DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.014

基于离散元的无人机撒播装置设计与优化

边晓东[1, 2]，樊成赛[3, 4]，陈长卿[1, 2*]，余洪锋[3, 4]，郑涛[1, 2]

（1. 金华市农业科学研究院，浙江金华，321017；2. 金华市丘陵山区适用农机重点实验室，浙江金华，321017；3. 南京农业大学，江苏南京，210095；4. 江苏省智能化农业装备重点实验室，江苏南京，210095）

摘要：针对丘陵地区人均耕地面积少，且土地比较分散，地形崎岖，大型农机作业效率低，甚至无法工作，小型农机有时也使用不方便的实际问题，基于无人机技术，设计了一种槽轮—撒种盘相结合的撒种装置。给出了槽轮—撒种盘相结合的撒种装置设计思路与优化仿真方案，以水稻种子为研究对象，基于离散元方法，用基础单元颗粒对水稻种子进行建模，利用离散元软件EDEM对撒种装置的排种过程进行模拟，主要理论分析撒种盘结构，发现撒种盘偏角、转速显著影响水稻种子在撒种盘上的分布，扇叶数量显著影响水稻种子在空气中的分布。为实现均匀撒播，借助离散元方法，以偏角、转速和扇叶数量为指标，设计了以撒种盘转速、扇叶偏角、扇叶数的3因素3水平的正交试验。仿真结果表明，最终优化得到撒种盘转速850 r/min、偏角50°、扇叶数为5个，其一致性变异系数为12.99%。验证试验分别针对飞行高度、播种量和飞行速度进行3组测试，结果显示实际分布变异系数最大值为24.25%，最小值为15.42%，飞行高度、播种量和飞行速度3个因素对应的水稻分布变异系数平均值分别为17.83%、20.90%、18.55%，基本能达到水稻飞播的农艺要求。通过对槽轮—撒种盘相结合的撒种装置的结构参数、离散元仿真和验证试验的研究分析，确定了槽轮—撒种盘相结合的撒种装置工作性能的最优参数，这些参数为飞机直播的研究以及在丘陵地区的实际应用打下了基础。

关键词：丘陵山区；无人机；水稻；撒播；槽轮；离散元仿真

中图分类号：S223 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2026）01-0136-09

边晓东，樊成赛，陈长卿，余洪锋，郑涛. 基于离散元的无人机撒播装置设计与优化[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(1)：136－144

BIAN Xiaodong, FAN Chengsai, CHEN Changqing, YU Hongfeng, ZHENG Tao. Design and optimization of a drone sowing device based on discrete element method [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 136－144

0 引言

随着现代农业技术的飞速发展，无人机作为智能化、高效化的农业作业工具，正逐步改变着传统农业的面貌。特别是在复杂地形如丘陵山地中，无人机凭借其卓越的机动性和灵活性，展现出了无可比拟的优势[1-2]。这些区域往往地面农机难以涉足，不仅作业效率低下，而且成本高昂，甚至在某些陡峭或狭窄地带，传统农机根本无法进入，严重制约了农业生产力的提升[3]。无人机技术的应用，无疑为解决这一难题提供了创新思路。通过空中作业，无人机能够轻松跨越地形障碍，实现精准、快速播种、施肥等作业[4-5]，极大地提高了农业生产效率，尤其是在抢抓农时、应对自然灾害等方面，无人机的作用更加凸显。近年来，国内外针对无人机播种技术的研究不断深入，显示出广泛的应用潜力。在国外，如荷兰和以色列等国，研究重点主要集中在无人机播种系统的设计、作物适应性以及与地面农业机械的协同作业[6-7]。而在国内，无人机播种技术的研究逐渐增多，重点探索了无人机在不同地形、土壤条件下的播种效果以及播种技术的优化[8-9]。这些研究不仅提高了播种的精度和效率，还为传统农业的转型升级提供了新的技术路径。

尽管无人机在农业播种领域的应用前景广阔，但当前的技术实践仍面临一系列挑战，其中最为突出的便是播种均匀性的问题。均匀性直接关系到作物的生长密度、养分吸收及最终产量，是评价播种质量的关键指标[10]。然而，无人机在撒播过程中，受风速、飞行高度、种子类型及重量、撒播装置设计等多种因素影响，

收稿日期：2024-10-24 修回日期：2024-12-31

基金项目：金华市农业类重点科技项目(2020-2-031)

第一作者：边晓东，男，1992年生，浙江金华人，硕士，工程师；研究方向为农业装备自动化技术。E-mail：935442749@qq.com

*通信作者：陈长卿，男，1980年生，贵州遵义人，正高级工程师；研究方向为现代农业技术装备。E-mail：496533235@qq.com

往往难以保证种子能够均匀、准确地落在预定位置。特别是在丘陵山地等复杂地形，地形起伏、风向多变进一步加剧了这一难题。此外，无人机撒播装置的设计也直接影响到种子的分散效果和落地精度，现有的撒播装置大多基于简单的机械式或气压式原理，缺乏智能化调控能力，难以适应不同作物、不同环境条件下的精准作业需求。这些问题不仅影响了无人机播种技术的推广应用，也限制了其在提高农业生产效率和促进农业现代化进程中的潜力发挥。

