_a \pi r^2}{2\,500} \quad (5)$$

式中 Q_a ——送料管所需输送气流流量, m^3/h

以油菜和小麦种子满足高速播种要求的输送气流速度为设计要求,送料管内油菜和小麦种子输送气流速度分别为 26、30 m/s ,分配装置所需输送气流流量为 482.32、556.52 m^3/h 。

气送式精量免耕播种机以气送式排种、排肥方式实现播种、施肥,风机产生的输送气流经过送料装置、输种管道、分配装置均会产生压强损失。根据气力输送原理,气送式排种系统气流流量增加 10% 冗余以保证足够输送气流来源,则满足分配装置高速排种油菜和小麦的输送气流流量 Q_a 分别为 530.55、612.17 m^3/h 。

为满足气送式精量免耕播种机有效排种、排肥,选用奥迪博田 Terrasem C4 Fertilizer 型风机,风机额定转速为 2 500、3 500 r/min 时,风机产生的输送气流流量分别为 2 400、2 800 m^3/h ,气送式排种、排肥系统中输送气流流量分配比为 1:3,风机可提供送料管输送油菜和小麦的气流流量分别为 600、700 m^3/h ,满足分配装置排种油菜和小麦时对输送气流流量的要求。

2.2 分配装置主体结构

穹顶状分配装置主体由导流隔板、导种口、穹顶状上弧板、穹顶状下弧板等组成,其结构如图 4 所示。

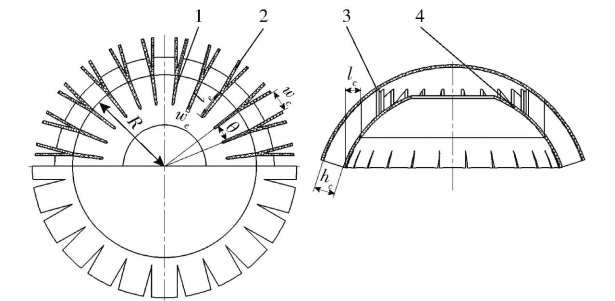


图 4 分配装置主体结构示意图

Fig. 4 Structural diagrams of distributor device main part

1. 导流隔板 2. 导种口 3. 穹顶状上弧板 4. 穹顶状下弧板

2.2.1 导种口

种子与输送气流两相流由送料管进入穹顶状上弧板与穹顶状下弧板形成的区域,由导种口排出,分配装置主体实现 24 行排种,根据低压气流输送特性,导种口内种子浓度计算式为

$$m_g = \frac{vBQ}{864\,000h_cw_cp_av_g} \tag{6}$$

式中 m_g ——导种口内种子浓度
 h_c ——导种口高度, m
 w_c ——导种口宽度, m
 v_g ——导种口内输送气流速度, m/s

由式(6)可知,导种口的宽度、高度与分配装置内种子流量、导种口内输送气流的密度、速度成反

比。导种口流域截面面积小于送料管流域截面面积,则导种口内输送气流速度高于送料管内输送气流速度。

为降低导种口对输送气流压力的影响,并提高输送气流输送种子效率及稳定性,导种口的宽度、高度应近似,结合式(6)及播种机高速作业时小麦最大排种量、排种口与输种管结构尺寸,计算导种口的宽度为 18 ~ 22 mm 、高度为 14 ~ 26 mm 。为降低种子与输送气流由分配装置主体至排种口截面的突变破坏种子稳定运移轨迹,并结合分配装置总体结构,确定导种口长度 l_c 为 15 mm 。

2.2.2 穹顶状弧面

根据导种口宽度与分配装置主体半径 R 的几何关系可得

$$R \leq \frac{w_c + w_e}{2\sin \frac{\theta}{2}} \tag{7}$$

式中 θ ——导种口对应的分配装置主体圆心角,取 15°

w_e ——导流隔板宽度, mm

基于导流隔板结构对种子及输送气流分布的影响,导流隔板宽度越大,分配装置主体内种子随机碰撞导流隔板概率越高,各行排量一致性越差。满足分配装置强度下,导流隔板宽度越小,导种口宽度越大,对种子及输送气流导流性越好。因分配装置为 3D 打印加工制成,确定导种口宽度为 20.5 mm ,导流隔板宽度为 3 mm ,代入式(7)得分配装置主体半径应小于 90.02 mm 。分配装置主体半径过小会增加分配装置主体流域种子间相互摩擦,增加压力消耗,影响进入导种口内输送气流及种子速度分布的均匀性,故确定分配装置主体半径为 90 mm 。

导流隔板长度影响种子进入导种口内的运移轨迹,根据导流隔板长度、分配装置主体半径、送料管半径关系可得

$$l_c \leq R - r \tag{8}$$

式中 l_c ——导流隔板长度, mm

导流隔板长度偏大时,会破坏由送料管进入分配装置主体内种子的有序输送,并影响分配装置内种子与输送气流二次混合效果;导流隔板长度偏小,由送料管进入导种口过程种子碰撞导流隔板时速度增大,增加了种子的无序性。综合考虑分配装置主体强度并结合式(8),计算得导流隔板长度为 5 ~ 49.5 mm 。

