doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.019

双孔并行气吸式油莎豆精量穴播器设计与试验

陈　永[1]　高晓勋[1]　金　鑫[2]　余　幸[3]　胡　斌[4]　张秀丽[1]

(1.河南农业大学机电工程学院,郑州 450002;2.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003;
3.黄河水利委员会黄河水利科学研究院,郑州 450003;4.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003)

摘要:针对大粒径油莎豆种子表面凹凸不平、尺寸差异大而导致穴播器充种、携种不稳定及难以实现精量播种的问题,结合油莎豆一穴 2 粒、等距穴播的农艺要求,设计了一种双孔并行气吸式油莎豆精量穴播器。以油莎豆为研究对象,阐述了穴播器的结构和基本原理,对穴播器关键部件进行设计,确定其结构参数,对充种、携种过程进行力学分析并构建种子动力学模型。采用 Fluent 仿真模拟分析双孔不同分布组合下不同位置截面流场的压力、速度分布情况,优选确定了型孔最佳组合方式。结合单因素试验,进一步分析影响穴播器排种性能的主要参数,选取排种盘转速、气室负压、型孔直径为试验因素,以合格指数、漏播指数、重播指数为排种性能评价指标进行三因素五水平二次旋转正交组合试验。对试验结果进行多元回归分析,确定影响穴播器性能指标的主次影响因素,并通过多目标优化确定最佳参数组合:排种盘转速为 34.3 r/min、负压为 19.79 kPa、型孔直径为 6.83 mm,对此参数组合进行台架验证试验,合格指数为 92.1%,漏播指数为 3.63%,重播指数为 4.27%,满足油莎豆精量播种要求,提高了排种均匀性。

关键词:油莎豆;气吸式;双孔并行精量穴播器

中图分类号:S223.2⁺3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0213-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Two-hole Parallel Air-absorbing Precision Seed Metering Device for *Cyperus esculentus*

CHEN Yong[1]　GAO Xiaoxun[1]　JIN Xin[2]　YU Xing[3]　HU Bin[4]　ZHANG Xiuli[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*
2. *College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471003, *China*
3. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou* 450003, *China*
4. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of uneven surface and excessive size difference of large particle size of the *Cyperus esculentus*, which led to the instability of filling and carrying of the seeding device, and it is difficult to achieve accurate seeding, a two-hole parallel air-suction roller precision seed metering device for *Cyperus esculentus* was designed in accordance with the agronomic requirements of equidistant planting of two seeds in one hole. Taking *Cyperus esculentus* as the research object, the structure and basic principles of the seed discharger were elaborated, the key components of the seed discharger were designed, its structural parameters were determined, and the mechanical analysis of the seed filling and seed carrying process was carried out and a seed dynamics model was constructed. Fluent simulation was used to analyze the pressure and velocity distribution of the cross-section flow field at different locations under different distribution combinations of double holes, and the best combination of holes was optimally determined. Combined with the single factor test, the main parameters affecting the seed discharge performance were further analyzed. The rotation speed of the seed discharge disk, the negative pressure of the air chamber and the diameter of the mold hole were selected as the test factors, the three factor and five level quadratic rotation orthogonal combination test was carried out with the qualification index, the

收稿日期:2024-10-25　修回日期:2024-11-20

基金项目:河南省科技攻关项目(232102111122、242102111183)、河南省重大科技专项(231100110200)和兵团杰出青年项目(2024DB002)

作者简介:陈永(1987—),男,副教授,博士,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail:chenyong@henau.edu.cn

通信作者:金鑫(1986—),男,教授,博士生导师,主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究,E-mail:jx.771@haust.edu.cn

missing index and the reseed index as the evaluation indexes of seeding performance. Multiple regression analysis was carried out on the experimental results to determine the primary and secondary factors affecting the performance indicators of the seed discharge device, and the optimal parameter combination was determined through multi-objective optimization: the speed of the seed discharge disk was 34.3 r/min, the negative pressure was 19.79 kPa, and the diameter of the mold hole was 6.83 mm. The results of this parameter combination were verified by bench test, and the qualified index was 92.1%, the missed sowing index was 3.63%, and the reseed index was 4.27%, which met the requirements of precision sowing for *Cyperus esculentus* and improved the uniformity of seeding.

Key words: *Cyperus esculentus* seeds; air-absorbing; two-hole parallel precision seed metering device

0 引言

油莎豆(*Cyperus esculentus*)作为一种新型草本油料作物,其单位面积产油量是大豆的 3 ~ 5 倍[1-2],机械化种植发展前景广阔。针对油莎豆种子机械化播种的难题,学者展开了诸多研究。丁力等[3-4]针对油莎豆种子流动性差、投种时轴向分散等问题,设计了一种组合孔内充式排种器以及油莎豆 V 形凹槽窝眼排种轮低位集穴排种器。卢玉伦等[5]针对充种过程中极易堵种等问题,设计了一种油莎豆窝眼轮式排种器。江景涛等[6]对 4 种机械式油莎豆排种器进行了对比研究,并分析了存在的问题。王佳奇等[7]对单粒气吸式排种器的排种盘进行了改进和优化。综上所述,在油莎豆播种方面,相关学者的研究主要集中在机械式排种器上,即使涉及气力式排种器,也主要研究单粒播种。而油莎豆种子形状尺寸不一,采用窝眼等机械式排种器进行排种时,受机械结构的限制,在充种等过程中会造成种子的机械损伤,且随着排种器转速的增加种子破损率也会随之升高,对种子的适应性较差。而气力式排种器对种子的适应性较强,能避免机械结构对种子的损伤,省种的同时也易于精量播种,得到了广泛应用,是精量排种器的主要发展方向。基于上述分析,选用气力式排种器进行油莎豆排种研究。目前气力式排种器的研究主要集中在油菜、小麦、胡麻、三七、棉种等中小粒径种子[8-10],以及花生、蚕豆、玉米、大蒜等大粒径种子[11-14],而对于大粒径油莎豆种子的研究则较少且主要聚焦于单粒排种技术,因此设计一种适用于油莎豆双粒播种要求的气力式排种器尤为必要。

现有的大粒径种子气力式排种器多为单粒排种,而油莎豆农艺要求一穴 2 粒,故现有的大粒径气力式排种器不能直接用来进行油莎豆的播种作业,本文设计一种双孔并行气吸式精量穴播器,对充种和携种过程进行理论分析,并通过 Fluent 模拟分析型孔不同组合方式,对关键参数进行优化,通过台架试验对最优参数进行试验验证,以期提高播种质量。

1 穴播器总体结构和工作原理

1.1 种子形状特征与尺寸参数

油莎豆种子属于大粒径种子,其形状尺寸直接影响气力式精量穴播器的吸附性能。随机选取圆粒油莎豆种子 300 粒,采用游标卡尺(精度 0.01 mm)测定其长度(L)、宽度(W)、厚度(T_y)。计算可得等效粒径 d_e和球度 S_p平均值分别为 11.00 mm、87%,球度 S_p越接近 100%,种子的形状越接近于圆形。采用高精度电子天平(最小刻度为 0.01 g)测量油莎豆种子千粒质量,试验重复 10 次。试验测得 L、W、T_y平均值分别为 12.60、11.30、9.38 mm,千粒质量平均值为 787.66 g。油莎豆种子三轴尺寸和千粒质量如表 1 所示。