为此，研究了无人机撒播装置的排种槽轮转速、撒种盘大小及其转速等因素对播种均匀性的影响，详细设计了撒种盘的扇叶偏角、个数等参数，利用离散元仿真技术，建立水稻—机械的离散元模型，模拟不同作业参数下种子的运动轨迹和落点分布，以探究它们对种子在盘上运动轨迹的影响。模型中设计正交试验，系统研究排种槽轮转速、撒种盘转速、撒种盘扇叶参数等对播种均匀性的影响，优化得到最优的撒播参数组合。基于仿真优化的结果，选取最优参数组合进行试验验证。通过实际作业，观察种子的落点分布、播种均匀性等情况，最终确定无人机撒播装置的最优机械结构和作业参数，以期实现播种均匀性的显著提升。

1　撒种盘理论设计

1.1　撒播装置工作原理

小型无人机水稻撒播装置主要由种箱、排种器、撒播器组成[11]，其结构如图 1 所示。

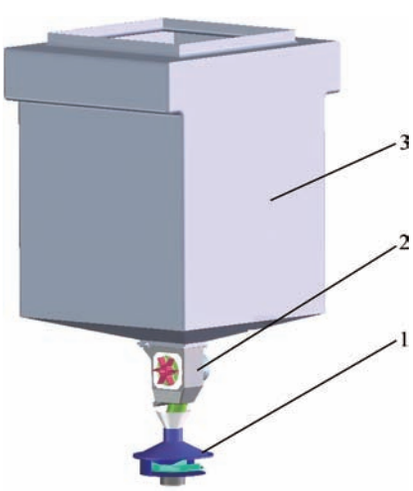


图 1　离心式撒播装置结构图

Figure 1　Structural diagram of centrifugal sowing device

1. 撒播器　2. 排种器　3. 种箱

利用无线遥感远程控制减速电机的转动来带动排种器旋转，排种器转动起来后，种子会从出种口流出，因此控制排种器转速即可控制出种量。撒播器位于出种口正下方，当种子进入撒播器时，落下来的种子会撞到旋转的甩盘，种子会受到旋转产生的离心力而甩开，并受到重力撒到地面，撒播器可以避免种子甩得太远，从而使种子的落点稳定在一个范围中，使种子到达地面上可以达到相对均匀的状态，完成整个水稻直播。

种箱由种箱固定件与无人机连接；排种器采用外槽轮式结构，通过控制外槽轮电机转速和预先标定旋转一圈所下的物料量，实时控制撒播装置的出口流量。为了实现出口流量的随速控制，本研究依据式(1)进行控制。

$$n=\frac{M(t)Bv(t)}{600R} \tag{1}$$

式中：$M(t)$——单位面积播量，kg/hm^2；

$v(t)$——速度，km/h；

B——播撒幅宽，m；

R——旋转一圈所下的物料量，kg/(r·min^{-1})；

n——转速，r/min。

撒播器位于出种口正下方，撒播装置工作时，由外槽轮式排种器排出水稻种子，在重力的作用下，由上盖的进种口进入，落在离心圆盘的中心处。离心盘通过法兰安装在电机上，由电机驱动离心盘旋转带动种子转动，种子在离心力的作用下，沿着离心盘的扇叶向四周飞出形成均匀的种子，通过优化扇叶结构参数可有在地面较为均匀分布，结构如图 2 所示。

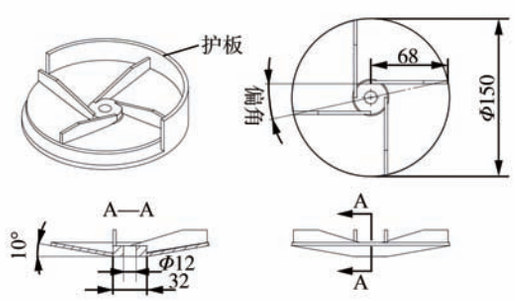


图 2　撒种盘结构图

Figure 2　Structure diagram of sowing tray

1.2　种子在离心圆盘上的运动学分析

离心式排种器是利用离心盘的旋转产生的离心力使落入撒播装置中的种子形成种子流，并均匀地进入各分配室中，达到分配效果。其影响种子分配效果的主要参数为离心盘的转速与扇叶数量[12]。

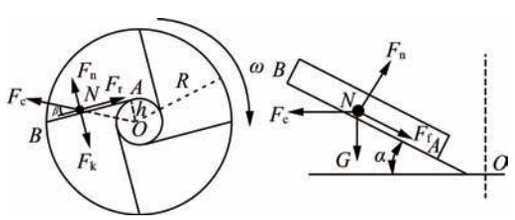


图 3　种子颗粒在离心盘上的运动分析

Figure 3　Motion analysis of seed particles on a centrifugal disk

种子颗粒的运动分析如图3所示,离心盘上的扇叶与离心盘呈垂直状态,以离心盘为参考坐标系,则种子颗粒在离心圆盘上沿着扇叶做直线运动。其中:V_r为种子相对于离心盘的速度,V_e为牵连速度,V_a为绝对速度,A点处半径为R_1,m;B点处半径为R_2。