穹顶式结构导流性好、气流压力损失小,穹顶状上弧板与穹顶状下弧板流域形成高压区,降低流域内种子与输送气流速度,实现种子与气流的二次混

合,降低种子与穹顶状上弧板的碰撞速度。选择合适的穹顶状弧面结构可提高各行排量一致性并降低破损率,且穹顶状弧面决定分配装置主体结构。为实现种子与气流的二次混合,并提高种子分配均匀性,本文选取球体曲面方程为穹顶状上弧板的曲面形式,如图5所示。

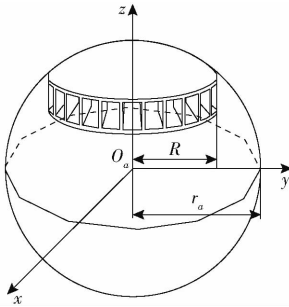


图5 穹顶状上弧板曲面图

Fig.5 Surface diagram of dome shaped upper arc plate

穹顶状分配装置上弧板曲面方程为

$$x^2 + y^2 + z^2 = r_a^2$$

$$(-90 \text{ mm} \leq x \leq 90 \text{ mm}, -90 \text{ mm} \leq y \leq 90 \text{ mm}) \quad (9)$$

式中 r_a ——穹顶状上弧板所处球体半径,mm

由式(9)可知,控制穹顶状上弧板所处球体半径,可确定穹顶状上弧板及导种口的结构。为实现穹顶状上弧板及导种口对种子和输送气流的约束及导流功能,分配装置主体半径与导种口长度之和应小于穹顶状上弧板所处球体的半径。根据导种口、分配装置主体在穹顶状上弧板所处球体内的分布关系可得

$$r_a \geq R + l_c + h_c + e \quad (10)$$

式中 e ——穹顶状上弧板厚度,取 2.5 mm

由式(10)可知,球体半径应大于 133.5 mm。当球体半径过大时,形成的穹顶状上弧板曲率过小,穹顶状上弧板接近平板,难以实现穹顶结构有效导流及对种子与气流的二次混合,并增加气压损失。综合考虑穹顶状结构对种子和输送气流作用的有效性,确定球体半径为 133.5 ~ 1 000 mm。

根据穹顶状上弧板与穹顶状下弧板的位置关系,确定穹顶状下弧板所处的球体半径为

$$r_b = r_a - h_c - e \quad (11)$$

式中 r_b ——穹顶状下弧板所处球体半径,mm

由式(11)可得穹顶状下弧板所处球体半径为 105 ~ 983.5 mm。

2.3 分配装置内种子与输送气流动力学分析

气流裹挟种子经送料管进入分配装置主体,在均匀稳定的低压气流输送中,种子受重力、管壁对种子摩擦力、种子间相互碰撞阻力、气流阻力的作用。

取送料管内种子为受力质点,受力如图6所示。建立种子受力平衡方程

$$m_s a = F_s - G - F_b - F_c \quad (12)$$

式中 m_s ——种子质量,kg

a ——种子加速度, m/s^2

F_s ——气流阻力,N

F_b ——管壁对种子的摩擦力,N

F_c ——种子间相互碰撞阻力,N

G ——种子重力,N

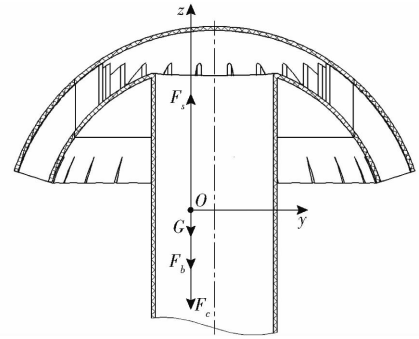


图6 种子在送料管中受力图

Fig.6 Sketch of forcing on seed in feed pipe

种子由供种装置进入送料装置时,输送气流水平输送种子,经弯管后进入送料管垂直输送。由式(12)可知,种子进入送料管时,输送气流对种子的阻力大于种子重力、管壁对种子摩擦力、种子间相互碰撞阻力的合力,种子为加速运动;随种子速度的增加,输送气流对种子的阻力与种子重力、管壁对种子摩擦力、种子间相互碰撞阻力的合力平衡,种子做匀速运动。

