

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.005

基于 Bezier 曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验

姚 露^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 沈文惠^{1,2} 王 磊^{1,2} 李蒙良^{1,2} 胡乔磊^{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: 针对现有油菜机械离心式集排器分种机构种子流分配不均导致各行排量一致性较低的问题,设计了一种基于 Bezier 曲线模型的旋转盘式精量集排器。阐述了集排器的工作原理,利用 Bezier 曲线切矢性及无曲率突变特性构建了其分种装置导叶曲线参数方程,建立种子在旋转盘上的力学模型,确定了影响分种性能的关键结构参数及范围。运用 EDEM 离散元仿真软件开展了导叶各结构参数对各行排量一致性变异系数影响的二次正交组合试验,结果表明:影响各行排量一致性变异系数的因素主次顺序为导叶入口角、导叶出口角、导叶叶片数及导叶包角,且较优参数组合为导叶入口角 36°、出口角 26°、包角 55°、叶片数 8。基于较优参数组合开展集排器在不同转速下的排种性能台架验证试验,结果表明:集排器可根据播量需求适应不同转速范围,当转速为 60~100 r/min 时,油菜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 4.6%、破损率低于 0.5%。田间试验表明,机组作业速度为 4.15 km/h 时,油菜各行植株分布一致性变异系数低于 14%,满足油菜播种要求。

关键词: 油菜; 精量集排器; 旋转盘; Bezier 曲线; 导叶构型

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0056-11 OSID: 

Design and Experiment of Spinning Disc Precision Centralized Metering Device for Rapeseed Based on Bezier Curve

YAO Lu^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} SHEN Wenhui^{1,2} WANG Lei^{1,2} LI Mengliang^{1,2} HU Qiaolei^{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 facts that the uniformity of seeding distribution in the existing mechanical centrifugal centralized metering device for rapeseed which led to the lower apiece row consistency, a spinning disc precision centralized metering device for rapeseed based on Bezier curve was developed. The working principle of the distributor device was elaborated. The parameter equation of the guide vane curve of the spinning disc was constructed by using Bezier curve's tangential vector property and the characteristic of no curvature mutation. The dynamic and kinematic models of seed particles were established, and the key structural parameters and ranges affecting the seed performance were determined. The EDEM discrete element simulation software was used to carry out the quadratic orthogonal combination test in order to establish a mathematical model between the performance of the apiece row consistency variation coefficient and guide vane's inlet angle, the outlet angle, the wrap angle and the quantity. The results showed that the sequence of factors affecting the apiece row consistency variation coefficient were vane's inlet angle, the outlet angle, the quantity and the wrap angle. The optimal parameter combination was established when the guide vane's inlet angle was 36°, the outlet angle was 26°, the wrap angle was 55° and the number was 8. Based on the optimal parameter combination, the bench verification test results of the metering performance at different rotational speeds showed that the metering device could adapt to different rotational speeds according to the sowing demand, and when the rotational speed was 60~100 r/min, the apiece row consistency variation coefficient was less than 3.9%, the single row stability variation coefficient was less than 4.6%, and the

收稿日期: 2022-03-31 修回日期: 2022-05-09
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875229)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系专项(CARS-12)
作者简介: 姚露(1993—),女,博士生,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail: yaolu1993@163.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

damage rate was less than 0.5%. The field experiment showed that when the planting speed of the seeder was 4.15 km/h, the apiece row plant distribution consistency variation coefficient of rapeseed was less than 14%. It could meet the seeding performance requirements of rapeseed.

Key words: rapeseed; precision centralized metering device; spinning disc; Bezier curve; guide vane structure

0 引言

油菜是我国国产植物油第一大油源^[1-2],2020 年机播率仅为 35.65%。长江流域作为冬油菜主产区,因其地块面积狭小分散和土壤黏重板结等特点,机械化播种水平相对偏低^[3-5],开发轻简实用的播种机可有效提高机械化播种水平。机械离心式集排器因具有结构简单等特点而被广泛运用^[6]。旋转盘分种机构作为机械离心式集排器的核心部件,其结构形式及参数影响种子分配的均匀性进而影响集排器各行排量一致性。

各行排量稳定性及一致性是影响作物长势和产量的关键因素之一^[7],为提高排种性能相关学者开展了深入研究。YATSKUL 等^[8]建立了气送式集排器结构和工作参数与各行排量一致性的数学模型,确定了分配装置参数的较优组合;LEI 等^[9]设计了一种碗式枝状分配装置用来提高油麦兼用型气送式集排器排种均匀性;MUDARISOV 等^[10]建立了气送式播种机分配系统的气固两相流参数的数学模型,保证了气流与种子的分布均匀性;HU 等^[11]运用 CFD-DEM 仿真分析了气送式集排器分配装置中油菜种子的运动特性并确定其最佳结构参数,提高了分配性能;曹秀英等^[12-13]设计了一种可用于离心式精量集排器的枝状阀式分流装置,用以提高倾斜地表工况下的排种性能;黄小毛等^[14]设计了一种可用于无人机油菜飞播装置的上凸锥筒离心式排种器,可实现条播且各行排量一致性较好;程修沛等^[15]对离心式分种器进行结构改进和参数优化,以提高小麦小区播种机的分种均匀性;王磊等^[16-19]设计了一种基于文丘里原理的混种部件,并优化了匀种涡轮及穹顶状分配装置,解决了由气流、地表坡度等导致油麦兼用气送式集排器排种性能降低的问题。综上,适用于油菜种子等表皮薄易破损的小粒径作物的机械离心式集排器分种机构较少,且无法有效约束种子流的迁移轨迹,导致分种均匀性降低,进而影响集排器各行排量一致性及破损率。

基于长江中下游地区油菜种植特点,针对现有油菜机械离心式集排器分种机构种子流分配不均导致各行排量一致性较低的问题,利用多次 Bezier 曲线基本原理建立参数化模型,设计一种“一器八

行”、采用螺旋进种条定量供种、旋转盘均匀分种的旋转盘式精量集排器,分析确定导叶曲线的参数方程及关键参数,借助 EDEM 仿真手段开展旋转盘分种性能试验,得到集排器分种装置导叶入口角、出口角、包角及叶片数的最佳参数组合及对性能参数的影响,验证仿真模型的合理性,以期为旋转盘式精量集排器结构改进提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 总体结构

2BFQ-8 型油菜旋转盘式精量联合直播机主要由主机架、排种系统、排肥系统、开畦沟系统、仿形地轮、旋耕装置等组成,如图 1 所示。排种系统主要由集排器、驱动电机、种箱、导种管及双圆盘开沟器等组成。