种子颗粒在AB方向的受力平衡方程为:

$$F = F_c \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta - G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta - F_f \tag{2}$$

种子颗粒受到的合力为:

$$F = m\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2}\cos\beta \tag{3}$$

种子颗粒受到的离心力为:

$$F_c = m\omega^2 r \tag{4}$$

种子颗粒受到的重力为:

$$G = mg \tag{5}$$

种子颗粒受到的摩擦力为:

$$F_f = \mu_1(G \cdot \cos\alpha + F_c \cdot \sin\alpha) + \mu_2\left(G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta + F_k - F_c \cdot \sin\beta\right) \tag{6}$$

式中:μ_1——种子颗粒与撒种圆盘间的摩擦系数;

μ_2——种子颗粒与叶片间的摩擦系数。

叶片与撒种圆盘材料一致,则$\mu_1=\mu_2=\mu$。

种子颗粒受到的科氏力为:

$$F_k = 2m\omega\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

种子颗粒与撒种圆盘间的角度为:

$$\beta = \arcsin\frac{h}{r} \tag{8}$$

则种子颗粒在撒种圆盘上的运动方程为:

$$\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2}\cos\beta + 2\omega\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} - \omega^2 r(\cos\alpha \cdot \cos\beta - \mu\sin\alpha - \mu\sin\beta) + g(\sin\alpha \cdot \cos\beta + \mu\cos\alpha - \mu\sin\alpha \cdot \sin\beta) = 0 \tag{9}$$

式中:F——种子颗粒受到的合力,N;

F_c——种子颗粒受到的离心力,N;

G——种子颗粒受到的重力,N;

F_f——种子颗粒受到的摩擦力,N;

α——撒种圆盘锥角,(°);

β——叶片偏角,(°);

r——种子颗粒与撒种圆盘旋转轴心间的距离,mm;

ω——撒种圆盘转速,rad/s;

h——叶片与撒种圆盘旋转中心点O间的距离,mm。

由式(9)可知,种子颗粒在撒种圆盘上的运动状态与撒种圆盘转速、撒种圆盘锥角、扇叶偏角有关。种子颗粒离开撒种圆盘的速度与撒种圆盘的转速和结构有关。当种子移动到圆盘边缘时,$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$也就是离开圆盘的初速度$V_0$。下文将以$V_0$为初始速度分析颗粒在空气中的运动状态。

1.3 种子颗粒在空气中的运动分析

种子颗粒以一定速度离开撒种圆盘后,在空气中做斜抛运动,最终落至地面,完成撒种作业。如图4所示,建立种子颗粒在空气中的运动模型。O为撒种圆盘中心在地面上的投影;R为撒种圆盘直径;L为种子颗粒在水平方向的位移;H为种子颗粒在竖直方向的位移;V_0为种子颗粒离开撒种圆盘时的速度;V_x为V_0在x方向的分量;V_y在y方向的分量;α为圆盘锥角;G为种子颗粒受到的重力。

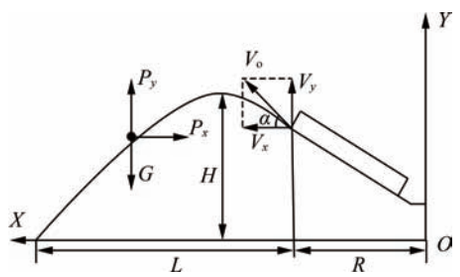


图4 种子颗粒在空气中的运动

Figure 4 The movement of seed particles in the air

种子颗粒在x方向的受力方程为:

$$m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = -P \cdot \cos\alpha \tag{10}$$

种子颗粒在y方向的受力方程为:

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = G - P \cdot \sin\alpha \tag{11}$$

则种子颗粒在空气中的运动方程为:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = -\dfrac{C_r \rho_a A}{2m} V_x \sqrt{{V_x}^2 + {V_y}^2} \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = g - \dfrac{C_r \rho_a A}{2m} V_y \sqrt{{V_x}^2 + {V_y}^2} \end{cases} \tag{12}$$

种子颗粒在x方向的总位移为:

$$S = L + R \tag{13}$$

式中:P——种子颗粒受到的空气阻力,N;

ρ_a——空气密度,kg/m^3;

C_r——马格努斯系数;

v——种子颗粒的速度,m/s;

A——种子颗粒的迎风面积,mm^2;

L——种子颗粒水平方向的位移,mm;

R——撒种圆盘半径,mm;