根据单一颗粒垂直输送运动特性,在垂直上升气流中种子速度与气流输送速度的关系为

$$m_s \frac{du}{dt} = G \left(\frac{v_a - u}{v_t} \right)^2 - G \quad (13)$$

式中 u ——种子速度, m/s

t ——种子在送料管内输送时间,s

v_t ——种子悬浮速度, m/s

式(13)表达了任意时刻送料管中垂直上升输送中种子加速及匀速输送过程中种子速度与输送气流速度、种子悬浮速度间的关系。

送料管内种子先加速后匀速运动,匀速运动时种子的速度即为送料管内种子的最大速度。当种子匀速运动时,种子速度与气流输送速度比值为最大,种子在输送气流中的运动符合牛顿法则,则种子最大速度^[21]为

$$u_m = \frac{v_a - v_t \left[1 + \frac{\lambda_s (v_a^2 - v_t^2)}{2gd} \right]^{\frac{1}{2}}}{1 - \frac{\lambda_s v_t^2}{2gd}} \quad (14)$$

式中 u_m ——种子在送料管中的最大速度, m/s
 λ_s ——种子对管壁冲击和摩擦阻力系数
 g ——重力加速度, m/s²

由式(14)可知,种子在送料管中的最大速度与种子对管壁冲击和摩擦阻力系数 λ_s 、送料管内径 d 、种子悬浮速度 v_i 、输送气流速度 v_a 有关。

根据垂直上升输送中种子加速阶段与送料管长度关系式可得送料管长度计算式为

$$l_s = \frac{v_i^2}{2g \left(1 - \frac{\lambda_s v_i^2}{2gd}\right)} \left(\ln \frac{1 - \frac{v_i^2}{v_a^2} - 2 \frac{u}{v_a} + 1 - \frac{\lambda_s v_i^2}{2gd}}{1 - \frac{v_i^2}{v_a^2}} + \frac{1}{\left[1 - \left(1 - \frac{v_i^2}{v_a^2}\right) \left(1 - \frac{\lambda_s v_i^2}{2gd}\right)\right]^{\frac{1}{2}}} \right) \ln \frac{1 - \frac{v_i^2}{v_a^2} - \frac{u}{v_a} \left\{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{v_i^2}{v_a^2}\right) \left(1 - \frac{\lambda_s v_i^2}{2gd}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\}}{1 - \frac{v_i^2}{v_a^2} - \frac{u}{v_a} \left\{1 + \left[1 - \left(1 - \frac{v_i^2}{v_a^2}\right) \left(1 - \frac{\lambda_s v_i^2}{2gd}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\}} \right) \quad (15)$$

式中 l_s ——种子加速阶段送料管长度, m/s

油菜、小麦种子对管壁冲击和摩擦阻力系数 λ_s 为0.002~0.006,代入式(15)计算得送料管加速阶段长度 l_s 应大于714.2 mm。

假分配装置内输送气流为不可压缩空气,输送气流由送料管末端稳定流动至分配装置主体接触穹顶状上弧板过程符合伯努利方程

$$p_1 + \frac{\rho_a v_a^2}{2} + \rho_a g Z_1 = p_2 + \frac{\rho_a v_2^2}{2} + \rho_a g Z_2 \quad (16)$$

式中 p_1 ——送料管内流体压力, Pa

p_2 ——分配装置主体内流体压力, Pa

v_2 ——分配装置主体内输送气流速度, m/s

Z_1 ——送料管末端中心距基准面的高度, m

Z_2 ——分配装置主体中心距基准面的高度, m

种子接触穹顶状上弧板时,输送气流速度为0,由式(16)可知

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho_a v_a^2}{2} + \rho_a g Z_1 - \frac{\rho_a v_2^2}{2} - \rho_a g Z_2 \quad (17)$$

送料管末端中心距基准面的高度与分配装置主体中心距基准面的高度接近,可忽略不计,由式(17)可知,输送气流的动能 $\frac{\rho_a v_a^2}{2}$ 转变为压力能,增加动压,使种子接触穹顶状上弧板区域形成高压区,降低种子流速度,实现种子与气流的二次混合,减少种子与穹顶状上弧板接触造成的种子破损。

分配装置气流场中种子浓度越高,种子对管壁

冲击和摩擦阻力系数越大,根据式(14)~(17)可知,种子最大速度相同时,分配装置气流场中种子浓度越高,则需输送气流速度越大,输送气流压力降低。

3 分配装置性能优化试验

为探究分配装置结构参数对各行排量一致性的影响,运用DEM-CFD软件耦合仿真分析穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度对油菜及小麦各行排量一致性的影响。

3.1 模型建立

采用EDEM 2018和ANSYS Fluent 17.0软件开展DEM-CFD气固耦合仿真,利用Workbench 17.0的四面体非结构化方法自动划分分配装置网格,油菜种子直径为2 mm,小麦种子三轴尺寸为6 mm×3 mm×3 mm,EDEM和CFD的时间步长分别设为 5×10^{-6} s和 1×10^{-3} s,输送气流为空气,密度和粘性系数分别为1.29 kg/m³和 1.7894×10^{-5} kg/(m·s),重力加速度为9.81 m/s²。送料管入口设为输送气流与种子入口,导种口设为输送气流与种子出口,仿真模型如图7所示。