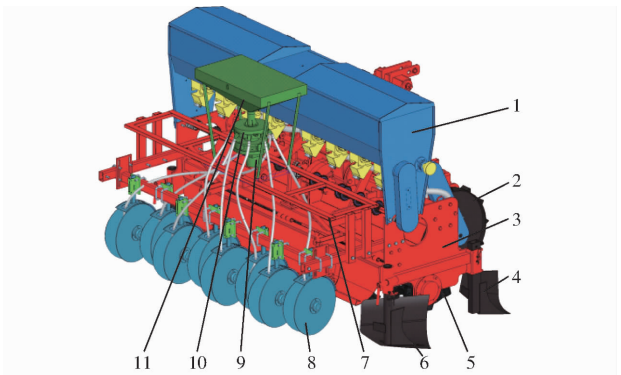


图 1 2BFQ-8 型油菜旋转盘式精量联合直播机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 2BFQ-8 rapeseed spinning disc precision direct seeder

- 1. 肥箱 2. 仿形地轮 3. 主机架 4. 开畦沟前犁 5. 旋耕装置
- 6. 开畦沟后犁 7. 副机架 8. 双圆盘开沟器 9. 驱动电机
- 10. 旋转盘式集排器 11. 种箱

1.2 集排器结构与工作原理

集排器主要由供种套筒、螺旋进种条、上盖、旋转盘、下盖、导种嘴及主轴等组成,如图 2a 所示;其中旋转盘为集排器实现均匀分种的核心部件,主要由正锥盘、导叶及凸台等组成,如图 2b 所示。

电机在蓄电池带动下通过转速调节器调节转速,带动集排装置动部件做匀速转动,基于前期对供种装置的相关研究,按照实际播种要求播量可匹配转速及供种装置结构参数的最佳组合。种群在螺旋进种条的轴向输送作用下稳定运移至旋转盘顶端,

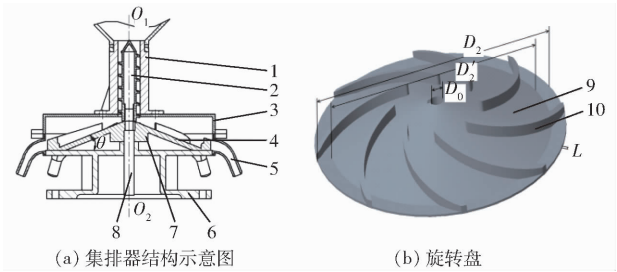


图 2 油菜旋转盘式精量集排器结构示意图
Fig. 2 Structural diagrams of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed

1. 供种套筒 2. 螺旋进种条 3. 上盖 4. 旋转盘 5. 导种嘴
6. 下盖 7. 凸台 8. 主轴 9. 正锥盘 10. 导叶

随后均匀分散至旋转盘导叶所形成的分种区,经由 8 个导种嘴排出,实现单个集排器同时播种 8 行的功能。螺旋供种装置可控制总排种量,决定总排量稳定性;旋转盘分种装置可实现对种群的均匀分配,影响各行排量一致性,种子运移路程短。

集排器工作时,主轴同步带动螺旋进种条和旋转盘匀速转动,在破拱锥的扰动作用下,种箱内的种子经由螺旋供种装置纵向向下强制输送到旋转盘锥顶,种子在离心力、摩擦力和自身重力等的共同作用下沿导叶和正锥盘锥面运移至旋转盘边缘,种群在导叶的约束作用下以一定初速度进入导种嘴并输送至种床,完成播种作业。

2 旋转盘设计与分析

2.1 正锥盘设计

正锥盘作为分种装置主载体部分,采用 ABS 工程塑料 3D 打印加工,主要由中空圆锥体斜面与绕其周向扩散的圆环带组成。锥盘坡度直接影响种群在锥面分离进入周向均布于下底座的 8 个导种嘴的效率,结合华油杂 62 种子的滑动摩擦角为 22.7° ^[20],如图 2a 所示取正锥盘锥角 $\varphi = 22^{\circ}$ 。螺旋供种装置轴向输送种群颗粒到达正锥盘顶端,正锥盘直径直接影响种子在其上的运动时间及落入导种嘴的坐标位置。若直径过大则种群在旋转盘上加速时间过长,整体动能过大会产生漂浮、弹跳等现象;若锥盘直径过小,种群还未经导叶的有效约束直接进入导种嘴,种群运动处于无序状态;结合常规离心式集排器外形尺寸设计可知,直径通常在 150 ~ 200 mm 范围内变化,则取正锥盘直径 $D_2' = 170$ mm,如图 2b 所示。绕锥盘周向扩散的环带外径取为 $D_2 = 190$ mm,厚度 $L = 2$ mm。为避免旋转盘质量过大导致由加工精度等产生的偏心问题被放大,设计旋转盘内部中空;锥盘中心孔径 $D_0 = 10$ mm,与主轴间隙配合。

2.2 导叶曲线设计

2.2.1 三次 Bezier 曲线

Bezier 曲线是通过定义一组多边折线各顶点的位置得到形状唯一的曲线,其具有切矢性,且曲线控制顶点与曲线之间位置关系明确,按照实际需求修改参数即可改变曲线形状,在实现二维曲线造型上操作较为方便,其中三次 Bezier 曲线的几何形状如图 3 所示,图中 P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 为其特征多边形的顶点。设该曲线上的点为 $P(t)$,则可知

$$P(t) = P_0B_{30}(t) + P_1B_{31}(t) + P_2B_{32}(t) + P_3B_{33}(t) =$$
$$\begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} =$$
$$(1-t)^3P_0 + 3t(1-t)^2P_1 + 3t^2(1-t)P_2 + t^3P_3$$

(1)

式中 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 ——Bezier 控制多边形的顶点
坐标

$B_{30}(t)$ 、 $B_{31}(t)$ 、 $B_{32}(t)$ 、 $B_{33}(t)$ ——三次四阶 Bezier 基函数

t ——曲线上点的横坐标值, $0 \leq t \leq 1$

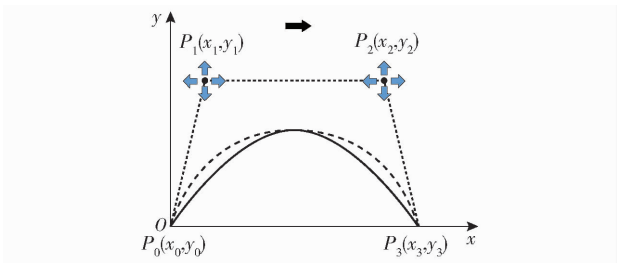


图 3 三次 Bezier 曲线示意图
Fig. 3 Diagram of cubic Bezier curve

由图 3 可知,在曲线始点处,即 $t = 0$ 时, $P(0) = P_0$,曲线与特征多边形的始边 P_0P_1 相切;在曲线终点处,即 $t = 1$ 时,有 $P(1) = P_3$,曲线与特征多边形末边 P_2P_3 相切,通过改变两个控制点 $P_1(x_1, y_1)$ 及 $P_2(x_2, y_2)$ 的坐标值来调整曲线曲率走向。根据曲线相关性质,将式(1)展开可得

$$\begin{cases} P_x(t) = x_0(1-t)^3 + 3x_1t(1-t)^2 + 3x_2t^2(1-t) + x_3t^3 \\ P_y(t) = y_0(1-t)^3 + 3y_1t(1-t)^2 + 3y_2t^2(1-t) + y_3t^3 \\ P_z(t) = 0 \end{cases}$$