表 1 油莎豆种子三轴尺寸和千粒质量

Tab.1 3D dimension and 1000-seed weight of *Cyperus esculentus* seeds

项目	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	三维体积/cm^3	千粒质量/g
最大值	15.92	14.98	12.50	1.329	788.65
最小值	10.00	8.86	6.80	0.352	786.95
平均值	12.60	11.30	9.38	0.712	787.66
标准差	1.164	1.077	1.058	0.183	0.54

1.2 穴播器结构

气吸式油莎豆精量穴播器结构如图 1 所示,主要由穴播器前壳体、进种口、清种装置、压种板、分种盘、刮种装置、中空吸轴、断气装置、吸种盘、扰种装置、环形腰带、穴播器后底座、鸭嘴等组成。分种盘通过沉头螺钉与穴播器后底座连接;吸种盘被分种盘压实,并与卡入后底座的环型密封圈紧密接触,共同形成负压气室;扰种装置采用柔性毛刷,避免对种子的二次破坏;腰带外围通过螺栓连接鸭嘴,并组成二次投种装置;压种板通过螺栓连接与腰带、穴播器后底座完全固定;穴播器前壳体上装配有进种口、清种装置、扰种装置、刮种装置,同时通过普通平键与中空吸轴连接固定,以传递力和扭矩。

1.3 穴播器工作原理

油莎豆气吸式穴播器工作过程中主要划分为

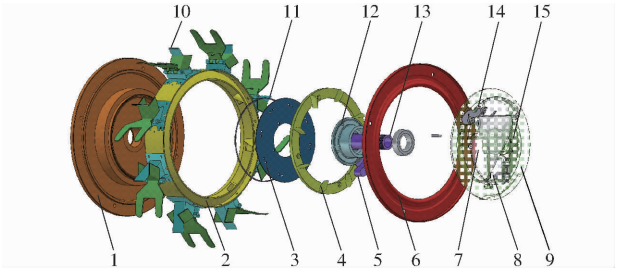


图 1　气吸式油莎豆精量穴播器结构图

Fig. 1　Structure diagram of air-suction *Cyperus esculentus* seeds precision seed-metering device

1. 穴播器后底座　2. 环形腰带　3. 吸种盘　4. 分种盘　5. 断气装置　6. 压种板　7. 进种口　8. 扰种装置　9. 穴播器前壳体　10. 鸭嘴　11. 密封圈　12. 轴承座　13. 中空吸轴　14. 清种装置　15. 刮种装置

5 个区域，如图 2 所示，中空轴通过软管与风机紧密连接。种子通过进种口流入充种区Ⅰ，并在自身重力、种间压力、负压气流的复杂作用下迅速朝型孔运动，转动到清种区Ⅱ后，一部分种子在自身重力作用下掉落到充种区，另一部分则被清种装置强制清除，型孔吸附种子在携种区Ⅲ稳定运动，转至一次投种区Ⅳ。此时在断气块的作用下负压消失，种子脱离吸种盘。刮种板隔断种子再次掉落充种室，在分种盘的推动下种子落入环形内腔体，完成一次投种过程。腰带继续转动进入二次投种区Ⅴ的一定位置后，种子克服腰带内腔摩擦力并在重力作用下滑落到鸭嘴内部。随着动鸭嘴接触地面并压缩弹簧，鸭嘴内部腔体被打开，种子在重力作用下被投入孔穴内，完成二次投种过程，形成一个工作周期。

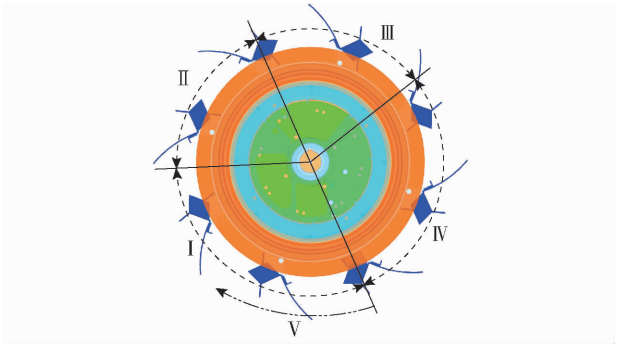


图 2　穴播器工作分区示意图

Fig. 2　Working partition diagram of seeding metering device

Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 清种区　Ⅲ. 携种区　Ⅳ. 一次投种区　Ⅴ. 二次投种区

2　关键部件设计

2.1　排种盘直径

排种盘直径的变化对气吸式穴播器的吸种性能有着不可忽略的影响[15]。结合穴播器实况，建立排种盘直径与充种区种子充种时间关系式

$$\begin{cases} l_f = \theta_f \left(\dfrac{D}{2} - \Delta d \right) \\ v_p = \dfrac{n\pi}{30} \left(\dfrac{D}{2} - \Delta d \right) \\ t_f = \dfrac{l_f}{v_p} \end{cases} \tag{1}$$

式中　l_f——充种区域弧长，mm

θ_f——充种区域弧度，rad

D——排种盘边缘直径，mm

Δd——型孔中心到排种盘边缘径向距离，mm

v_p——型孔中心线速度，mm/s

n——排种盘转速，r/min

t_f——充种区种子充种时间，s

由式(1)整理可得

$$t_f = \frac{30\theta_f}{\pi n} \tag{2}$$

根据式(2)可得，充种区型孔滞留时间只与充种区弧度 θ_f、排种盘转速 n 有关，而排种盘直径并不影响种子在充种区的吸附时间。参考《农业机械设计手册》[16]，气吸式穴播器排种盘直径选取范围多数为 140 ~ 260 mm，同时根据穴播器整体结构，分种盘通过沉头螺钉将排种盘卡入穴播器后底座凹槽中，本设计排种盘直径选取 198 mm，壁厚为 1.6 mm。

2.2　型孔数量

型孔的数量和尺寸结构直接影响种子的吸附效果[17]，本文采用双孔设计，即一个鸭嘴最终掉落 2 粒种子。油莎豆田间种植农艺要求株距一般为 15 ~ 20 cm，参考设计的排种盘直径，结合型孔中心线速度、转速、鸭嘴数量之间的关系，根据《农业机械设计手册》[16]得穴播器鸭嘴数量 N_y 计算公式为

$$N_y = \frac{v_s T_p}{L_z} \tag{3}$$

其中

$$T_p = \frac{\pi(D - 2\Delta d)}{v_p}$$

式中　v_s——播种机前进速度，m/s

T_p——排种盘旋转一圈的时间，s

L_z——播种株距，m

由式(3)整理化简得

$$N_y = \frac{60 v_s}{L_z n} \tag{4}$$

由式(4)可知，排种盘鸭嘴数量与播种机行驶速度 v_s、种子株距 L_z、排种盘转速 n 有关。取播种机前进速度 $v_s = 3.32$ km/h；株距 $L_z = 0.2$ m；排种盘转速 $n < 50$ r/min，最后确定排种盘鸭嘴数量 $N_y = 8$。