S——种子颗粒沿x方向的总位移,mm。

种子颗粒在空气中的运动状态以及落地的距离主要与种子离开撒种盘的初速度相关,空气的阻力系数客观存在不可改变。本研究将优化撒种盘结构参数以

期获得更优的均匀性。其中撒种圆盘锥角和圆盘半径由于安装位置限制已经确定。种子均匀性与叶片偏角β、撒种圆盘转速ω，以及撒种圆盘离地高度有关，被抛洒的种子在空中形成一条弧形，扇叶的数量影响种子弧的密度，进而影响水稻种子的断条率。圆盘的离地高度与无人机飞行高度相关，将在田间试验中研究。

2　仿真试验优化

由理论分析发现，影响水稻种子撒播均匀度的因素较多。仿真试验将以扇叶个数、扇叶偏角和圆盘转速为因素，在仿真实验中优化得到最优参数。后续将播量、撒种盘离地高度和无人机的飞行速度作为因素在验证试验中讨论，预期验证所设计撒肥盘的适应性。

2.1　仿真参数确定

仿真试验用到的材料有两种，分别为塑料材料与水稻材料，其参数又分为本征参数：泊松比、直径、密度、剪切模量等；接触参数包括水稻之间的滑动摩擦系数、静摩擦系数、碰撞恢复系数，塑料材料与水稻材料之间的滑动摩擦系数、静摩擦系数以及碰撞恢复系数。这些参数通过参考文献[13－15]获得。仿真试验所用参数如表1－表2所示。

表1　EDEM仿真本征参数

Table 1　EDEM simulation intrinsic parameters

材料	本征参数	数值
塑料	泊松比	0.45
	密度/(kg·m^{-3})	1 250
	剪切模量	1.97×10^{9}
水稻	泊松比	0.25
	密度/(g·cm^{-3})	1 380
	直径/mm	3.49
	剪切模量/Pa	2.6×10^{5}

表2　EDEM仿真接触参数

Table 2　EDEM Simulation Contact Parameters

接触类型	接触参数	值
水稻－水稻	静摩擦系数	0.67
	滚动摩擦系数	0.01
	碰撞恢复系数	0.2
水稻－塑料	静摩擦系数	0.01
	滚动摩擦系数	0.58
	碰撞恢复系数	0.5

2.2　仿真环境搭建及评价指标计算方法

利用美国密歇根州Altair工程公司的EDEM2018软件进行了DEM模拟。将摊铺机的简化几何模型转换为STP格式，并导入到EDEM软件中。在撒播盘上方进种口的位置建立了一个颗粒工厂，模拟总播种量为1 000 g，整个模拟过程中播撒器和地面都保持静止。将种子颗粒与地面接触时的回收系数设为最小，将摩擦系数最大化，使颗粒在地面上的反弹和滚动最小。采用多球模型建立水稻种子，粒径固定分布。水稻长轴径为8.4 mm、短轴径为3.4 mm。由于水稻安全贮藏水分的最高限度大约为12%，其含水率低，种子颗粒间的黏附力可忽略，因此水稻颗粒接触模型选用Hertz-Mindlin(noslip)。颗粒工厂中期望每秒生成个数设置为800，仿真时间设置为10 s，仿真时间步长设置为Rayleigh时间步长的30%，网格尺寸设置为3 Rmin(最小颗粒半径)，设定好参数的仿真环境如图5所示。

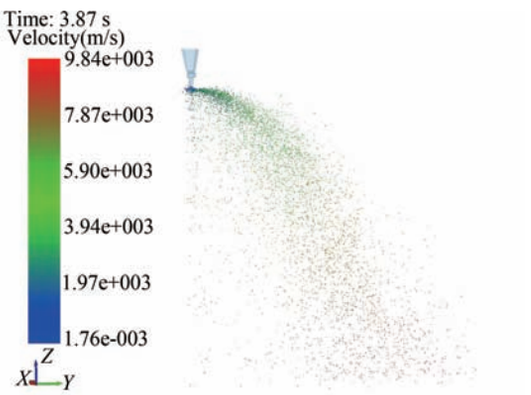


图5　水稻种子仿真环境

Figure 5　Simulation environment for rice seeds

EDEM软件对排种器充种过程进行仿真分析(图6)后，通过其自带的数据采集功能。利用网格将地面上的种子颗粒组织成网格，并将每个网格内的种子量标示出来，得到二维的撒布分布。地面面积(16 m×8 m)被细分为32列，网格尺寸为0.5 m×8 m。采用航路模拟叠加法[16]，在两侧反射一维分布，模拟无人机往复飞行。叠加后，计算两个宽度内的变异系数(CV)作为指数，变异系数统计方法如图7所示。

$$CV=\frac{Std}{\bar{m}} \tag{14}$$

$$\bar{m}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}m_i \tag{15}$$

$$Std=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(m_i-\bar{m})^2} \tag{16}$$