(2)

2.2.2 导叶骨线构型

均匀分布于旋转盘上的导叶是提高各行排量一致性、排种效率并降低破损率的关键结构,且不同的导叶可改变种子在旋转盘上的运动时间和离开旋转

盘时转过的角度,为实现导叶曲线无曲率突变且需以最短路径将种群运移至出种口实现短程排种,开展导叶参数化设计,基于 Bezier 曲线端点处性质,采用三次 Bezier 曲线构造导叶骨线。

当转速较低时,通常有^[21]

$$r_1 = \frac{1}{3}r_2 \tag{3}$$

式中 r_1 ——导叶入口半径,mm

r_2 ——导叶出口半径,mm

由正锥盘结构设计可知,导叶出口半径即为绕锥盘周向扩散的环带半径,则计算可得 $r_1 = 32\text{ mm}$,参数定义如图 4 所示。建立平面直角坐标系,导叶骨线平面投影为 $\widehat{P_0P_3}$,做弧线在 P_0 处切线 K_1 ,则 K_1 与水平线 K_3 夹角为入口角 α_1 ;做弧线在 P_3 处切线 K_2 ,则 K_2 与外圆在 P_3 处切线 K_4 夹角为出口角 α_2 ;做直线 K_5 分别过原点与 P_3 ,则 K_5 与导叶投影起始点 P_0 所在 y 轴夹角 θ 即为导叶包角;取 P_0A 与 P_3A 的中点 P_1 与 P_2 ,则多边形 $P_0P_1P_2P_3$ 即为导叶骨线的控制多边形。

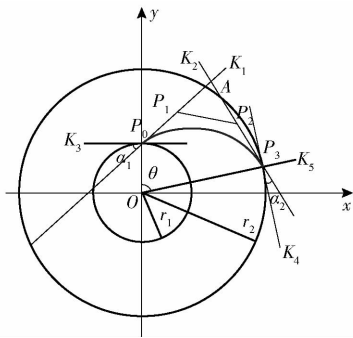


图 4 导叶骨线构型示意图

Fig. 4 Model diagram of guide vane's center line

从骨线形状可知,坐标 x_1 、 x_2 主要控制最大挠度位置,坐标 y_1 主要控制骨线正弯和负弯,绝对值表示最大挠度。通过骨线构型示意图中几何关系计算得到 4 个控制顶点的坐标值,代入式(2)可得到导叶骨线方程为

$$\begin{cases} P_x(t) = \frac{3}{2} \frac{r_1 - r_2(\sin\theta \tan(\theta - \alpha_2) + \cos\theta)}{\tan\alpha_1 + \tan(\theta - \alpha_2)} t(1-t) + \frac{1}{2} r_2 \sin\theta (t-3)t^2 \\ P_y(t) = r_1(1-t) \left(1+t - \frac{1}{2}t^2 \right) + \frac{1}{2} r_2 \cos\theta (3-t)t^2 - 3t(1-t) \left(1 - \frac{1}{2}t \right) \cdot \frac{r_1 \tan\alpha_1 - r_2(\sin\theta \tan(\theta - \alpha_2) + \cos\theta) \tan\alpha_1}{\tan\alpha_1 + \tan(\theta - \alpha_2)} \\ P_z(t) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可知, r_1 、 r_2 、 α_1 、 α_2 及 θ 分别为导叶主要的几何参数,前述结构参数设计已知 r_1 和 r_2 。 α_1 影响种子颗粒进入旋转盘的角度, α_2 主要影响种子颗粒进入导种装置的姿态进而影响集排器的排种性能参数。由图 5 可知,入口角 α_1 存在锐角($\alpha_1 < 90^\circ$)、直角($\alpha_1 = 90^\circ$)和钝角($\alpha_1 > 90^\circ$)3 种状态,为钝角时种子颗粒到达旋转盘后会有相对后移的趋势,增大无效运移路径;出口角 α_2 存在锐角($\alpha_2 < 90^\circ$)、直角($\alpha_2 = 90^\circ$)和钝角($\alpha_2 > 90^\circ$)3 种状态,为钝角时叶片呈 S 型,导叶骨线曲率突变导致种子在运移过程后半段处于自由扩散状态,导叶无法有效约束种群运移轨迹使其有效进入导种嘴。基于上述分析可得 α_1 和 α_2 取值小于 90° 即满足设计要求,又因 α_1 和 α_2 实际参数匹配时部分参数组合取值导致 Bezier 曲线性质失效,综合考虑确定 α_1 和 α_2 的取值范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 和 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。

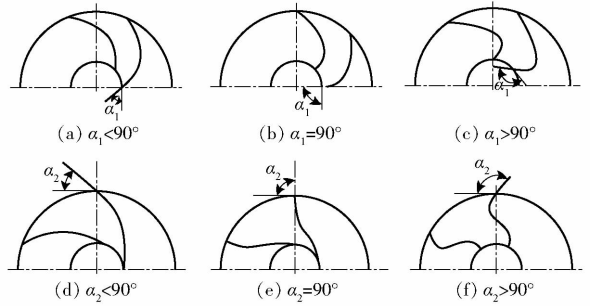


图 5 不同角度的导叶骨线平面投影示意图

Fig. 5 Plane projection diagrams of guide vane's center line at different angles

螺旋进种条、旋转盘与主轴同轴连接,要实现有效供种,螺旋进种条右旋时,电机逆时针转动,导叶需为逆时针方向。分析导叶骨线在进出口半径之间运移种群可能产生的轨迹路线,过小的导叶包角 θ 降低了导叶对种群的约束作用及种子流的稳定性,随着包角的增大种群越早趋近导叶达到稳定运移状态;通过仿真预试验可知当导叶包角大于 90° 时,种群的运移路程大幅增加,种子颗粒不能有效进入导种装置,排种效率降低且破损率增大,即存在合理的导叶包角参数使性能较优,综上导叶包角 θ 取值范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

根据导叶入口角、出口角及导叶包角参数取值范围开展仿真试验方案设计,并将各参数取值代入式(4),将所得方程写入 Creo 5.0 制图软件绘制出导叶骨线线型,建立不同参数组合下的旋转盘三维模型开展仿真试验。

2.3 导叶叶片数分析

导叶叶片数对旋转盘外部结构特征及旋转盘与上盖形成的内腔流场特征影响明显。

导叶叶片数量过少则会增加排种脉动性,两相邻导叶之间形成的运移区单位时间上的种群密度增大,种子碰撞加剧导致无序性增加,排种均匀性差;随着导叶叶片数增加,旋转盘的分种性能有所提高,但导叶数量过多相互之间存在排挤现象,在旋转盘入口处种子颗粒与导叶产生的碰撞几率大幅增加,不利于种子有效进入旋转盘运移区。为减小排种脉动性,确定导叶叶片数 Z 内范围为 6 ~ 10。导叶应在满足结构强度的同时降低厚度以减少导叶与种子的碰撞,导叶入口位置采用流线型倒角过渡,确定叶片厚度为 4 mm。