2.3 油莎豆播种农艺要求及双孔设计

油莎豆生长期短、适应性广。在排种盘开设双孔,每相邻两孔为一组,一次吸附 2 粒油莎豆种子,以满足双粒播种农艺要求。为避免两孔过近导致种子在吸附过程中互相干涉从而影响播种进程,需要合理设置双孔之间的距离,如图 3 所示。

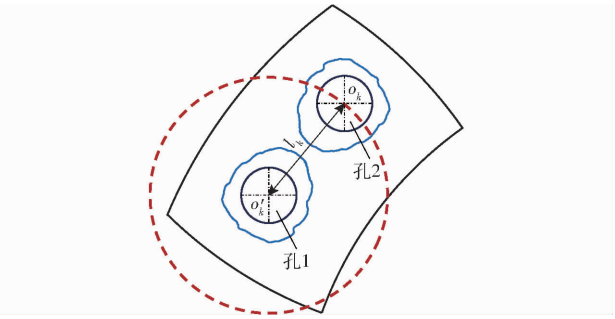


图 3 双孔距离设定示意图

Fig. 3 Schematic of distance setting of two holes

设定孔 1 圆心 o'_k和孔 2 圆心 o_k之间的距离为 l_k,最大粒径油莎豆种子长度为 L_{max},则为了避免种子吸附过程中相互推挤干涉,l_k应满足

$$l_k \geqslant L_{max} \tag{5}$$

双孔一次吸附 2 粒种子,而当圆心 o'_k与孔 2 圆心 o_k之间距离 l_k过大时,吸附的种子则不能准确掉落同一种穴内,达不到双粒播种要求,统计最大粒径油莎豆种子长度 L_{max}为 15.92 mm,故最终确定双孔之间距离 l_k = 16 mm。由于穴播器鸭嘴总数量 N_y为 8,在穴播器工作过程中每个鸭嘴对应一组双孔,故共设计 8 组双孔,计算得型孔总数量 N = 16。

2.4 型孔直径

型孔对油莎豆种子的吸附姿态主要分为 3 种[18],如图 4 所示,平躺是负压气流沿厚度方向使种子长度和宽度平面紧贴排种盘;竖直姿态是负压气流沿长度方向使种子厚度和宽度平面紧贴排种盘;侧躺是负压气流沿宽度方向使种子长度和厚度紧贴排种盘。

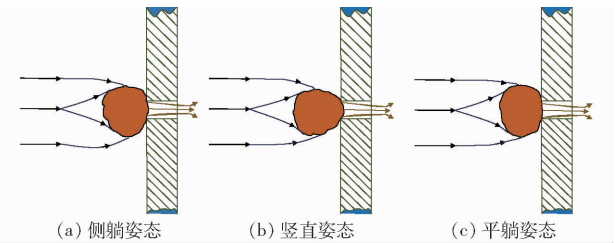


图 4 油莎豆种子吸附姿态示意图

Fig. 4 Schematics of adsorption attitude of *Cyperus esculentus* seeds

为了确保油莎豆种子稳定吸附在排种盘壁面,真空室负压与型孔直径之间关系为

$$p = \frac{\pi d^2}{4}(p_0 - p_1) \tag{6}$$

式中 p——型孔对种子的吸附力,N

d——型孔直径,mm

p_0——型孔远离负压气室一端压力,kPa

p_1——负压气室靠近型孔一端压力,kPa

由式(6)可得,当 p_0和 p_1一定时,型孔直径 d 与型孔吸附力 p 成正比,但考虑实际情况,当型孔直径 d 超过油莎豆种子最小直径时,油莎豆种子会被吸进负压气室,出现漏播现象造成吸种失败。

油莎豆种子大小不一,不同方向的粒径分布主要集中在 8 ~ 14 mm[19],测得 300 粒种子宽度平均值为 11.30 mm,参考文献[16]结合实际经验,型孔直径 d 范围一般为

$$d = (0.6 \sim 0.7)d_w \tag{7}$$

式中 d_w——油莎豆种子平均宽度,mm

由式(7)可得,d 取 6.78 ~ 7.91 mm。

3 种子运动过程分析

3.1 充种过程力学分析

随着排种盘的转动,扰种毛刷扰动穴播器底部种群,增加种子间空隙率[20]。种子在气流作用下向型孔移动,彼此间形成竞争关系,最后具有较大优势的种子摆脱另一方的干扰,被成功吸附。真实充种环境复杂多变,不同位置多粒种子互相作用,如图 5 所示,对充种困难种子 2 靠近型孔过程进行力学分析。

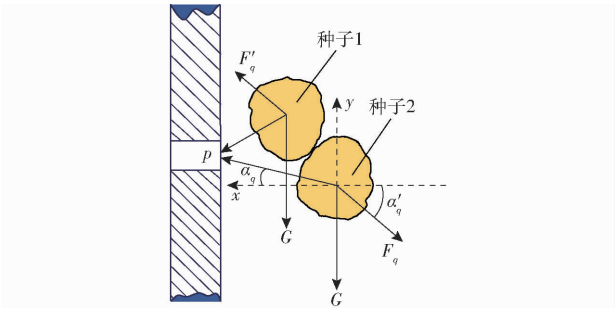


图 5 运动过程力学分析

Fig. 5 Mechanical analysis of motion process

对种子 2 受力分析得

$$\begin{cases} p > \dfrac{-F_q\cos\alpha'_q}{\cos\alpha_q} \\ p > -\dfrac{F_q\sin\alpha'_q + G}{\sin\alpha_q} \end{cases} \tag{8}$$

式种 α_q——吸附力 p 与 x 轴正方向夹角,(°)

F_q——种子 1 对种子 2 的作用力,N

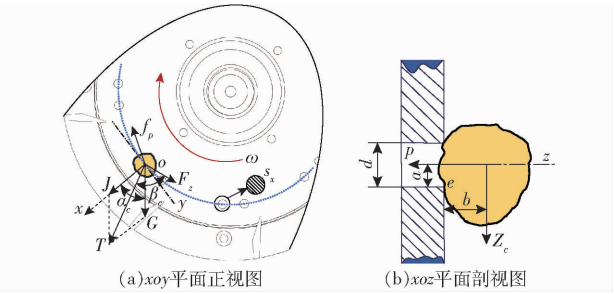
G——油莎豆种子重力,N

α'_q——作用力 F_q与 x 轴负方向夹角,(°)

由式(8)知,当种子 1 阻碍种子 2 运动时,作用

力 F_q 与 x 轴负方向夹角 α_q' 越大，沿 x 方向两个种子间重叠面积就越小，竞争就越激烈。吸附力 p 与 x 轴正方向夹角 α_q 越小，种子就越容易靠近型孔。