式中：CV——变异系数；

Std——标准偏差；

$\bar{m}$——质量的平均值，g；

n——总数；

m_i——第i行的质量。

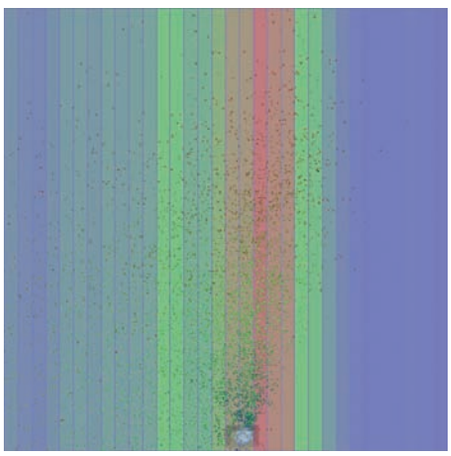


图 6 仿真结果统计方法

Figure 6 Statistical method for simulation results

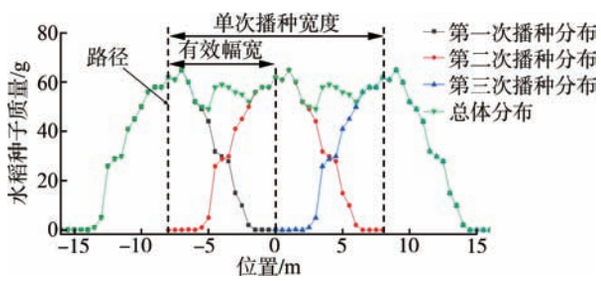


图 7 变异系数统计方法

Figure 7 Statistical method for coefficient of variation

2.3 响应面分析

2.3.1 试验因素选择

为了确定离心盘转速与扇叶数量对撒播装置分配性能的影响,利用EDEM离散元仿真技术[17-19],以各行一致性变异系数作为评价指标,进行不同转速、不同扇叶数量、不同偏角对撒播装置性能影响的仿真试验。响应面试验的因素与水平如表3所示,撒种盘转速选取 20～80 r/min,偏角为 100～140 r/min,扇叶数为 4～6。

表 3 响应面分析试验因素及水平

Table 3 Response surface analysis experimental factors and levels

编码	影响因素	水平		
		−1	0	+1
A	撒种盘转速转速/(r·min^{-1})	500	700	900
B	扇叶偏角/(°)	30	40	50
C	扇叶数/个	4	5	6

2.3.2 试验设计与结果

试验利用 Design-Expert12 软件,采用 Box-Behnken(BBD-RSM)设计响应面法试验[20],BBD-RSM法响应面的试验设计与试验结果如表4所示。

从试验结果来看,各行一致性变异系数分布在15.6%～40.2%。

表 4 BBD-RSM 法响应面试验设计与结果

Table 4 Experimental design and results of response surface by BBD-RSM method

序号	编码			变异系数/%
	A	B	C	
1	0	0	0	20.2
2	0	−1	1	34.6
3	1	−1	0	32.2
4	−1	−1	0	28.8
5	0	−1	−1	32.2
6	1	0	−1	40.2
7	0	0	0	20.4
8	−1	0	1	39.4
9	−1	0	−1	36.8
10	1	0	1	20.2
11	0	0	0	20
12	0	0	0	21.8
13	0	0	0	19.88
14	1	1	0	15.6
15	−1	1	0	32.6
16	0	1	1	19.8
17	0	1	−1	33.6

表 5 方差分析结果

Table 5 Analysis of variance results

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值	是否显著
模型	1 045.98	9	116.22	107.54	<0.000 1	是
A	108.05	1	108.05	99.98	<0.000 1	
B	85.8	1	85.8	79.4	<0.000 1	
C	103.68	1	103.68	95.94	<0.000 1	
AB	104.04	1	104.04	96.27	<0.000 1	
AC	127.69	1	127.69	118.16	<0.000 1	
BC	65.61	1	65.61	60.71	0.000 1	
A^2	126.07	1	126.07	116.66	<0.000 1	
B^2	7.93	1	7.93	7.33	0.030 3	
C^2	284.64	1	284.64	263.39	<0.0001	
残差	7.56	7	1.08			
失拟项	5.15	3	1.72	2.84	0.169 3	否
纯误差	2.41	4	0.603 7			
总和	1 053.55	16				

响应面试验的方差分析如表5所示，回归方程的F值为107.54、P值＜0.001，模型达到了极显著水平，表明该模型的拟合精度好，可以使用该响应面近似模型进行后续的设计优化，失拟项的P值为0.169 3＞0.05，说明失拟项不显著，表明该模型的拟合程度较好，由表5中各因素的F值大小可以得出对各行播种量一致性变异系数的影响主次关系为撒种盘转速＞扇叶数＞偏角。得到的各行排种量一致性变异系数的回归模型的R^2为0.992 8，预测R^2(0.918 2)与调整R^2(0.983 6)的差值小于0.2，表明该模型的拟合程度好；测量信噪比为17.55＞4，表明信号充足；CV值为5.92%＜10%，表明试验可信度和精确度较高。

2.3.3　响应曲面分析

响应面法完善了正交试验无法给出直观图像不足，利用Design-Expert12根据仿真实现数据绘制三维响应面曲面，直观表示出各行排种量一致性变异系数与撒种盘转速、偏角、扇叶数之间的关系，如图8—图10所示。