2.4 旋转盘分种过程力学分析

2.4.1 种群运移过程动力学分析

种群经过螺旋供种装置运移至旋转盘顶部区域,油菜种子从种群中分离短暂呈无约束状态,在重力作用下以一定初速度到达导叶入口处,在旋转盘逆时针转动产生的离心力及种子与锥盘、导叶之间的摩擦力等作用下运移至出口处经导种嘴排出,导叶可根据其骨线线型有效约束种子运动轨迹,种子流经由导叶骨线内侧运移至出种口处。将油菜种子颗粒视为均匀的球体,因旋转盘可实现对种子的有序分种,则不考虑种群间相互作用,均为单粒种子与旋转盘产生相互作用;忽略种群落入旋转盘时可能产生的反弹、种子自旋性及空气阻力。

取旋转盘上处于稳定运移阶段的种子进行受力分析,种子与导叶完全接触,其运动受力模型如图 6 所示。取处于半径 r 处的油菜种子为分析对象,以其质心所处位置为坐标原点 o_1 ,建立空间动坐标系 o_1ijk ,其中 k 轴垂直于正锥状旋转盘表面, j 轴方向为导叶在该点的切线方向, i 轴垂直于 jo_1k 所形成的平面。种子在旋转盘上受力有重力、旋转盘锥面和导叶接触面分别对其的支持力和摩擦力、科氏力、离心力等。

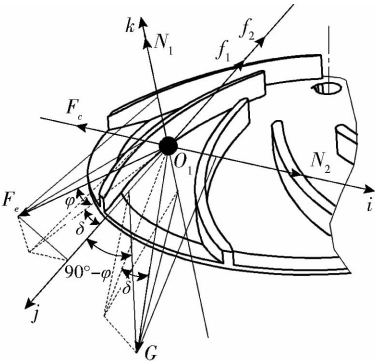


图 6 油菜种子在旋转盘上的受力模型
Fig. 6 Force model for rapeseed on spinning disc

沿 j 轴方向,由牛顿第二定律可得

$$\sum F_j = F_c \cos \varphi \cos \delta + G \cos \delta \sin \varphi - f_1 - f_2 = m \frac{d^2 l}{dt_1^2} \quad (5)$$

- 式中 $\sum F_j$ ——沿 j 轴方向的合外力, N
 F_c ——种子颗粒受到的离心力, N
 G ——种子颗粒重力, N
 f_1 ——旋转盘对种子颗粒的摩擦力, N
 f_2 ——导叶对种子颗粒的摩擦力, N
 m ——种子颗粒质量, kg
 δ ——导叶切线倾角, (°)
 l ——种子颗粒在导叶骨线上任意区段内的位移, m
 t_1 ——种子颗粒在导叶骨线上任意区段内运动的时间, s

开展动力学分析可得

$$\begin{cases} G = mg \\ F_c = m\omega v = m\omega \frac{dl}{dt_1} \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \\ f_1 = \mu (G \cos \delta \cos \varphi - F_c \sin \varphi) \\ f_2 = \mu (F_c + F_c \cos \varphi \sin \delta - G \sin \delta) \\ F_c = -2m\omega \times v = -2m\omega \sqrt{1 - (\sin \varphi \cos \delta)^2} \frac{dl}{dt_1} \end{cases} \quad (6)$$

- 式中 ω ——旋转盘回转角速度, rad/s
 n ——旋转盘转速, r/min
 v ——种子颗粒线速度, m/s
 μ ——种子颗粒与正锥盘及导叶的摩擦因数
 F_c ——种子颗粒受到的科氏力, N
 g ——重力加速度, m²/s
联立式(5)、(6)可得

$$\begin{aligned} & [\cos \varphi \cos \delta + \mu \sin \varphi - \mu \cos \varphi \sin \delta - \\ & 2\mu \sqrt{1 - (\sin \varphi \cos \delta)^2}] \frac{\pi n}{30} \frac{dl}{dt_1} + \\ & [(\sin \varphi - \mu \cos \delta) \cos \delta + \mu \sin \delta] g = \frac{d^2 l}{dt_1^2} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可得,种群颗粒在旋转盘上的运动主要受到旋转盘转速 n 、正锥盘及导叶与种群接触面材料摩擦因数 μ 、正锥盘锥角 φ 及导叶切线倾角 δ 等影响。在田间播种作业中要求播种机可根据实际播量需求实现播量变量可调,通常通过改变集排器转速 n 来实现;又由前述参数设计与材料选型已知正锥盘锥角 φ 和摩擦因数 μ ;根据导叶切线倾角的定义可知,其主要由 Bezier 曲线构造的导叶骨线线型参数来控制。综上可得,种群颗粒的运动受力及运移轨迹主要受结构参数导叶入口角

α_1 、导叶出口角 α_2 、导叶包角 θ 及工作参数转速 n 影响。

2.4.2 种群运移过程运动学分析

油菜种子颗粒在旋转盘上受导叶及锥盘的约束随其做牵连运动,同时由锥盘顶部运移至其底部做相对运动,之后种群经由水平分布的环带区域到达旋转盘边缘,脱离旋转盘的瞬时失去外力作用做平抛运动进入导种嘴。

对处于半径 r 处的种子颗粒开展运动学分析,此时种子的绝对速度可分解为牵连运动和相对运动,如图 7 所示。

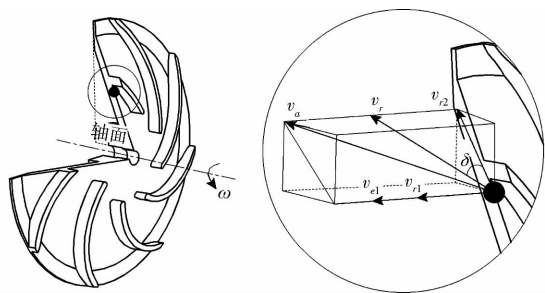


图 7 油菜种子在旋转盘上的速度模型

Fig. 7 Velocity model for rapeseed of spinning disc

牵连运动是旋转盘绕主轴的周向运动,在其作用下种子旋转产生的速度为牵连速度 v_{e1} ,方向为该点所在圆周的切线方向,即

$$v_{e1} = \omega r \quad (8)$$

种子沿导叶运移至旋转盘边沿,其相对运动的方向为该处的导叶骨线切线方向,颗粒运动轨迹线与叶片骨线一致。将相对速度 v_r 分解为两个相互垂直的分量,即种子颗粒所在圆周方向的速度 v_{r1} 和与周向垂直的速度分量 v_{r2} 。已知过种子颗粒所在的点只能作一个平面与牵连速度方向垂直,且牵连速度方向又与该点所在半径垂直,称该平面为过半径的轴面(图 7), v_{r2} 即为轴面分速度,即

$$\begin{cases} v_r = v_{r1} + v_{r2} \\ \tan\delta = \frac{v_{r1}}{v_{r2}} \end{cases} \quad (9)$$