假设油莎豆种子质量均匀，忽略空气的阻力[21]。以单个型孔吸附的单粒油莎豆种子为研究对象，以种子质心为坐标原点，分别建立 xoy、xoz 平面，如图 6 所示。x 轴为沿种子所受离心力的方向，y 轴为与种子质心旋转运动轨迹相切同时垂直于离心力的方向，z 轴为经过种子质心且与排种盘垂直的方向，对种子充种过程进行力学分析。



(a)xoy平面正视图　　(b)xoz平面剖视图

图 6　充种过程种子受力示意图

Fig. 6　Schematics of seed stress during filling process

如图 6a 所示，为保证单个型孔能紧密吸附单粒油莎豆种子，须满足条件

$$\begin{cases} J = m\omega^2 r \\ G = mg \\ T = \sqrt{J^2 + G^2 + 2JG\cos\alpha_c} \\ r = \dfrac{D}{2} - \Delta d \\ Z_c = \sqrt{T^2 + F_z^2 + 2TF_z\cos\beta_c} \\ f_p > Z_c \end{cases} \tag{9}$$

式中　m——种子质量，kg

ω——排种盘旋转角速度，rad/s

r——排种盘型孔中心转动半径，mm

g——重力加速度，m/s^2

f_p——吸附过程中排种盘对种子的摩擦力，N

J——被吸附种子受到的离心力（其方向随着排种盘的转动而同时改变），N

α_c——种子所受离心力和重力之间的夹角，(°)

T——油莎豆种子受到离心力 J 和重力 G 之间的合力（根据力的矢量合成法，由余弦定理得出），N

F_z——种子在充种过程中受到种群对其产生的内摩擦力，N

β_c——合力 T 与内摩擦力 F_z 之间的夹角，N

Z_c——种子所受合力 T 与内摩擦力 F_z 的合力（采用余弦定理，根据力的矢量合成法得出），N

如图 6b 所示，为了保证充种过程中不掉落，种子受到的吸附力矩应大于离心力 J、重力 G、内摩擦力 F_z 三者总合力 Z_c 产生的力矩，取 a 为型孔吸附力 p 的力臂、b 为总合力 F_z 的力臂，则得到

$$\begin{cases} a = \dfrac{d}{2} \\ s_x = \dfrac{\pi d^2}{4} \\ p' = \dfrac{p}{s_x} \\ pa > Z_c b \end{cases} \tag{10}$$

式中　p'——负压气室真空度，kPa

s_x——排种盘单个型孔横截面积，mm^2

根据式(9)、(10)可得

$$\begin{cases} Z_c = \sqrt{J^2 + G^2 + 2JG\cos\alpha_c + F_z^2 + 2\sqrt{J^2 + G^2 + 2JG\cos\alpha_c}F_z\cos\beta_c} \\ p' > \dfrac{8b}{\pi d^3}\sqrt{J^2 + G^2 + 2JG\cos\alpha_c + F_z^2 + 2\sqrt{J^2 + G^2 + 2JG\cos\alpha_c}F_z\cos\beta_c} \end{cases} \tag{11}$$

取 $\cos\alpha_c = \cos\beta_c = 1$，此时真空度临界值 p_l' 最大[22]，考虑到种子颗粒间发生碰撞等内部因素，引入吸种可靠性系数 k_1；考虑工作过程中产生震动、冲击等外界环境因素，引入工作可靠性系数 k_2，代入化简公式(11)得

$$p_l' = \frac{8k_1k_2bG_{\max}}{\pi d^3}\left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} + \xi\right) \tag{12}$$

式中　ξ——种群对油莎豆种子的内摩擦阻力综合系数

$G_{\max}$——油莎豆种子最大重力，N

吸附姿态不同，b 值不同，当种子以平躺姿态吸附时，b 为种子厚度 T_y 的一半，分析得

$$p_l' = \frac{4k_1k_2T_yG_{\max}}{\pi d^3}\left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} + \xi\right) \tag{13}$$

当种子以竖直姿态吸附时，b 为种子长度 L 的一半，分析得

$$p_l' = \frac{4k_1k_2LG_{\max}}{\pi d^3}\left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} + \xi\right) \tag{14}$$

当种子以侧躺姿态吸附时，b 为种子宽度 W 的一半，分析得

$$p_l' = \frac{4k_1k_2WG_{\max}}{\pi d^3}\left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} + \xi\right) \tag{15}$$

根据上述分析取

$$p_l' = \frac{4k_1k_2L_{\max}G_{\max}}{\pi d^3}\left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} + \xi\right) \tag{16}$$

根据式(12)可得，真空度最大临界值 p_l' 与角速度 ω、转动半径 r 成正比，与型孔直径 d 成反比。柔

性毛刷可以显著提升充种区种子离散程度，以减小内摩擦阻力综合系数 ξ，降低临界值 p_l' 的同时减小风机功耗。由式(13)～(15)知，当种子以竖直姿态吸附时所需真空度最大，而以平躺姿态吸附时所需真空度最小，为使不同大小种子都能被稳定吸附，b 取种子长度 L 的一半。综合上述分析，穴播器负压气室真空度取 12～23 kPa。

3.2 携种过程力学分析

随着种子脱离种群，内摩擦阻力 F_z 消失，此时种子受到重力 G、离心力 J 和排种盘对种子的摩擦力 f_p 共同作用处于平衡状态，如图 7 所示。

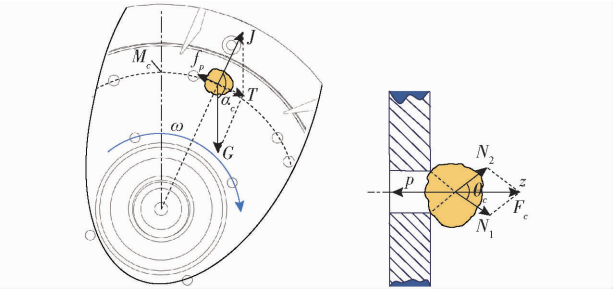


图 7 携种过程种子受力分析示意图

Fig. 7 Schematics of seed stress analysis in seed carrying process

此时种子被型孔完全吸附，需满足受力条件

$$\begin{cases} F_c = p = \sqrt{N_1^2 + N_2^2 + 2N_1N_2\cos\theta_c} \\ f_p = \mu_c F_c \\ T = \sqrt{G^2 + J^2 + 2JG\cos\alpha_c} \\ J = m\omega^2 r \\ G = mg \\ f_p > T \end{cases} \tag{17}$$

式中 N_1、N_2——型孔对种子的作用力，N

θ_c——N_1、N_2 之间夹角，(°)

F_c——N_1、N_2 的合力(根据力的矢量合成法，由余弦定理得出)，N

μ_c——排种盘和种子之间摩擦因数

根据式(17)得

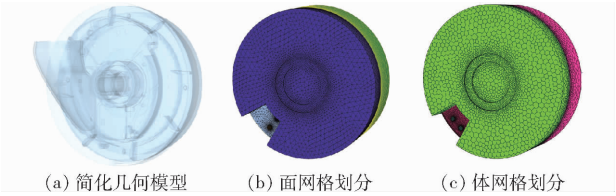
$$p > \frac{\sqrt{m(mg^2 + m\omega^4 r^2 + 2mg\omega^2 r\cos\alpha_c)}}{\mu_c} \tag{18}$$