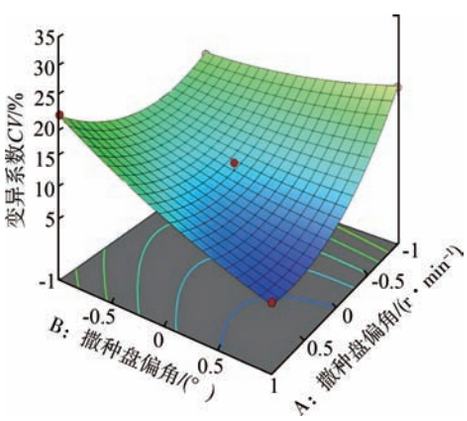


图8　撒种盘转速与偏角对各行一致性变异系数的交互影响

Figure 8　The interactive effect of sowing disk speed and deflection angle on the coefficient of variation of consistency in each row

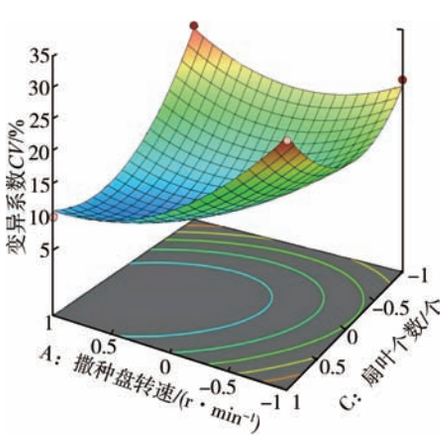


图9　撒种盘转速与扇叶数对各行一致性变异系数的交互影响

Figure 9　The interaction influence of the rotational speed of the sowing disk and the number of fan blades on the coefficient of variation of row consistency

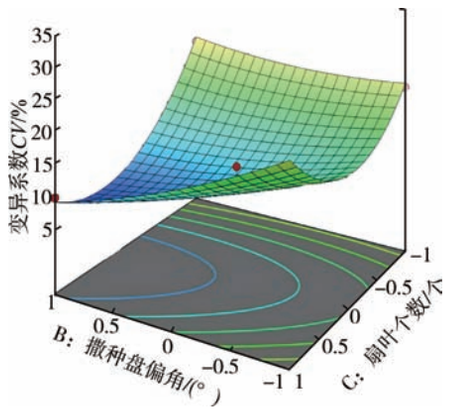


图10　偏角与扇叶数对各行一致性变异系数的交互影响

Figure 10　The interactive effect of deflection angle and number of blades on the coefficient of variation of consistency in each row

1)撒种盘转速与偏角对各行一致性变异系数的影响。如图8所示，显示了撒种盘转速与偏角对各行一致性变异系数的影响。可以得出，当撒种盘转速为700 r/min时，各行一致性变异系数随着偏角的上升呈先下降后增大的趋势；当撒种盘的转速为900 r/min时，各行一致性变异系数随着偏角的上升呈下降趋势。当撒种盘转速在500～750 r/min、偏角在40°～50°时，各行一致性变异系数出现在蓝色区域，各行一致性变异系数接近于11.8%。表明撒种盘转速与偏角均对各行一致性变异系数有显著影响，且从等高线图可以看出两个因素之间具有交互作用。这与方差分析结果一致。

2)撒种盘转速与扇叶数对各行一致性变异系数的影响。如图9所示，显示了撒种盘转速与扇叶数对各行一致性的影响。可以看出，当扇叶数为4时，各行一致性变异系数随着撒种盘转速的增加呈先减少后增加的趋势。当离心盘的扇叶数为6时，各行一致性变异系数随着撒种盘转速的增大，呈先减小后增大的趋势，并且减小的区间和幅度都小于增大的区间和幅度。当扇叶数在5～6个，撒种盘转速在700～900 r/min区间时，各行一致性变异系数出现在浅蓝色区域，各行一致性变异系数接近于11.3%。表明撒种盘转速与扇叶数均对各行一致性变异系数有显著影响，且从等高线图可以看出两个因素之间具有交互作用。这与方差分析结果一致。

3)偏角与扇叶数与对各行一致性变异系数的影响。如图10所示，显示了偏角与扇叶数对各行一致性的影响。可以看出，当扇叶数为4时，各行一致性变异系数随着偏角的增加而增加，但基本保持稳定。当离心盘的扇叶数为6时，各行一致性变异系数随着偏角的增大越来越小。当扇叶数在5～6个，偏角在50°～60°区间时，各行一致性变异系数出现在浅蓝色区域，

各行一致性变异系数接近于13%。表明偏角与扇叶数均对各行一致性变异系数有显著影响,且从等高线图可以看出两个因素之间具有交互作用。这与方差分析结果一致。

3 验证试验结果

利用Design-Expert12可以根据响应面试验获得的实验数据进行分析和优化出最优参数组合。最终得到结构参数和运动参数的最优解为:撒种盘转速857.52 r/min,偏角49.86°,扇叶数为5.20个。取整之后撒种盘转速850 r/min,偏角50°,扇叶数为5个,一致性变异系数为12.99%。