综上,种子颗粒在周向上的分速度 v_e 与轴面分速度 v_{r2} 分别为

$$\begin{cases} v_e = v_{e1} + v_{r1} \\ v_{r2} = \frac{v_e}{\tan\sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中 σ ——绝对速度与轴面分速度的夹角(绝对速度方向角),($^\circ$)

结合式(8)~(10)可得种子颗粒在旋转盘上的绝对速度 v_a 为

$$v_a = \sqrt{v_e^2 + v_{r2}^2} = \frac{\omega r \sqrt{1 + \tan^2 \sigma}}{\tan\sigma - \tan\delta} \quad (11)$$

由式(11)可知,种子颗粒的绝对速度 v_a 主要受旋转盘角速度 ω 、种子颗粒所处半径 r 、绝对速度方向角 σ 和导叶切线倾角 δ 的影响。绝对速度的大小和方向主要影响种子脱离旋转盘瞬时进入导种装置的初速度。当种子颗粒到达旋转盘边沿时,唯一存在

$$\alpha_2 + \delta = 90^\circ \quad (12)$$

结合式(11)、(12)可得种子颗粒在脱离旋转盘边沿瞬时状态时的绝对速度 v'_a 为

$$v'_a \geq \frac{\omega r_2}{1 - \frac{\cot\alpha_2}{\tan\sigma}} \quad (13)$$

按照“先到先出”的原则种子颗粒无滞留进入导种嘴,此时 v'_a 随着旋转盘外径 r_2 和 ω 的增大而线性增大,若增大 r_2 ,种子在旋转盘上的运动时间增加,加速时间过长,因而 v'_a 增大,若 v'_a 过大种子在进入导种嘴后可能存在反弹及破损等现象,不利于有效排种,结合 2.1 节分析可知取 $r_2 = 95 \text{ mm}$ 合理; ω 的增大或减小直接影响螺旋进种条的供种量和供种性能,通常根据实际田间播种需求来确定 ω 取值。绝对速度方向角 σ 主要受导叶骨线线型的影响且与导叶切线倾角 δ 变化趋势一致。又由式(13)可知,增大 δ 则导叶出口角 α_2 减小, σ 增大,种子的绝对速度 v'_a 随之增大, σ 主要控制 v'_a 的方向,若 σ 过大,种子颗粒初速度方向无限接近周向,并不利于种群顺利进入导种嘴,因此为便于种群有效进入导种装置完成播种作业,导叶骨线线型的参数设计尤为重要。

3 仿真试验

运用 EDEM 仿真可揭示颗粒堆积和流动的过程^[22-23],可模拟分种装置对种群颗粒的力学作用并记录种群在任意位置的运动轨迹^[24],现开展仿真试验探究分种装置导叶主要结构参数(导叶入口角、导叶出口角、导叶包角)及导叶叶片数对各行排量一致性的影响。

3.1 模型建立

采用 Creo 5.0 分别建立不同结构参数组合的集排器三维模型,根据式(4)可知在部分结构参数取值端点处出现异点、极值等情况,则在不影响 Bezier 曲线对种群颗粒的作用下对导叶曲线做出适当修正。如图 8 所示,将简化后的仿真模型导入到 EDEM 2018 软件中,设置相关参数如表 1 所示^[25-27]。油菜种子模拟华油杂 62,其直径为 2 mm,种子与集排器、种子之间均采用 Hertz - mindlin (no - slip) 模型。

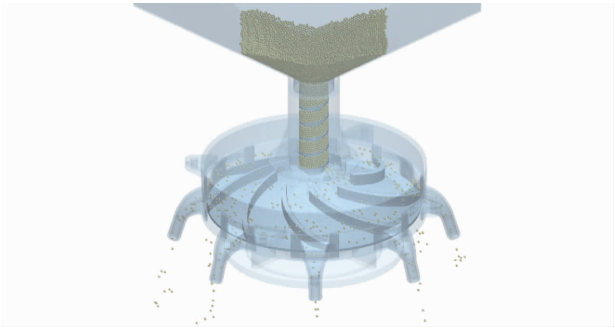


图 8 集排器仿真模型

Fig.8 Simulation model of centralized metering device

表 1 油菜种子与材料特性参数

Tab.1 Values of rapeseed and material properties used in EDEM

项目	参数	数值
油菜颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 060
ABS	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 060
铝合金	泊松比	0.30
	剪切模量/Pa	2.7×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
油菜-油菜	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.01
油菜-ABS	恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01
油菜-铝合金	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01

3.2 试验方法

基于前期对供种装置的分析可知,当转速为 81 r/min 时供种装置有较好的供种性能参数,此时供种装置的叶片宽度为 4 mm、导程为 15 mm,供种速率为 92.7 g/min。设置种子生成总量为 25 000 颗,设置种子生成速率为 25 000 颗/s,时间步长设置为 6.72×10^{-6} s,仿真总时长为 13.2 s,排种器于第 1.2 秒开始工作,工作总时长为 12 s。仿真开始 3.2 s 后,种群运动状态稳定,此时开始统计导种嘴 8 个出种口的排种粒数,以该排种量表征分种装置导叶参数变化对各行排量一致性的影响。

通过对分种装置的设计与参数分析,分别以导叶入口角、导叶出口角、导叶包角及导叶叶片数为影响各行排量一致性的主要因素。采用响应曲面法开展四因素三水平二次回归正交组合试验,每组试验重复 5 次,确定旋转盘导叶最佳参数组合,试验因素

编码如表 2 所示。

表 2 因素编码
Tab.2 Factors and codings

编码	因素			
	导叶入口角	导叶出口角	导叶包角	导叶叶片数
	$\alpha_1 / (^\circ)$	$\alpha_2 / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	Z
-1	0	0	30	6
0	30	22.5	60	8
1	60	45.0	90	10

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

试验结果如表 3 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 3 试验结果
Tab.3 Experiment results

试验 序号	因素				各行排量一致性 变异系数 Y/%
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	-1	-1	0	0	4.98
2	1	-1	0	0	4.39
3	-1	1	0	0	5.09
4	1	1	0	0	3.56
5	0	0	-1	-1	3.55
6	0	0	1	-1	3.74
7	0	0	-1	1	3.76
8	0	0	1	1	3.95
9	-1	0	0	-1	4.58
10	1	0	0	-1	3.99
11	-1	0	0	1	5.34
12	1	0	0	1	4.08
13	0	-1	-1	0	3.40
14	0	1	-1	0	3.17
15	0	-1	1	0	4.09
16	0	1	1	0	3.31
17	-1	0	-1	0	4.68
18	1	0	-1	0	3.61
19	-1	0	1	0	4.61
20	1	0	1	0	4.04
21	0	-1	0	-1	4.42
22	0	1	0	-1	3.65
23	0	-1	0	1	4.38
24	0	1	0	1	4.19
25	0	0	0	0	2.57
26	0	0	0	0	2.51
27	0	0	0	0	2.41
28	0	0	0	0	2.39
29	0	0	0	0	2.38