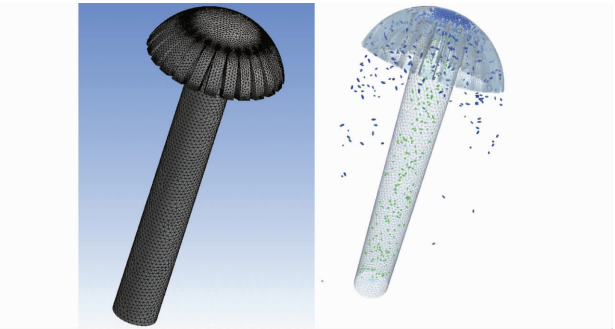


图7 分配装置仿真模型

Fig. 7 Simulation model of distributor device

3.2 试验方法

基于气流输送特性可知,输送气流速度应大于种子的悬浮速度,设置油菜及小麦种子入口输送气流速度分别为20、24 m/s^[22]。气送式集排器排种过程中,种子先为水平输送,经弯管后垂直输送,种子经弯管变换输送方向时会有压力及速度损失,结合式(12)~(17)所示垂直输送中种子速度、种子悬浮速度及气流输送速度间的关系,设置油菜及小麦种子入口速度分别为6、8 m/s^[23]。

根据分配装置内油菜及小麦种子流量,确定送料管入口每秒生成油菜及小麦种子分别为1 000、3 000粒,送料口生成油菜和小麦种子时间为8 s,试验总仿真时长为10 s,统计导种口的排种粒数,以导种口排种量表征分配装置参数变化对各行排量一致性的影响。

各行排量一致性变异系数计算式为

$$V_n = \frac{S_n}{X_n} \times 100\%$$
 (18)

式中 S_n ——导种口排量标准差,g
 X_n ——导种口排量平均值,g
 V_n ——各行排量一致性变异系数, %

3.3 二次旋转正交组合试验

通过对穹顶状分配装置的设计与参数分析,并结合式(14)~(17)可知,穹顶状上弧板所处球体半径影响种子与输送气流的速度、二次混合效果及高压区范围;导流隔板长度影响分配装置主体内种子对管壁冲击和摩擦阻力系数、种子速度及迁移轨迹;导种口高度影响导种口内的气流场分布、种子及输送气流速度,进而影响穹顶状分配装置的各行排量一致性。以穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度为影响各行排量一致性的主要因素。采用响应曲面法开展二次旋转正交组合试验,每组试验重复5次,确定分配装置最佳参数组合,试验因素编码如表1所示,试验方案与结果如表2所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

3.4 试验结果回归分析

采用 Design-Expert 11.0 软件对回归方程进行多元回归拟合,对试验结果进行回归分析,可得油菜各行排量一致性变异系数 Y_1 、小麦各行排量一致性变异系数 Y_2 的回归方程,回归方程的显著性检验如表3所示。

3.4.1 油菜各行排量一致性变异系数

对试验数据进行多元回归拟合,各因素对油菜各行排量一致性变异系数 Y_1 的回归模型为

表 1 试验因素编码

Tab.1 Factors code			
编码	因素		
	球体半径	导流隔板长度	导种口高度
	r_a/mm	l_c/mm	h_c/mm
-1.682	133.50	5.00	14.00
-1	309.14	14.02	16.43
0	566.75	27.25	20.00
1	824.36	40.48	23.57
1.682	1 000.00	49.50	26.00

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test scheme and results					
试验 序号	因素			油菜各行排 量一致性变 异系数 $Y_1/\%$	小麦各行排 量一致性变 异系数 $Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	6.71	7.97
2	1	-1	-1	13.94	15.02
3	-1	1	-1	11.15	12.25
4	1	1	-1	16.90	17.08
5	-1	-1	1	7.19	5.52
6	1	-1	1	13.34	11.85
7	-1	1	1	11.76	11.92
8	1	1	1	16.67	17.10
9	-1.682	0	0	5.65	4.85
10	1.682	0	0	15.73	14.68
11	0	-1.682	0	10.65	8.35
12	0	1.682	0	16.80	16.24
13	0	0	-1.682	11.40	15.35
14	0	0	1.682	11.48	12.55
15	0	0	0	7.02	6.30
16	0	0	0	6.98	6.33
17	0	0	0	7.02	6.22
18	0	0	0	7.06	6.02
19	0	0	0	7.02	6.26
20	0	0	0	7.15	6.14