验证试验选择在浙江省金华市婺城区无风(风速<2 m/s)的天气进行,方法采用GB/T 25401—2010推荐的试验方法,在场地布置一排收集盒(360 mm×300 mm×60 mm),收集盒内平铺40 mm的细沙用于收集水稻种子,两个收集盒之间的中心距离1 m,共计8个收集盒,如图11所示。无人机在该场地完成作业之后,统计各收集盒的水稻种子品质,用式(14)—式(16)计算变异系数。验证试验分别针对飞行高度、播种量和飞行速度进行3组飞行试验,试验参数及结果如表6所示。



图11 无人机撒播验证试验

Figure 11 Drone broadcasting verification test

表6 仿真验证试验结果

Table 6 Simulation verification test results

试验变量	试验条件	试验指标	结果/%	平均值/%
飞行高度	播种量:0.13 kg/hm² 飞行速度:2 m/s	6 m	15.42	17.83
		7 m	20.81	
		8 m	17.25	
播种量	飞行高度:7 m 飞行速度:2 m/s	0.07 kg/hm²	17.63	20.90
		0.13 kg/hm²	20.81	
		0.20 kg/hm²	24.25	
飞行速度	播种量:0.13 kg/hm² 飞行高度:7 m	1 m/s	19.05	18.55
		2 m/s	20.81	
		3 m/s	15.78	

结果显示实际分布变异系数最大值为24.25%,最小值为15.42%。飞行高度、播种量和飞行速度3个因素对应的水稻分布变异系数平均值分别为17.83%、20.90%、18.55%。不同高度和飞行速度可能会形成不同的气流场,结果表明本研究的无人机撒播结构在不同气流场、不同飞行高度下撒播均匀性变异系数均远低于国标GB/T 25418—2022要求(40%)。

4 结论

理论分析发现种子颗粒在撒种圆盘上的运动状态与运动时间、撒种圆盘转速、撒种圆盘锥角、扇叶偏角有关。从水稻种子在空气中的运动分析发现,增加扇叶数量可以减少种子断条的发生概率。

通过仿真优化试验,得到最优撒种盘转速为857.52 r/min,偏角49.86°,扇叶数为5.20个,取整之后撒种盘转速850 r/min,偏角50°,扇叶数为5个,一致性变异系数为12.99%。

验证试验分别针对飞行高度、播种量和飞行速度进行3组飞行试验,每组试验重复3次,变异系数最大值为24.25%,远低于国标GB/T 25418—2022撒播均匀性变异系数40%的要求。为后续无人机撒播技术推广奠定基础。

参 考 文 献

[1] 刘金成, 王海明, 何亚琼, 等. 无人机技术在精准林业中的应用与挑战[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 14—24.
LIU Jincheng, WANG Haiming, HE Yaqiong, et al. Application and challenges of UAV-based technology in precision forestry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 14—24.

[2] 崔思远, 曹蕾, 陈聪, 等. 基于应用场景的丘陵山区农业机械化发展路径研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(2): 1—8.
CUI Siyuan, CAO Lei, CHEN Cong, et al. Path research on the agricultural mechanization development in hilly and mountainous areas based on application scenarios [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 1—8.

[3] 李季, 韦龙琴. 丘陵山地地区农机化发展存在的问题与方法概述[J]. 农业开发与装备, 2024(5): 36—38.

[4] 黄小毛, 刘宇, 朱耀宗, 等. 稻油兼用型成条飞播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 111—121.
HUANG Xiaomao, LIU Yu, ZHU Yaozong, et al. Design and experiment of striped aerial seeding device for rice and oil rape [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 111—121.

[5] WANG X, YANG G, PAN X, et al. Feasibility of

improving unmanned aerial vehicle-based seeding efficiency by using rice varieties with low seed weight [J]. Rice Science, 2022, 29(4): 299－303.

[6] DAS S. Transforming agriculture: Harnessing robotics and drones for sustainable farming solution [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2024, 46 (7): 219－231.

[7] COHEN Y, GOLDSTEIN H, LEVI M. Collaborative farming: The role of UAVs in precision agriculture [J]. Field Crops Research, 2023, 280: 108－119.

[8] 朱海滨，胡群，陆喜瞻，等. 无人飞播水稻生育特征与丰产关键技术研究进展[J]. 农业工程学报，2024，40(11)：1－13.
ZHU Haibin, HU Qun, LU Xizhan, et al. Research progress in growth characteristics and key techniques for the high yield of unmanned aerial seeding rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (11): 1－13.

[9] 彭永福，刘兆朋，陈雄飞，等. 基于六旋翼无人机的定量供种离心式水稻播种装置设计与试验[J]. 江西农业大学学报，2022，44(5)：1283－1291.
PENG Yongfu, LIU Zhaopeng, CHEN Xiongfei, et al. Design and experiment of centrifugal seeding equipment with quantitative seed supplying for rice based on UAV [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44 (5): 1283－1291.