3.3.2 回归分析与显著性检验

运用软件 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行多元回归拟合,得到以各行排量一致性变异系数 Y 为响应函数,以各因素编码值为自变量的回归数学

模型。

对各行排量一致性变异系数进行方差分析,如表 4 所示。

表 4 各行排量一致性变异系数方差分析

Tab.4 Variance analysis of apiece row consistency variation coefficient

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	p
模型	18.75	14	1.34	62.55	<0.000 1 **
X ₁	2.62	1	2.62	122.49	<0.000 1 **
X ₂	0.60	1	0.60	28.16	0.000 1 **
X ₃	0.21	1	0.21	9.59	0.007 9 **
X ₄	0.26	1	0.26	12.19	0.003 6 **
X ₁ X ₂	0.22	1	0.22	10.32	0.006 3 **
X ₁ X ₃	0.063	1	0.063	2.92	0.109 6
X ₁ X ₄	0.11	1	0.11	5.24	0.038 1 *
X ₂ X ₃	0.076	1	0.076	3.53	0.081 2
X ₂ X ₄	0.084	1	0.084	3.93	0.067 5
X ₃ X ₄	0	1	0	0	1.000 0
X ₁ ²	10.73	1	10.73	501.10	<0.000 1 **
X ₂ ²	3.61	1	3.61	168.64	<0.000 1 **
X ₃ ²	1.07	1	1.07	49.96	<0.000 1 **
X ₄ ²	4.92	1	4.92	229.88	<0.000 1 **
失拟	0.27	10	0.027	3.87	0.102 0
误差	0.028	4	0.007		
总和	19.05	28			

注: ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$), * 表示差异显著 ($0.01 \leq p < 0.05$)。

结果显示:各行排量一致性变异系数回归模型极显著($p < 0.01$),说明该模型具有统计学意义; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_1X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 和 X_4^2 影响极显著 ($p < 0.01$), X_1X_4 影响显著 ($p < 0.05$),其他因子影响不显著;失拟项 p 值为 0.102 0,回归方程失拟不显著,在试验范围内模型与实际情况拟合较好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y = 2.45 - 0.47X_1 - 0.22X_2 + 0.13X_3 + 0.15X_4 - 0.23X_1X_2 - 0.17X_1X_4 + 1.29X_1^2 + 0.75X_2^2 + 0.41X_3^2 + 0.87X_4^2$$

(14)

由式(14)可知,影响各行排量一致性变异系数的因素主次顺序为导叶入口角、导叶出口角、导叶叶片数和导叶包角。

3.3.3 响应曲面分析

各行排量一致性变异系数是评价集排器排种性能的关键指标,应用响应曲面分析各因素对该指标的影响,如图 9 所示。由图 9a 可知,当导叶包角及叶片数置于零水平 ($\theta = 60^\circ$ 和 $Z = 8$),入口角一定时,变异系数随出口角的增加呈先降后升的趋势且当入口角为 0° 时其变异系数较大;出口角一定时,变异系数随着入口角的增加先快速下降后呈缓慢上升趋势。由图 9b 可知,当导叶出口角及叶片数置于零水平 ($\alpha_2 = 22.5^\circ$ 和 $Z = 8$),入口角一定时,变异系数随着包角的增加呈先降后升的趋势且变化较缓慢;包角一定时,变异系数随着入口角的增加呈先快