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	油菜各行排量一致性变异系数					小麦各行排量一致性变异系数				
	方差和	自由度	均方差	F	P	方差和	自由度	均方差	F	P
模型	290.21	9	32.25	5 968.33	<0.001	370.02	9	41.11	1 529.94	<0.001
X_1	123.04	1	123.04	22 774.13	<0.001	116.70	1	116.70	4 342.82	<0.001
X_2	48.15	1	48.15	8 911.94	<0.001	71.55	1	71.55	2 662.60	<0.001
X_3	0.011 4	1	0.011 4	2.11	0.177 0	8.29	1	8.29	308.43	<0.001
X_1X_2	0.924 8	1	0.924 8	171.17	<0.001	1.42	1	1.42	52.83	<0.001
X_1X_3	0.460 8	1	0.460 8	85.29	<0.001	0.017 1	1	0.0171	0.636 8	0.443 4
X_2X_3	0.031 3	1	0.031 3	5.78	0.0370	3.52	1	3.52	131.16	<0.001
X_1^2	23.65	1	23.65	4 377.20	<0.001	22.62	1	22.62	841.90	<0.001
X_2^2	79.86	1	79.86	14 781.50	<0.001	66.46	1	66.46	2 473.07	<0.001
X_3^2	34.45	1	34.45	6 376.87	<0.001	107.61	1	107.61	4 004.41	<0.001
残差	0.054 0	10	0.005 4			0.268 7	10	0.026 9		
失拟项	0.036 7	5	0.007 3	2.13	0.213 7	0.202 6	5	0.040 5	3.07	0.122 1
纯误差	0.017 3	5	0.003 5			0.066 1	5	0.013 2		
总和	290.26	19				370.28	19			

$$Y_1 = 7.04 + 3X_1 + 1.88X_2 - 0.03X_3 - 0.34X_1X_2 - 0.24X_1X_3 + 0.06X_2X_3 + 1.28X_1^2 + 2.35X_2^2 + 1.55X_3^2 \quad (19)$$

由表 3 可知, X_1 、 X_2^2 、 X_2 、 X_3^2 、 X_1^2 、 X_1X_2 、 X_1X_3 对油菜各行排量一致性变异系数 Y_1 影响极显著 ($P < 0.01$), X_2X_3 对 Y_1 影响显著 ($P < 0.05$)。对回归方程进行失拟检验, P 为 0.213 7, 不显著, 表明不存在其他影响指标的主要因素存在。将不显著的交互作用项的自由度及回归方程和并入残差项后油菜各行排量一致性变异系数 Y_1 的回归模型为

$$Y_1 = 7.04 + 3X_1 + 1.88X_2 - 0.34X_1X_2 - 0.24X_1X_3 + 0.06X_2X_3 + 1.28X_1^2 + 2.35X_2^2 + 1.55X_3^2 \quad (20)$$

由式(20)可知, 各因素对油菜各行排量一致性变异系数影响的主次顺序为穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度。

3.4.2 小麦各行排量一致性变异系数

对试验数据进行多元回归拟合, 各因素对小麦各行排量一致性变异系数 Y_2 的回归模型为

$$Y_2 = 6.21 + 2.92X_1 + 2.29X_2 - 0.78X_3 - 0.42X_1X_2 + 0.05X_1X_3 + 0.66X_2X_3 + 1.25X_1^2 + 2.15X_2^2 + 2.73X_3^2 \quad (21)$$

由表 3 可知, X_1 、 X_3^2 、 X_2 、 X_2^2 、 X_1^2 、 X_2 、 X_1X_2 、 X_2X_3 对小麦各行排量一致性变异系数 Y_2 影响极显著 ($P < 0.01$)。对回归方程进行失拟检验, P 为 0.122 1, 不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素存在。将不显著的交互作用项的自由度及回归方程和并入残差项后小麦各行排量一致性变异系数 Y_2 的回归模型为

$$Y_2 = 6.21 + 2.92X_1 + 2.29X_2 - 0.78X_3 - 0.42X_1X_2 + 0.66X_2X_3 + 1.25X_1^2 + 2.15X_2^2 + 2.73X_3^2 \quad (22)$$

由式(22)可知, 各因素对小麦各行排量一致性变异系数影响的主次顺序为穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度。

3.5 参数优化与分析

基于理论分析与试验数据结果可知, 穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度对油菜及小麦各行排量一致性变异系数均有显著影响, 其中穹顶状上弧板所处球体半径对各行排量一致性影响最显著。以各行排量一致性变异系数最低为目标, 通过 Design-Expert 11.0 软件求解, 穹顶状上弧板所处球体半径为 244.74 mm、导流隔板长度为 19.69 mm、导种口高度为 20.34 mm。

综合考虑分配装置实际 3D 打印精度, 以导流隔板长度为 20 mm、导种口高度为 20.5 mm, 应用 EDM-CFD 耦合仿真对比分析穹顶状上弧板所处

球体半径分别为 133.5 (二次旋转正交组合上星号臂值)、245 (回归模型最优解)、566.75 (二次旋转正交组合零水平)、1 000 mm (二次旋转正交组合下星号臂值) 对种子和输送气流的影响。油菜及小麦种子在穹顶状分配装置内的运移规律基本相同, 以油菜种子为例, 穹顶状分配装置内种子流线和输送气流压力分布如图 8 所示。