根据以上分析可得，离心力 J 和重力 G 在同一条竖直线上(方向相反)时所需要的型孔吸附力最小，在经过排种盘点 M_c(排种盘中心竖直线和型孔中心轨迹的交点)过程中，型孔需要的最小吸附力先减小后增大。即使取极限角度 $\cos\alpha_c = 1$，因不考虑种群对种子的内摩擦阻力，满足充种过程型孔吸附力临界值的同时也符合携种过程要求。

4 仿真试验

4.1 穴播器几何模型建立

使用 Solidworks 构建穴播器三维模型，并对其进行简化以减小计算量，提高计算效率，简化后的三维图另存为. step 格式导入 SpaceClaim 中进行内流场流体域的抽取，在 Fluent meshing 中对流体域进行网格的划分，划分后网格文件(. msh)导入 Fluent 中，进行流场分析和计算，如图 8 所示。



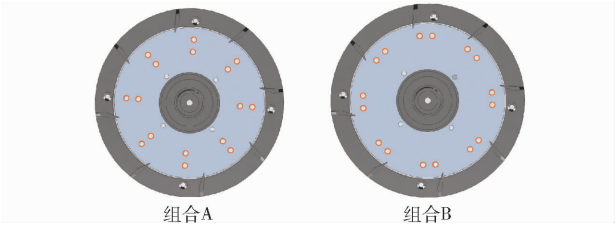
(a) 简化几何模型 (b) 面网格划分 (c) 体网格划分

图 8 穴播器仿真模型

Fig. 8 Simulation model of seed-metering device

4.2 排种盘双孔不同组合仿真分析

穴播器内流场主要由负压区、型孔、充种区 3 部分构成，本文设计了两种不同的双孔分布组合方式，组合 A 为双孔沿排种盘直径方向分布，组合 B 为双孔沿排种盘圆周方向分布，如图 9 所示。



组合A 组合B

图 9 型孔分布方式

Fig. 9 Pattern of hole distribution

采用 Fluent 对两种型孔分布方式进行内流场仿真模拟，选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，设置进口压力为 0 kPa、出口压力为 -20 kPa，选用混合初始化后进行仿真试验[23]。截取负压气室流体域中间平面分析不同分布方式对内流场气压的影响。经过试验，最终以靠近充种区一侧的负压区流体域平面为参考，确定在距离该平面 1.4 mm 处的横截面 E 进行流场速度的分析，不同型孔组合负压气室中间截面和截面 E 流体压力、流速仿真分析结果如图 10、11 所示。

由图 10 静压云图分析得，组合方式 B 负压气室内压力分布较为均匀，型孔对气室压力扩散干扰较小，而组合方式 A 靠近出口处出现单独孤立小型气块，负压气室压力的减弱和阶梯型分布较为明显；从动压云图分析得，组合方式 B 型孔附近压力扰动较小，气室内压力较为均匀，而组合方式 A 中心处压力呈爪型分布，一定程度加重气室内压力的紊乱；从总压云图分析得，组合方式 A 零星不均匀小气块较

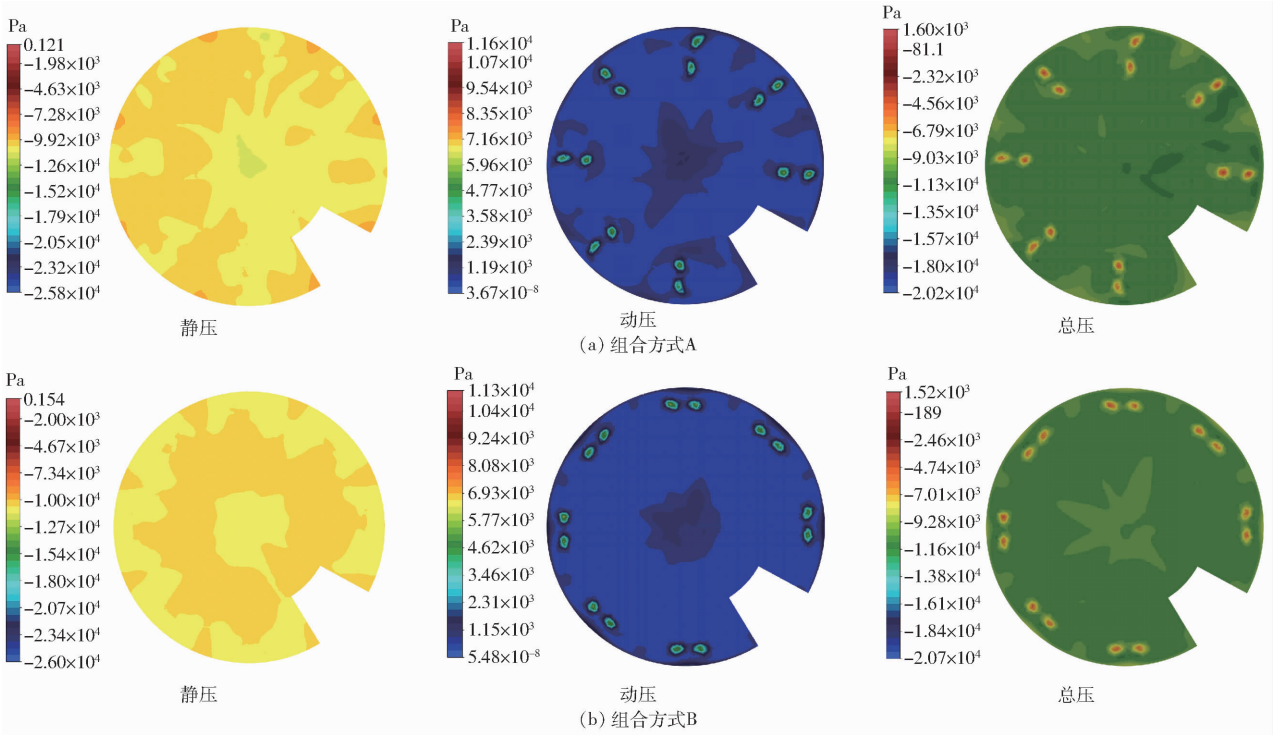


图 10　组合方式 A、B 穴播器负压气室中间截面压力云图

Fig. 10　Pressure contour diagrams of middle section of negative pressure air chamber of seed-metering device with two combinations of suction holes A and B