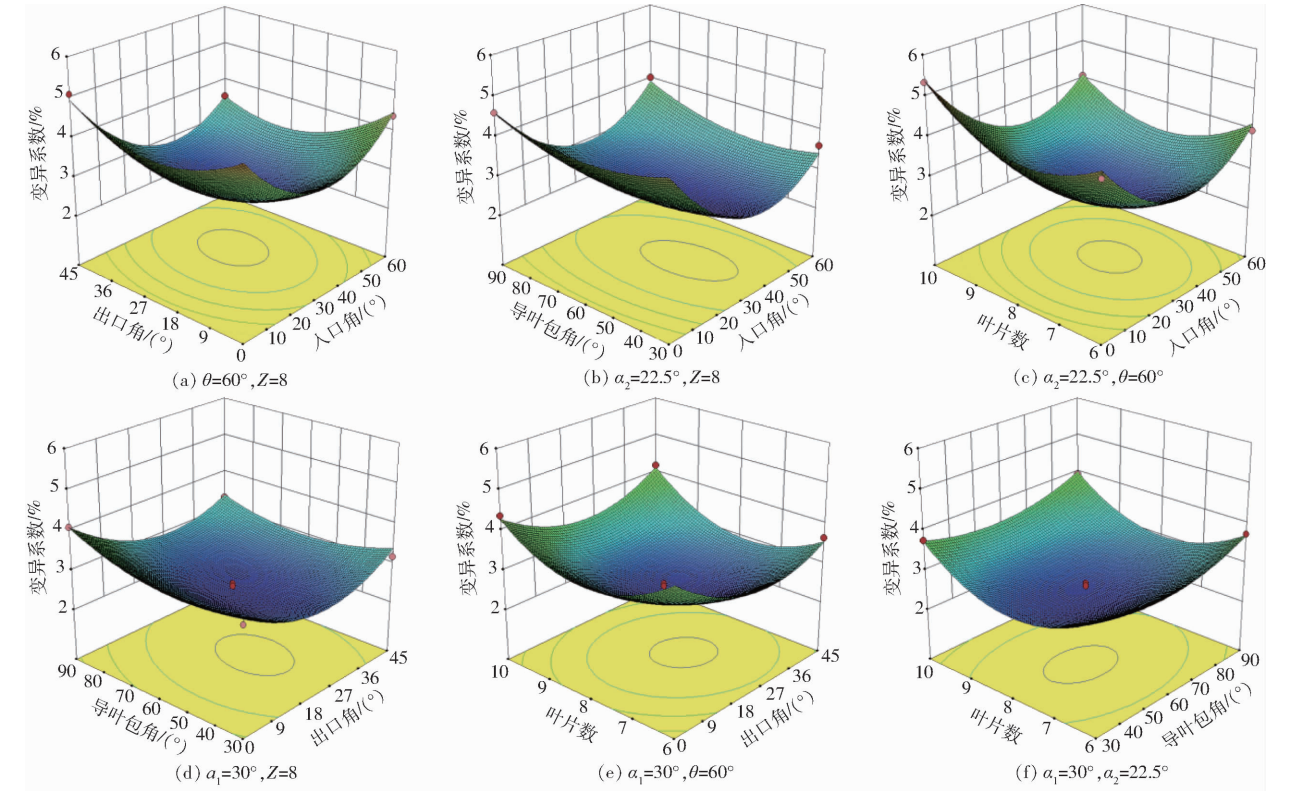


图 9 各因素对各行排量一致性变异系数影响的响应曲面

Fig.9 Effects of various factors on apiece row consistency variation coefficient

速下降后缓慢上升的趋势。由图 9c 可知,当导叶出口角及包角置于零水平($\alpha_2 = 22.5^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$),入口角一定时,变异系数随着叶片数的增加呈先降后升的趋势;叶片数一定时,变异系数随着入口角的增加呈先快速下降后上升的趋势,且当入口角为 0° 及叶片数为 10 时变异系数大于 5%。由图 9d 可知,当导叶入口角及叶片数置于零水平($\alpha_1 = 30^\circ$ 和 $Z = 8$),出口角一定时,变异系数随着包角的增加变化趋势较为平缓呈先降后升的趋势;包角一定时,变异系数随着出口角的增加呈先快速下降后缓慢上升趋势。由图 9e 可知,当导叶入口角及包角置于零水平($\alpha_1 = 30^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$),出口角一定时,变异系数随着叶片数的增加呈先降后升的趋势;叶片数一定时,变异系数随着出口角的增加呈先快速下降后缓慢上升趋势。由图 9f 可知,当导叶入口角及出口角置于零水平($\alpha_1 = 30^\circ$ 和 $\alpha_2 = 22.5^\circ$),包角一定时,变异系数随着叶片数的增加呈先下降后快速上升的趋势;叶片数一定时,变异系数随着包角的增加变化趋势不明显。

采用 Design-Expert 8.0.6 软件回归方程及响应曲面分析可得各因素的较优参数组合为:导叶入口角 36.0° 、出口角 26.4° 、包角 55.1° 及叶片数 7.8;此时集排器各行排量一致性变异系数为 2.36%。此时考虑到叶片数在实际情况中应取为整数,则取叶片数为 8。

为验证回归模型的合理性,以导叶入口角为 36° 、出口角为 26° 、包角为 55° 及叶片数为 8 时,开展油菜种子的排种性能仿真。试验结果表明:在该导叶较优参数组合下旋转盘分种性能较好,导种嘴处无种子滞留及堵塞现象;油菜种子的各行排量一致性变异系数为 2.41%,试验结果与理论结果基本一致,油菜种子在旋转盘上的分布如图 10 所示。

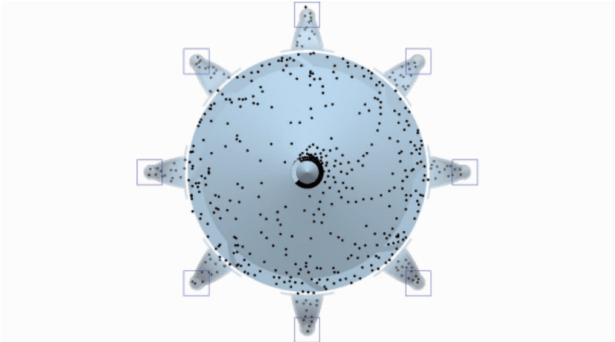


图 10 油菜种子分布图

Fig. 10 Distribution diagram for rapeseed

4 验证试验

4.1 台架试验

为验证仿真结果的合理性,以及在不同转速时

集排器对油菜种子的分种性能,将集排器安装于自制的排种试验台上开展验证试验,如图 11 所示。

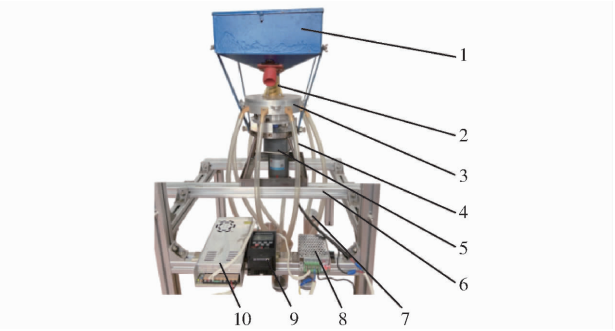


图 11 旋转盘式精量集排器试验台

Fig. 11 Platform of spinning disc precision centralized metering device

1. 种箱 2. 供种装置 3. 分种装置 4. 导种管 5. 电机 6. 试验台架 7. 盛种杯 8. 转速调节器 9. 时控开关 10. 变压器

试验以华油杂 62 为试验材料,千粒质量为 4.68 g,含水率为 4.58%^[20]。为满足分种装置内所需种子颗粒的种量要求,结合前期对供种装置的研究可知,在满足供种性能的前提下设置转速为 60 ~ 100 r/min^[28],每间隔 10 r/min 为一个水平,选择较优的螺旋供种装置结构参数开展试验。试验重复 5 次,统计油菜种子在 60 s 内的质量、破损率、各行排量一致性变异系数和单行排量稳定性变异系数,试验结果如表 5 所示。

表 5 集排器排种性能试验结果

Tab. 5 Seeding performance test results of centralized metering device

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	各行平均 排种量/g	各行排量一 致性变异 系数/%	单行排种量 稳定性变异 系数/%	平均破损 率/%
60	9.29	3.84	4.11	0.31
70	10.27	3.31	4.50	0.37
80	11.51	2.87	3.68	0.42
90	13.26	3.09	3.99	0.42
100	15.48	3.20	4.24	0.48

由表 5 可知,当转速在 60 ~ 100 r/min 范围变化时,油菜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 4.6%,破损率随着转速的提高而逐渐增大但整体均低于 0.5%,满足 NY/T 2709—2015《油菜播种机 作业质量》对油菜排种性能的要求,且可通过改变转速来满足不同的播量需求。

4.2 田间试验

为检验油菜旋转盘式精量集排器的排种性能,分别于湖北省武汉市、新疆维吾尔自治区昭苏地区和浙江省苍南地区等地进行了约 5.5 hm² 的油菜播

种生产试验。

于华中农业大学现代农业科技试验基地开展不同播量水平的油菜播种试验,用以评价油菜旋转盘式精量集排器排种性能,如图 12 所示。试验以东方红 LX954 型拖拉机为动力、2BFQ-8 型油菜联合直播机为平台,机组前进速度为 4.15 km/h,播种行数为 8 行,行距为 210 mm,幅宽为 2 m。播种后 45 d 测定不同播种量下的 8 行 1 m 内的油菜幼苗数量,不同播种量下分别取 3 个测试点重复测定,统计单位面积范围内 8 行的油菜幼苗总数量及各行植株分布一致性变异系数,结果如表 6 所示。



图 12 油菜田间试验及苗期长势
Fig. 12 Field experiment and growth performance for rapeseed

由表 6 可知,在不同播种量下,油菜各行植株分布一致性变异系数低于 14%,油菜种植密度为 57~

表 6 油菜植株田间分布
Tab. 6 Field distribution for rapeseed

播种量/ (g·hm ⁻²)	1 m 内植株数量								每平方米植株数 量/(株·m ⁻²)	各行植株分布一 致性变异系数/%	稳定性变 异系数/%
	第 1 行	第 2 行	第 3 行	第 4 行	第 5 行	第 6 行	第 7 行	第 8 行			
5 400	11.4	15.1	14.7	14.8	15.2	15.8	15.2	10.8	57.60	13.47	10.81
6 700	14.9	19.2	19.8	19.0	18.8	20.4	19.0	15.9	73.51	10.48	8.31
8 970	15.4	21.3	20.5	19.2	21.3	20.7	20.9	15.7	79.62	12.66	8.39