图 8a 中, 绿色流线为油菜种子由送料管进入分配装置主体内的种子运动轨迹, 蓝色流线为油菜种子接触穹顶状上弧板后二次进入送料管内的运动轨迹。根据式(18)计算穹顶状上弧板所处球体半径分别为 133.5、245、566.75、1 000 mm 时, 油菜各行排量一致性变异系数分别为 5.98%、4.96%、6.75%、15.11%, 均可实现种子与输送气流的二次混合; 穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm 时, 种子的二次混合效果优于球体半径为 133.5、566.75、1 000 mm 时。图 8b 中, 穹顶状上弧板区域输送气流速度高于穹顶状下弧板区域, 种子及输送气流主要经穹顶状上弧板区域排出; 少数种子经穹顶状下弧板区域排出, 该区域输送气流速度较低, 故增加穹顶状下弧板弧度, 有利于增加经穹顶状下弧板区域排出种子的速度, 保证种子顺利进入输种管, 穹顶状上弧板所处球体半径为 133.5 mm 和 245 mm 时, 有利于提高各行排量一致性。图 8b、8c 中, 穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm 时, 输送气流的最大速度、压力梯度及最大压力均大于球体半径为 133.5、566.75、1 000 mm 时, 结合式(14)~(17)可知, 穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm 时, 穹顶状分配装置的压力及速度损失低于穹顶状上弧板所处球体半径为 133.5、566.75、1 000 mm 时。基于提高穹顶状分配装置各行排量一致性及满足宽幅播种作业时输种管内种子长距离输送, 需提高种子与输送气流二次混合效果, 保证种子经导种口顺利排出, 且导种口内输送气流速度高于种子悬浮速度, 结合图 8 可知, 导流隔板长度及导种口高度相同时, 穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm 时各行排量一致性优于穹顶状上弧板所处球体半径为 133.5、566.75、1 000 mm 时。

为验证回归模型的合理性, 以穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm、导流隔板长度为 20 mm、导种口高度为 20.5 mm, 开展油菜及小麦排种性能仿真试验。试验结果表明: 穹顶状分配装置内无油菜及小麦种子滞留及堵塞导种口现象; 油菜各行排量一致性变异系数为 4.96%, 小麦各行排量一致性变异系数为 3.82%, 油菜及小麦种子分布如图 9 所示。