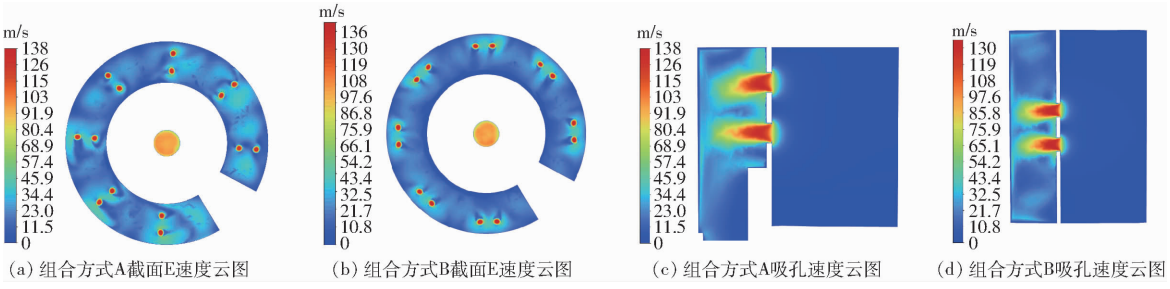


图 11　组合方式 A、B 穴播器负压气室 E 截面和吸孔速度云图

Fig. 11　Velocity clouds of negative pressure chamber E cross-section of seed-metering device with different combinations of suction holes A and B

多，气室整体压力分布杂乱，圆形气室边缘压力阶梯状分布较组合方式 B 更加明显。组合方式 A 会加大对吸附种子的扰动，造成型孔处种子的不稳定吸附甚至脱落。

由图 11a、11b 可知，负压气室截面 E 型孔位置气流速最大，组合方式 A 气流整体分布较不均匀，特别两组型孔之间的气流扰动较大，回流和旋涡现象较为明显，而组合方式 B 型孔周边气流扩散速度较为一致，对种子吸附干扰较小。

以型孔编号 7、8 的型孔组合（图 12）为研究对象，截取垂直于负压气室并经过此组型孔圆心的平面进行流场速度分析，如图 11c、11d 所示，可得型孔与充种室相连一端速度较小，与真空室相连一端速度较大。组合方式 B 双孔内流速分布几乎保持一致，而组合方式 A 双孔流场流速有显著差别，靠近负压气室圆周边缘型孔沿其速度衰减较快，这种差异导致双孔产生不同的吸附需求，吸附条件的不一致可能导致吸种失败。

为进一步探究组合方式 A、B 不同型孔速度波动，对 8 组 16 个型孔进行编号，如图 12a、12b 所示，除了流速为零的两个型孔，其余 14 个型孔按顺时针进行编号，选取靠近充种室一侧的型孔端面，依次进行表面积加权平均，得到平均流速，如图 12c 所示，可得组合方式 A 型孔吸种面的速度波动较大，其速度分布主要集中在 89.5 ~ 97.0 m/s。而组合方式 B 型孔吸种面速度分布主要集中在 93.5 ~ 97.5 m/s，其速度波动较小，且整体来看组合方式 B 型孔端面速度略大于组合方式 A，有利于增加穴播器工作过程中吸种的可靠性，综合上述分析最终选取组合方式 B。

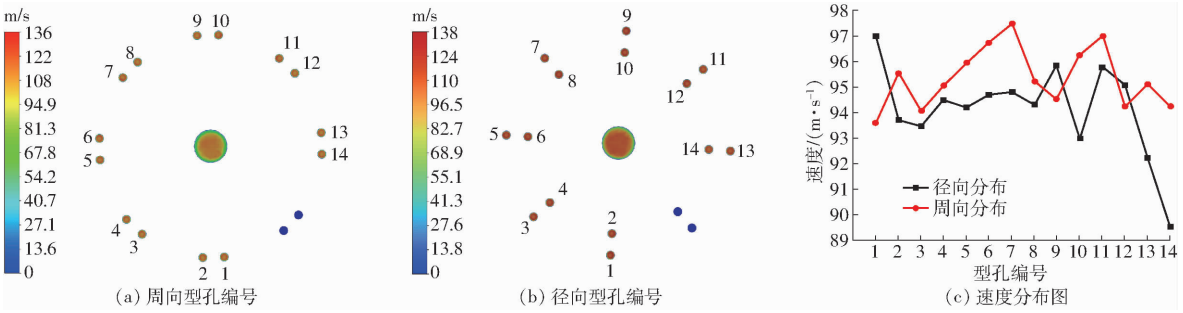


图 12 组合方式 A、B 不同型孔编号速度变化曲线

Fig. 12 Velocity curves for different bore numbers in two combinations of A and B

5 台架试验

为进一步验证气吸式油莎豆穴播器可靠性，选取世和油莎豆种子，利用 STB－700 型穴播器性能试验台进行台架试验，如图 13 所示。

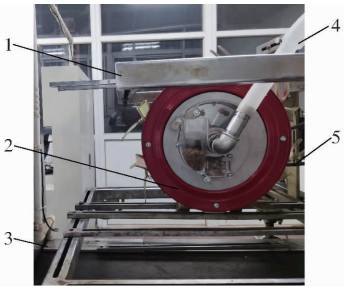


图 13 排种试验装置

Fig. 13 Seed metering test device

1. 安装架 2. 穴播器 3. 试验台 4. 负压气管 5. 链条传动装置

5.1 单因素试验

选取对排种性能影响较大的 3 个因素：排种盘转速、气室负压、型孔直径，根据 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》要求，对其进行单因素试验。根据前期预试验，在设定负压为 19.8 kPa、型孔直径为 6.8 mm 的工况下，选取转速分别为 25.5、30、34.5、39、43.5 r/min，试验结果如图 14 所示，因排种盘转速为 29.5 ~ 39.5 r/min 时，合格指数在 85% 以上，故确定排种盘转速为 29.5 ~ 39.5 r/min。

控制排种盘转速为 34.5 r/min、型孔直径为 6.8 mm 工况下，选择负压分别为 18.2、19、19.8、20.6、21.4 kPa，试验结果如图 15 所示，因负压为 18.8 ~ 20.8 kPa 时，其合格指数在 88% 以上，故穴播器负压选择 18.8 ~ 20.8 kPa。

5.2 二次回归旋转正交组合试验

以排种盘转速 x_1、气室负压 x_2、型孔直径 x_3 为自变量，合格指数 Y_1、漏播指数 Y_2、重播指数 Y_3 作为因变量，进行三因素五水平二次回归旋转正交组合试验，X_1、X_2、X_3 为排种盘转速、气室负压、型孔直径编码值。试验因素编码如表 2 所示，试验方案和结果如表 3 所示。

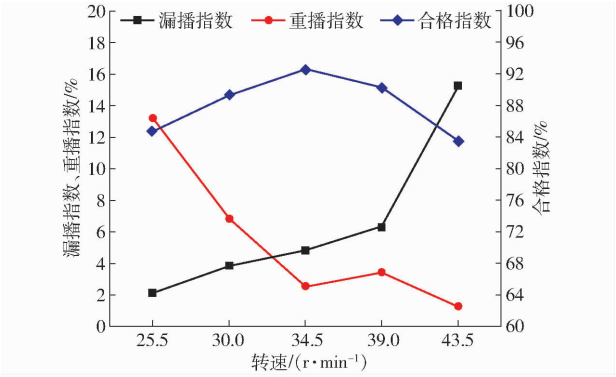


图 14 不同转速试验曲线

Fig. 14 Test curves at different speeds

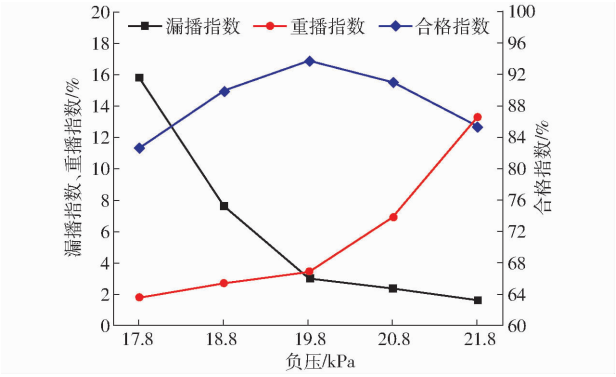


图 15 不同负压试验曲线

Fig. 15 Test curves with different negative pressures

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	排种盘转速 x_1/(r·min⁻¹)	气室负压 x_2/kPa	型孔直径 x_3/mm
－1.682	26.93	18.96	5.12
－1	30.00	19.30	5.80
0	34.50	19.80	6.80
1	39.00	20.30	7.80
1.682	42.07	20.64	8.48