80 株/m²,稳定性变异系数低于 11%。整体来看各行植株分布均匀性较好,且苗期长势较好,造成种植密度差异的原因是植株成苗率还受地表平整度、降雨及环境等随机因素的影响。

于新疆生产建设兵团第四师 77 团和浙江省苍南滩涂地试验基地开展播种均匀性及适应性试验,如图 13 所示。各地试验结果表明,油菜旋转盘式精量集排器能够适应不同地区的播量需求且集排器排种性能满足田间试验需求。



图 13 不同地区油菜田间播种试验

Fig. 13 Field experiment for rapeseed in different areas

5 结论

(1)基于 Bezier 曲线的曲率性质,设计了一种油菜旋转盘式精量集排器,确定了分种装置的关键

结构参数:正锥盘锥角为 22°、导叶入口半径为 32 mm、导叶出口半径为 95 mm、导叶入口角为 0°~60°、导叶出口角为 0°~45°、导叶包角为 30°~90°及导叶叶片数为 6~10。

(2)应用 EDEM 仿真,通过四因素三水平回归正交组合试验,建立了导叶入口角、出口角、包角及叶片数与各行排量一致性变异系数的二次回归数学模型,分析了各因素对各行排量一致性变异系数的影响,得出较优参数组合为:导叶入口角 36°、出口角 26°、包角 55°及叶片数 8。在该参数组合下开展仿真验证试验,得到各行排量一致性变异系数为 2.41%,旋转盘可有效实现均匀分种功能。

(3)开展台架试验验证较优参数组合下不同转速对集排器排种性能的影响,试验表明:转速为 60~100 r/min 时,油菜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 4.6%,破损率低于 0.5%。田间试验表明:在不同播量前提下,油菜各行植株分布一致性变异系数低于 14%,油菜种植密度为 57~80 株/m²,植株田间分布稳定性变异系数低于 11%。满足油菜播种性能要求。

参 考 文 献

[1] 刘成,冯中朝,肖唐华,等.我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J].中国油料作物学报,2019,41(4):485-489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485-489. (in Chinese)

[2] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)

- [3] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702-711. (in Chinese)
- [4] 李兆东,杨文超,武尧尧,等.油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助助种性能分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(20):57-66.
LI Zhaocong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57-66. (in Chinese)
- [5] 刘海,张青松,廖宜涛,等.小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J].农业机械学报,2021,52(11):40-48,77.
LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 40-48, 77. (in Chinese)
- [6] 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.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rapeseed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese)
- [7] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等.油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J].农业工程学报,2014,30(8):30-39.
CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed and wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30-39. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 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(6): 98-109.
- [10] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "Air-Seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 1-17.
- [11] HU Hongji, ZHOU Zhonglin, WU Wencheng, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246-259.
- [12] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等.离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(增刊):40-46.
CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 40-46. (in Chinese)
- [13] 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等.油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(9):77-84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77-84. (in Chinese)
- [14] 黄小毛,徐胡伟,张顺,等.油菜成条飞播装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):78-87.
HUANG Xiaomao, XU Huwei, ZHANG Shun, et al. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 78-87. (in Chinese)
- [15] 程修沛,李洪文,卢彩云,等.小麦小区条播机离心分种器参数优化与试验[J].农业工程学报,2019,35(20):1-9.
CHENG Xiupai, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Parameter optimization and experiment of centrifugal seed dispenser in wheat plot drill[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 1-9. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 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 test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43-53. (in Chinese)
- [18] 王磊,席日晶,廖宜涛,等.油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(8):62-72,97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62-72, 97. (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 test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)

- [20] 张新梅,陈国华.爆炸碎片抛射速度及飞行轨迹分析方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(4):106–110.
ZHANG Xinmei, CHEN Guohua. Approach to decoupling of multi-dimension sens inginformation based on multi-scale approximation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009,37(4):106–110. (in Chinese)
- [21] 李武钢.阻力系数和物体质量对斜抛运动影响的数值分析[J].广西师范学院学报(自然科学版),2006,23(2):112–114.
LI Wugang. Number analysis of projectile motion affected by the air resistance and the object mass[J]. Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition), 2006,23(2):112–114. (in Chinese)
- [22] 闵永林,陈池.两种空气阻力模型的抛射体飞行轨迹研究[J].装备制造技术,2009(12):15–17.
MIN Yonglin, CHEN Chi. Project track under two kinds of air resistance models[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(12):15–17. (in Chinese)
- [23] 方会敏.基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D].南京:南京农业大学,2016.
FANG Huimin. Research on the straw – soil – rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] 袁长达.玉米收获机脱出物粉碎抛撒装置设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
YUAN Changda. Corn haverster chopper and spreader design and validation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等.颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J].物理学报,2014,63(17):165–171.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17):165–171. (in Chinese)
- [26] 牟孝栋,姜慧新,孙延成,等.青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):218–226.
MOU Xiaodong, JIANG Huixin, SUN Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device of silage corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):218–226. (in Chinese)
- [27] 陈海涛,李昂,史乃煜,等.玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J].农业机械学报,2018,49(5):76–83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):76–83. (in Chinese)
- [28] 王国强,郝万军,王继新.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.
- [29] 文愿运,刘马林,刘荣正,等.颗粒离散单元法数值模拟与典型实验对比研究[J].中国粉体技术,2015(3):1–5.
WEN Yuanyun, LIU Malin, LIU Rongzheng, et al. Comparative study between numerical simulation by discrete element method and typical experimental research of particles[J]. China Powder Science and Technology, 2015(3):1–5. (in Chinese)

(上接第 66 页)

- [20] 丛锦玲.油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat & rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [21] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.
- [22] RAJIA A O, FAVIER J F. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. II: compression of oilseeds[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(3):373–380.
- [23] REZVANI F, AZARGOSHASB H, JAMIALAHMADI O, et al. Experimental study and CFD simulation of phenol removal by immobilization of soybean seed coat in a packed-bed bioreactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 101:32–43.
- [24] 冯占荣.基于 CAD – DEM – CFD 耦合的气吹式排种器数字化设计方法研究[D].长春:吉林大学,2010.
FENG Zhanrong. Study on digital design method of air-blowing seed-metering device based on coupled CAD – DEM – CFD [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [25] 张涛,刘飞,赵满全,等.基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J].农业工程学报,2016,32(22):27–35.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):27–35. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等.基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(14):32–39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):32–39. (in Chinese)
- [28] 姚露,廖庆喜,王磊,等.油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):78–88.
YAO Lu, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):78–88. (in Chinese)