[10] 岳进，杨欣伦，李春龙，等. 基于无人机平台的精量播种技术在水稻直播中的应用研究[J]. 四川农业科技，2019(4)：19－20.

[11] 高学梅，游兆延，吴惠昌，等. 基于无人机平台的绿肥种子撒播装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：76－85.
GAO Xuemei, YOU Zhaoyan, WU Huichang, et al. Design and experiment of green manure seed broadcast sowing device based on unmanned aerial vehicle platform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 76－85.

[12] 邓浩. 基于无人机运动风场的水稻撒播装置设计与试验[D]. 成都：四川农业大学，2022.
DENG Hao. Design and experiment research of rice spreading device based on unmanned aerial vehicle wind field [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022.

[13] 杨文武，方龙羽，罗锡文，等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报，2020，36(17)：1－8.
YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 1－8.

[14] LIU W, ZHOU Z, XU X, et al. Evaluation method of rowing performance and its optimization for UAV-based shot seeding device on rice sowing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107718.

[15] 刘大为，段佳鹏，陈星宇，等. 基于EDEM的稻种离散元摩擦参数标定[J]. 沈阳农业大学学报，2023，54(2)：189－195.

[16] ARUNYANART P, SUDSAWAT S. DEM simulation for the predicted model of total rice seeds mass in a vibratory conveyor [J]. International Journal of Engineering and Technology, 2023, 15(4): 740－753.

[17] 蒋承锟. 基于EDEM-FLUENT耦合的无人机水稻撒播装置仿真及试验研究[D]. 成都：四川农业大学，2021.
JIANG Chengkun. Simulation and experimental research of drone rice sowing device based on EDEM-FLUENT coupling [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2021.

[18] 李贵川，李海宇，杨少鹏，等. 基于CFD-DEM耦合的不同出口形式气力集排系统分配器仿真与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(1)：1－11.
LI Guichuan, LI Haiyu, YANG Shaopeng, et al. Simulation and experiment of distributors of different outlet types of pneumatic collection and discharging systems based on CFD-DEM coupling [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 1－11.

[19] 卢邦，董万静，丁幼春，等. 基于云—端高精度地图的油菜无人播种作业系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文)，2023，5(4)：33－44.
LU Bang, DONG Wanjing, DING Youchun, et al. An rapeseed unmanned seeding system based on cloud-terminal high precision maps [J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 33－44.

[20] XING H, CAO X, ZHONG P, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimisation of rice seed particles seeding a hill in double cavity pneumatic seed metering device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 10.

Design and optimization of a drone sowing device based on discrete element method

BIAN Xiaodong[1, 2], FAN Chengsai[3, 4], CHEN Changqing[1, 2*], YU Hongfeng[3, 4], ZHENG Tao[1, 2]

(1. *Jinhua Agricultural Science Research Institute*, *Jinhua* 321017, *China*; 2. *Jinhua Key Laboratory of Applied Agricultural Machinery in Hilly and Mountainous Areas*, *Jinhua* 321017, *China*; 3. *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*; 4. *Jiangsu Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: In response to the practical issues faced in hilly areas, such as limited per capita arable land, scattered plots, rugged terrain, low efficiency of large agricultural machinery, and the occasional inconvenience of using small machinery, this paper designs a sowing device that combines a groove wheel and a sowing disk based on drone technology. The paper presents the design concept and optimization simulation plan for the combined sowing device, using rice seeds as the research subject. A discrete element method (DEM) is employed to model the rice seeds using basic unit particles. The sowing process of the device is simulated using DEM software EDEM, primarily analyzing the sowing disk structure. It is found that the angle of the sowing disk and its rotational speed significantly affect the distribution of rice seeds on the disk, while the number of blades significantly impacts the distribution of rice seeds in the air. To achieve uniform sowing, the study uses DEM to design an orthogonal experiment with three factors at three levels, focusing on the rotational speed of the sowing disk, the angle of the blades, and the number of blades. The simulation results indicate that the optimal seeding disc rotation speed of 850 r/min, deflection angle of 50°, and number of blades of 5 resulted in a uniformity coefficient of variation of 12.99%. Verification tests were conducted in three sets focusing on flight altitude, sowing amount, and flight speed. The results show that the maximum coefficient of variation for actual distribution is 24.25%, while the minimum is 15.42%. The average coefficients of variation for rice distribution corresponding to flight altitude, sowing amount, and flight speed are 17.83%, 20.90%, and 18.55%, respectively, which generally meet the agronomic requirements for rice aerial seeding. Through the research and analysis of the structural parameters, discrete element simulation, and field tests of the groove wheel and sowing disk combination, the paper identifies the optimal parameters for the operational performance of the sowing device. These parameters lay the groundwork for research on aerial seeding and its practical application in hilly areas.

Keywords: hilly and mountainous area; drone; rice; sowing; sheave; discrete element simulation

Foundation items: Key Agricultural Science and Technology Projects in Jinhua City(2020-2-031)

First Author: BIAN Xiaodong, E-mail: 935442749@qq.com

* **Correspondence Author:** CHEN Changqing, E-mail: 496533235@qq.com