应用 Design-Expert 10.0 软件对试验结果进行回归分析[24]，得到排种盘转速 X_1、气室负压 X_2、型孔直径 X_3 与合格指数 Y_1、漏播指数 Y_2、重播指数

表 3　试验方案设计与结果

Tab. 3　Experimental design and results

试验序号	因素			合格指数	漏播指数	重播指数
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	-1	-1	-1	83.96	12.96	3.08
2	1	-1	-1	82.17	17.83	0
3	-1	1	-1	84.52	7.92	7.56
4	1	1	-1	84.15	10.31	5.54
5	-1	-1	1	86.42	9.07	4.51
6	1	-1	1	82.41	15.58	2.01
7	-1	1	1	87.89	0.41	11.70
8	1	1	1	86.93	4.49	8.58
9	-1.682	0	0	86.31	3.42	10.27
10	1.682	0	0	83.25	15.43	1.32
11	0	-1.682	0	84.64	13.02	2.34
12	0	1.682	0	86.23	3.65	10.12
13	0	0	-1.682	84.04	12.75	3.21
14	0	0	1.682	85.22	3.07	11.71
15	0	0	0	92.96	3.57	3.47
16	0	0	0	91.52	7.36	1.12
17	0	0	0	93.72	2.89	3.39
18	0	0	0	94.87	0	5.13
19	0	0	0	92.61	4.83	2.56
20	0	0	0	94.83	1.19	3.98

Y_3之间的回归方程，方差分析结果如表 4 所示。

由表 4 可得，方程拟合效果均极显著（$P<0.01$），而回归模型失拟项 P 值均大于 0.05，不显著，其它影响因素对指标的影响较小。进一步分析不同因素对合格指数 Y_1的影响，X_1X_2、X_1X_3、X_2X_3的 P 值均大于 0.05，说明其影响不显著，而其余项皆显著，去除不显著因素，建立回归方程为

$$Y_1 = 93.41 - 0.9X_1 + 0.82X_2 + 0.79X_3 - 2.98X_1^2 - 2.74X_2^2 - 3.03X_3^2 \tag{19}$$

进一步分析不同因素对漏播指数 Y_2的影响，X_1X_2、X_1X_3、X_2X_3的 P 值均大于 0.05，说明其影响不显著，而其余项皆显著，排除不显著因素，得到回归方程为

$$Y_2 = 3.28 + 2.79X_1 - 3.52X_2 - 2.62X_3 + 2.36X_1^2 + 1.98X_2^2 + 1.83X_3^2 \tag{20}$$

进一步分析不同因素对重播指数 Y_3的影响，X_1、X_2、X_3、X_3^2 的 P 值均小于 0.05，说明其影响显著，而其余项皆不显著，剔除不显著因素，建立回归方程为

$$Y_3 = 3.32 - 1.89X_1 + 2.7X_2 + 1.82X_3 + 1.2X_3^2 \tag{21}$$

表 4　回归方程方差分析

Tab. 4　Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	341.27	9	30.36	<0.000 1 **	534.53	9	12.1	0.000 3 **	225.09	9	9.25	0.000 9 **
X_1	11.04	1	8.83	0.014 *	106	1	21.6	0.000 9 **	48.63	1	17.99	0.001 7 **
X_2	9.19	1	7.36	0.021 8 *	169.19	1	34.48	0.000 2 **	99.51	1	36.81	0.000 1 **
X_3	8.6	1	6.88	0.025 5 *	93.58	1	19.07	0.001 4 **	45.45	1	16.81	0.002 1 **
X_1X_2	2.5	1	2	0.187 7	3.01	1	0.614 2	0.451 4	0.024 2	1	0.009	0.926 5
X_1X_3	0.987	1	0.790 2	0.394 9	1.39	1	0.282 5	0.606 7	0.033 8	1	0.012 5	0.913 2
X_2X_3	1.49	1	1.19	0.300 7	6.46	1	1.32	0.277 8	1.75	1	0.646 7	0.440 0
X_1^2	127.61	1	102.16	<0.000 1 **	80.46	1	16.4	0.002 3 **	5.41	1	2	0.187 4
X_2^2	108.52	1	86.88	<0.000 1 **	56.35	1	11.48	0.006 9 **	8.47	1	3.13	0.107 1
X_3^2	132.2	1	105.83	<0.000 1 **	48.11	1	9.81	0.010 7 *	20.81	1	7.7	0.019 6 *
残差	12.49	10			49.07	10			27.03	10		
失拟	3.83	5	0.442 7	0.804	14.66	5	0.426 1	0.814 6	17.89	5	1.96	0.239 6
误差	8.66	5			34.41	5			9.14	5		
总和	353.76	19			583.59	19			252.12	19		

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

5.3　参数优化和验证

为了确定穴播器最佳工作参数组合，以排种盘转速、气室负压、型孔直径为自变量，以合格指数、漏播指数、重播指数为评价指标，通过 Design-Expert 10.0 的优化模块进行多目标优化求解，目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_3(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 30\ \text{r/min} \leqslant x_1 \leqslant 39\ \text{r/min} \\ 19.3\ \text{kPa} \leqslant x_2 \leqslant 20.3\ \text{kPa} \\ 5.8\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 7.8\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

计算得最优参数组合为：排种盘转速 34.3 r/min、负压 19.79 kPa、型孔直径 6.83 mm，此时合格指数预测值最高，漏播指数和重播指数预测值最低，分别为 93.45%、3.14%、3.41%。

为验证优化后结果的准确性，在相同条件下，选取求得的最优参数组合进行台架验证试验，试验重复 3 次，统计各评价指标平均值作为验证试验结果，得到合格指数为 92.1%、漏播指数为 3.63%、重播指数为 4.27%，验证试验与上述优化结果基本符合，满足穴播器作业和设计要求。

6 结论

(1)设计了一种双孔并行气吸式油莎豆精量穴播器，详细阐述了其整体结构和基本工作原理，确定了关键部件结构和参数，排种盘直径为 198 mm、鸭嘴数量为 8 个、型孔数量共 8 组 16 个，并通过理论分析验证了结构的合理性。