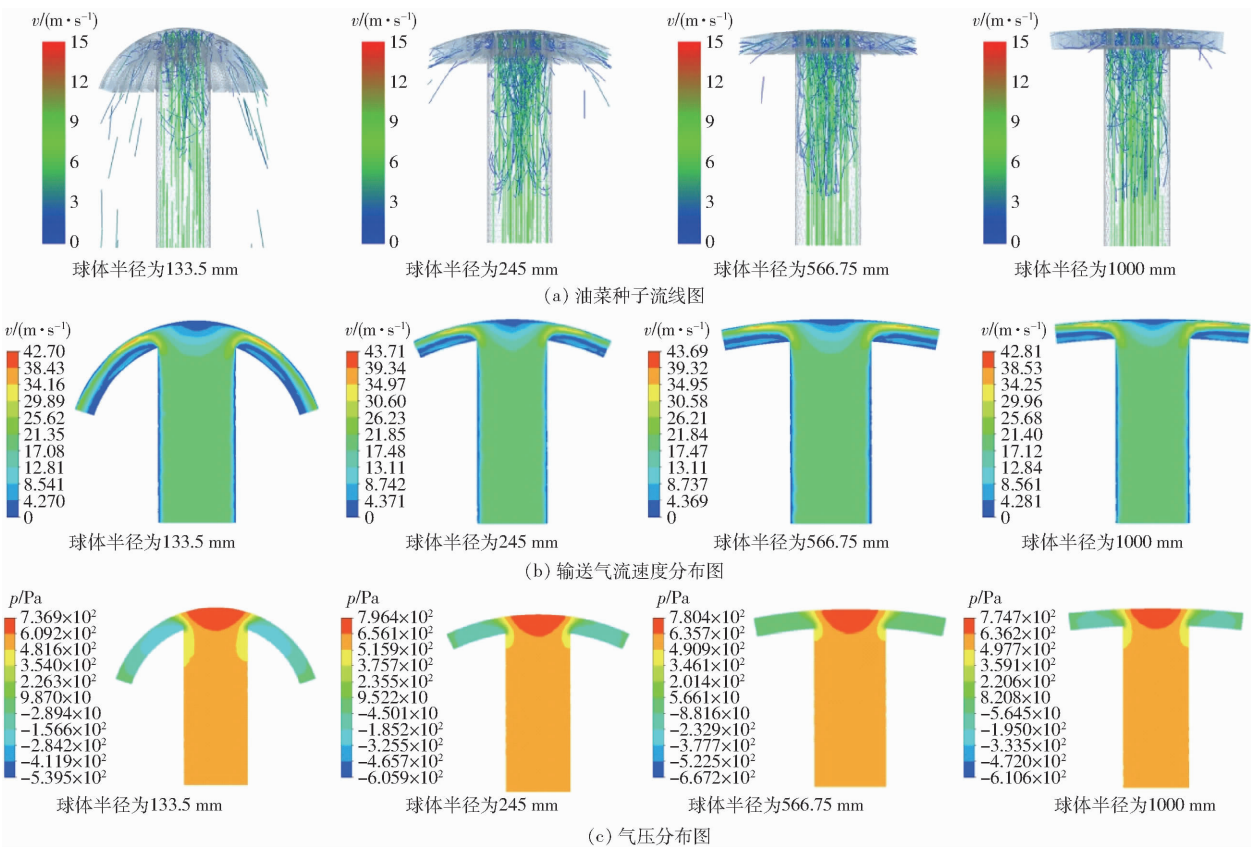


图 8 穹顶状分配装置内种子流线和输送气流压力分布图

Fig. 8 Diagrams of seed streamline and conveying airflow pressure distribution in dome shaped distributor device

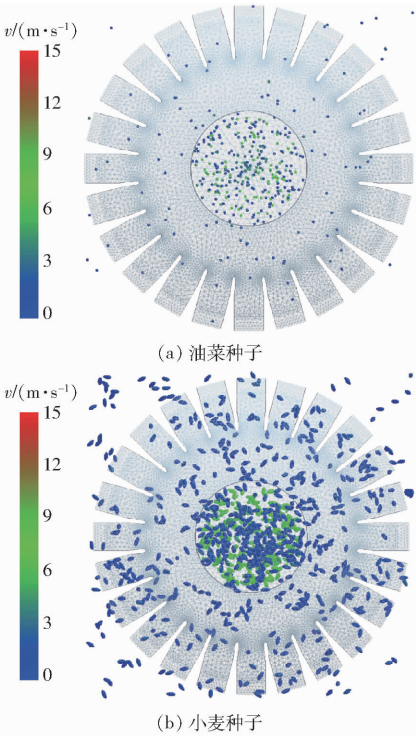


图 9 油菜及小麦种子分布图

Fig. 9 Distribution diagrams of rapeseed and wheat seed

4 验证试验

为验证仿真结果的合理性,以及风机采用不同额定转速时穹顶状分配装置对排种油菜和小麦种子

不同排量的适应性,将气送式集排器安装于油麦兼用型气送式精量免耕播种机,利用智能种植机械测试平台开展较优参数组合下 3D 打印穹顶状分配装置对气送式集排器各行排量一致性影响试验,试验装置如图 10 所示。该平台通过液压系统驱动风机及供种装置传动轴转动,以满足油菜及小麦排种过程中对输送气流速度、压力及种子流量需求。



图 10 智能种植机械测试平台

Fig. 10 Intelligent test platform for planting machines

1. 智能种植机械测试平台 2. 气送式集排器 3. 穹顶状分配装置

试验选取油菜品种为华油杂 62,千粒质量为 4.67 g;小麦品种为郑麦 9023,千粒质量为 44.87 g。为满足分配装置内油菜及小麦种子流量要求,设置供种装置转速为 20 ~ 50 r/min^[24],每间隔 10 r/min 为一个水平,供种装置传动轴分别安装 4 个和 6 个交错排布型孔轮开展试验,试验重复 10 次。设置排种油菜和小麦时风机不同的额定转速,排种油菜、小麦时风机转速分别为 2 500、3 500 r/min。统计油菜及小麦种

子 30 s 内的质量、破损率、各行排量一致性变异系数、单行排量稳定性变异系数,试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,转速为 20 ~ 50 r/min 时,油菜各行排量一致性变异系数均低于 5%、单行排量稳定性变异系数低于 5.3%,小麦各行排量一致性变异系数均低于 3.9%、单行排量稳定性变异系数低于 4.9%,破损率均不高于 0.05%,满足 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》和 JB/T 6274.1—2001

《谷物播种机技术条件》对油菜及小麦排种性能的要求;供种装置安装 4 个和 6 个型孔轮时,分配装置排种油菜和小麦各行排量可满足播种机作业速度为 6 ~ 12 km/h 的播量要求,且在风机额定转速内可实现不同排量的油菜和小麦排种,表明设计的穹顶状分配装置可用于粒径、播量差异较大的油菜及小麦排种,可满足气送式集排器适应于油麦兼用型气送式精量免耕播种机高速、宽幅播种需求。