(2)对穴播器充种、携种过程中种子进行动力学分析，设计排种盘双孔两种不同组合方式，并采用 Fluent 对组合方式 A、B 不同位置流场压力和速度进行分析计算，发现组合方式 B 气室压力分布均匀、型孔气流速度波动较小，并确定其为最优组合设计。

(3)以排种盘转速、气室负压、型孔直径为试验因素，以合格指数、漏播指数、重播指数为评价穴播器播种性能指标，进行三因素五水平二次正交旋转组合试验，优化后得到最佳参数组合为：排种盘转速 34.3 r/min、负压 19.79 kPa、型孔直径 6.83 mm，对此组合进行台架验证，结果为：合格指数 92.1%、漏播指数 3.63%、重播指数 4.27%，试验验证结果和优化结果基本一致，满足了精量穴播试验要求。

参 考 文 献

[1] 郭婷婷，万楚筠，黄凤洪，等. 油莎豆主要营养成分及生理功能研究进展[J]. 中国油料作物学报，2021，43(6)：1174－1180.
GUO Tingting, WAN Chuyun, HUANG Fenghong, et al. Research progress on the main nutritional components and physiological functions of tiger nut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(6): 1174－1180. (in Chinese)

[2] MADUKA N, IRE F S. Tigernut plant and useful application of tigernut tubers (*Cyperus esculentus*)—a review[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2018, 29(3): 1－23.

[3] 丁力，豆宇飞，王万章，等. 组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：100－115.
DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 100－115. (in Chinese)

[4] 丁力，郭海钦，王万章，等. 油莎豆窝眼排种轮低位集穴排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(10)：86－97.
DING Li, GUO Haiqin, WANG Wanzhang, et al. Design and test of *Cyperus esculentus* cell-wheel seed-metering device with low-position seeding and cavitation function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 86－97. (in Chinese)

[5] 卢玉伦，江景涛，何晓宁，等. 油莎豆窝眼轮式排种器设计与试验[J]. 农机化研究，2023，45(2)：156－163.
LU Yulun, JIANG Jingtao, HE Xiaoning, et al. Design and test of the wheel-type seed metering device of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 156－163. (in Chinese)

[6] 江景涛，卢玉伦，王东伟，等. 4 种机械式油莎豆排种器的对比试验与分析[J]. 农机化研究，2024，46(5)：165－169.
JIANG Jingtao, LU Yulun, WANG Dongwei, et al. Contrastive test and analysis of four types of mechanical seed metering devices for *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(5): 165－169. (in Chinese)

[7] 王佳奇，彭飞，姜彩宇，等. 油莎豆排种器的试验研究[J]. 江西农业学报，2022，34(10)：155－161.
WANG Jiaqi, PENG Fei, JIANG Caiyu, et al. Experimental research on seed metering device for *Cyperus esculentus*[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(10): 155－161. (in Chinese)

[8] 曹秀龙，马旭，李宏伟，等. 气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(2)：51－60.
CAO Xiulong, MA Xu, LI Hongwei, et al. Design and experiments of pneumatic roller type precision seed-metering device for rapeseed plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 51－60. (in Chinese)

[9] 李辉，赵武云，石林榕，等. 种群直流舀种式胡麻精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：202－214.
LI Hui, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of precision burrow planter for flax with direct current scooping type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 202－214. (in Chinese)

[10] 胡梦杰，内充气力式棉种精密排种器设计与仿真分析[D]. 武汉：华中农业大学，2022.
HU Mengjie. Design and simulation analysis of inside-filling pneumatic precision seed-metering device for cotton seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[11] 高筱钧，徐杨，张东兴，等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2019，35(23)：9－20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9－20. (in Chinese)

[12] 苏微，赵庆辉，赖庆辉，等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(7)：144－155.
SU Wei，ZHAO Qinghui，LAI Qinghui，et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(7)：144－155.（in Chinese）
[13] ABDOLAHZARE Z，MEHDIZADEH S A. Nonlinear mathematical modeling of seed spacing uniformity of a pneumatic planter using genetic programming and image processing[J]. Neural Computing and Applications，2018，29(2)：363－375.
[14] GAO Xiaojun，XIE Guanfu，LI Jiang，et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed metering device for maize[J]. Biosystems Engineering，2023，227：161－181.
[15] 丁力，杨丽，武德浩，等. 基于 DEM－CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(11)：48－57.
DING Li，YANG Li，WU Dehao，et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM－CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(11)：48－57.（in Chinese）
[16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2007.
[17] 李骅，马云龙，於海明，等. 群组吸孔气吸式芹菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：87－95.
LI Hua，MA Yunlong，YU Haiming，et al. Design and experiment of group air-suction type celery seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：87－95.（in Chinese）
[18] WANG Lijun，ZHANG Shuai，GAO Yunpeng，et al. Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD－DEM simulation[J]. Powder Technology，2023，419：118332.
[19] 陈永，高晓勋，金鑫，等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：58－69.
CHEN Yong，GAO Xiaoxun，JIN Xin，et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(12)：58－69.（in Chinese）
[20] FENG Xin，GONG Zhenping，WANG Lijun，et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology，2021，385：501－516.
[21] 丁力，杨丽，张东兴，等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报，2021，52(7)：40－50.
DING Li，YANG Li，ZHANG Dongxing，et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(7)：40－50.（in Chinese）
[22] 杨薇，方宪法，李建东，等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(6)：64－73.
YANG Wei，FANG Xianfa，LI Jiandong，et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(6)：64－73.（in Chinese）
[23] 周仁义，气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[D]. 长春：吉林大学，2021.
ZHOU Renyi. Design and experiment of air suction soybean high speed and precision seed metering device[D]. Changchun：Jilin University，2021.（in Chinese）
[24] 葛宜元，梁秋艳，王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2015.

（上接第 212 页）

[23] XU J，SUN S L，HE Z K，et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM－CFD[J]. Biosystems Engineering，2023，230：277－300.
[24] 牛媛媛，徐铭辰，陈海涛，等. 2BMFJ－6 型麦茬地大豆免耕覆秸播种机适应性研究[J]. 大豆科学，2015，34(3)：497－502.
NIU Yuanyuan，XU Mingchen，CHEN Haitao，et al. Study on the adaptability of 2BMFJ－6 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[J]. Soybean Science，2015，34(3)：497－502.（in Chinese）
[25] 徐源. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计及其防粘技术研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2018.
XU Yuan. Three-directional adjustable V-type soil-covered roller design and research on anti-sticky technology[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2018.（in Chinese）
[26] 孙雪松. 马铃薯播种机螺旋推进式排肥器的研究与试验[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2015.
SUN Xuesong. Research and experiment on screw-propelled fertilizer discharger for potato planter[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2015.（in Chinese）
[27] 王韦韦. 麦秸覆盖地玉米免耕播种机秸秆壅堵机理与防堵技术研究[D]. 合肥：安徽农业大学，2019.
WANG Weiwei. Study on blocking mechanism and anti-blocking technology of maize no-tillage used wheat straw returned field[D]. Hefei：Anhui Agricultural University，2019.（in Chinese）