表 4 分配装置排种性能试验结果
Tab.4 Seeding performance test results of distributor device

类别	转速/ (r·min ⁻¹)	4 个型孔轮时 各行平均 排量/g	6 个型孔轮 时各行平 均排量/g	4 个型孔轮各行 排量一致性 变异系数/%	6 个型孔轮各行 排量一致性 变异系数/%	4 个型孔轮单行 排量稳定性 变异系数/%	6 个型孔轮单行 排量稳定性 变异系数/%	平均破 损率/%
油菜	20	3.77	5.76	4.75	4.68	5.14	5.18	0.02
	30	5.89	8.68	4.89	4.83	5.25	5.15	0.02
	40	7.85	11.92	4.93	4.78	5.08	5.21	0.03
	50	10.13	15.63	4.85	4.92	5.12	5.05	0.04
小麦	20	127.71	191.62	3.78	3.83	4.76	4.73	0.01
	30	198.93	298.07	3.85	3.76	4.73	4.62	0.03
	40	265.44	398.18	3.63	3.84	4.81	4.85	0.03
	50	342.32	512.99	3.79	3.68	4.67	4.76	0.05

5 结 论

(1)设计了一种可实现 24 行排种的穹顶状分配装置,确定了穹顶状分配装置上弧板及下弧板为球体曲面;导流隔板长度、导种口高度相同,穹顶状上弧板所处球体半径为 245 mm 时,穹顶状分配装置内种子与输送气流的二次混合效果、输送气流速度及气压分布总体优于穹顶状上弧板所处球体半径为 133.5、566.75、1 000 mm 时的效果。

(2)应用 DEM - CFD 气固耦合仿真,通过二次旋转正交组合试验建立穹顶状上弧板所处球体半径、导流隔板长度、导种口高度与油菜及小麦各行排量一致性变异系数的二次回归方程。仿真试验表明:穹顶状上弧板所处球体半径对各行排量一致性

影响最显著;各行排量一致性较优参数组合为:穹顶状上弧板所处球体半径 245 mm、导流隔板长度 20 mm、导种口高度 20.5 mm;较优参数组合下的油菜各行排量一致性变异系数为 4.96%,小麦各行排量一致性变异系数为 3.82%,穹顶状分配装置内可有效实现种子与输送气流的二次混合。

(3)利用智能种植机械测试平台,分析了较优参数组合下穹顶状分配装置对气送式集排器各行排量一致性的影响,台架试验表明:转速为 20 ~ 50 r/min 时,油菜各行排量一致性变异系数低于 5%、单行排量稳定性变异系数低于 5.3%,小麦各行排量一致性变异系数低于 3.9%、单行排量稳定性变异系数低于 4.9%,破损率均不高于 0.05%,满足油菜及小麦排种性能要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46 - 52.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):46 - 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008. (in Chinese)

[3] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):63 - 73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter

- for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.007. (in Chinese)
- [4] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):1–16. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170901&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [5] 朱惠斌,李洪文,何进,等.稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):39–44. ZHU Huibin, LI Hongwen, HE Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axel drive anti-blocking in rice stubble field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 39–44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.005. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 恽竹恬,黄凰.基于聚类分析的农机购置补贴区域分类[J].农业工程学报,2010,26(增刊):253–258. YUN Zhutian, HUANG Huang. Regional classification of subsidy for purchasing agricultural machinery based on cluster analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.): 253–258. (in Chinese)
- [8] 王文信,徐云,王正大.农机购置补贴对农户购机行为的影响[J/OL].农业机械学报,2020,51(5):151–155. WANG Wenxin, XU Yun, WANG Zhengda. Influence of agricultural machinery purchase subsidies on farmers' purchase behavior[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 151–155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200516&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.016. (in Chinese)
- [9] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9):120–134.
- [10] 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)
- [11] KEEP T, NOBLE S D. Optical flow profiling method for visualization and evaluation of flow disturbances in agricultural pneumatic conveyance systems[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 118(9): 159–166.
- [12] 王磊,席日晶,廖宜涛,等.地表坡度对油菜宽幅精量免耕播种机排种性能的影响[J].农业工程学报,2020,36(7):11–21. WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Effects of land slope on seeding performance of a broad width precision no-tillage planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 11–21. (in Chinese)
- [13] 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 rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36–42. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150(6): 98–109.
- [16] 邢鹤琛,廖庆喜,王磊,等.油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验[J].华中农业大学学报,2019,38(5):143–151. XING Hechen, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 143–151. (in Chinese)
- [17] 刘彩玲,都鑫,张福印,等.锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):56–65. LIU Cailing, DU Xin, ZHANG Fuyin, et al. Design and test of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 56–65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.007. (in Chinese)
- [18] AHMADI E, GHASSEMZADEH H R, MOGHADDAM M, et al. Development of a precision seed drill for oilseed rape[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2008, 32(5):451–458.
- [19] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1):81–95.
- [20] 黄标.气力输送[M].上海:上海科学技术出版社,1984.
- [21] 李诗久.气力输送理论与应用[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [22] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 131(12): 29–39.
- [23] 雷小龙.油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[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)
- [24] 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 Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)