

李旭, 廖俊卿, 曾金平, 等. 基于EDEM仿真的机械式辣椒精量排种装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 552-564.

LI Xu, LIAO Junqing, ZENG Jinping, et al. Design and testing of mechanical pepper precision seed metering device based on edem[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 552-564.

## 基于EDEM仿真的机械式辣椒精量排种装置设计与试验

李旭<sup>1,2</sup>, 廖俊卿<sup>1</sup>, 曾金平<sup>1</sup>, 刘大为<sup>1,3,4</sup>, 谢方平<sup>1,2</sup>, 刘敏章<sup>1</sup>, 龚明<sup>3,4</sup>, 王波<sup>3,4</sup>

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 智能农机装备湖南省重点实验室, 长沙 410128; 3. 农业农村部南方智能育秧(苗)重点实验室, 湖南 益阳 413000; 4. 湖南省智慧育秧育苗装备工程技术研究中心, 湖南 益阳 413055)

**摘要:** 针对辣椒漂浮育苗中, 人工点播存在的劳动强度大、播种效率低和劳动成本高等问题, 在磁力回位型排种器的基础上, 提出一种适配辣椒漂浮育苗的机械式辣椒精量排种装置, 使用SOLIDWORKS等软件对关键结构进行设计和运动分析, 并利用EDEM仿真软件对排种装置进行仿真。选取曲柄电机转速、种量和曲柄直径为影响因子, 单粒率、重播率和漏播率为评价指标, 进行基于Box-Behnken设计的响应曲面法试验, 并对试验结果进行分析, 采用权重结合隶属度计算综合得分对排种装置的参数组合进行评价, 得到排种装置的最优的参数组合为: 曲柄电机工作转速 $260\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 种量4000粒, 曲柄直径28 mm。样机试验播种单粒率、重播率和漏播率分别为91.46%、7.29%和1.25%, 满足辣椒漂浮育苗生产技术要求。

**关键词:** 辣椒; 漂浮育苗; 精量播种; 机械式排种装置; EDEM

中图分类号: S223.2

文章编号: 1000-1700(2024)05-0552-13

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design and Experiment of Precision Mechanical Metering Device for Pepper Seed Based on EDEM

LI Xu<sup>1,2</sup>, LIAO Junqing<sup>1</sup>, ZENG Jinping<sup>1</sup>, LIU Dawei<sup>1,3,4</sup>, XIE Fangping<sup>1,2</sup>,

LIU Minzhang<sup>1</sup>, GONG Ming<sup>3,4</sup>, WANG Bo<sup>3,4</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory of Southern Intelligent Seedling (Seedling), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yiyang Hunan 413000, China; 4. Hunan Research Center of Engineering Technology for Intelligent Seedling Equipment, Yiyang Hunan 413055, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high labor intensity, low seeding efficiency and high labor cost existing in manual hill-drop seeding in pepper floating seedling raising, this paper proposes a pepper seed precision mechanical metering device adapted to pepper floating seedling raising on the basis of magnetic return-type seed metering mechanism, and the design and motion analysis of the key structure was carried out using SOLIDWORKS and other software and simulation of the seed metering device was conducted by using EDEM. Taking crank rotary speed, seeds quantity, and crank diameter as factors, and the single grain rate, reseeding rate, and missed seeding rate as evaluation indexes, the response surface test, using Box-Behnken design, was conducted and the results were analyzed. The parameter combinations of the seed metering

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000305-4, 2021YFD1600300-4-6)

第一作者: 李旭(1981-), 男, 博士, 副教授, 从事农业装备智能控制技术研究, E-mail: leexu@hunau.edu.cn

通信作者: 刘大为(1983-), 男, 博士, 副教授, 从事机械化育秧(苗)技术与装备研究, E-mail: liudawei8361@163.com

device are evaluated combining weight with membership degree. The optimal parameters combination for the seed metering device is determined to be crank rotary speed of  $260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , seed quantity of 4 000 grains, and crank diameter of 28 mm. The single grain rate, reseeding rate and missed seeding rate of the prototype test were 91.46%, 7.29% and 1.25%, respectively, which met the technical requirements of pepper floating seedling production.

**Key words:** pepper; floating seedling raising; precision seeding; seed mechanical metering device; EDEM

辣椒是我国重要的蔬菜作物之一,分布广泛,其种植规模逐年提升<sup>[1]</sup>。2022年我国辣椒市场规模达到3 885.89亿元,已成为我国农业和农村经济的重要支柱产业<sup>[2-4]</sup>。近年来,漂浮育苗技术作为培育壮苗的先进技术在辣椒育苗中得到了广泛的应用<sup>[5-8]</sup>,漂浮育苗是将装有轻质育苗基质的泡沫穴盘漂浮于水面上,种子播于基质中,秧苗在育苗基质中扎根生长,并从基质和水床中吸收水分和养分的育苗方法。该技术具有占地面积小、育苗效率高、所育秧苗生长健壮、秧苗质量高等优点。辣椒漂浮育苗要求播种深度1 cm,1穴1粒,而辣椒种子形状呈扁肾形,流动性较差,与其他蔬菜精量播种装置适配性差,规模较小的辣椒育苗基地基本以人工手动点播为主,存在劳动强度大、劳动效率低和播种质量一致性差等不足。因此,为了提高辣椒漂浮育苗播种自动化程度,降低劳动强度和劳动成本,需要开展适用于该育苗技术的精量自动排种装置研究,促进辣椒漂浮育苗轻简高效生产。

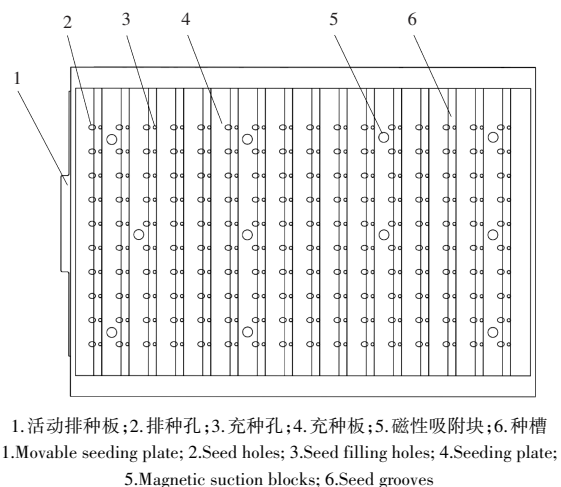
姜有忠等<sup>[9]</sup>针对辣椒等不规则种子播种精度差和堵塞气孔问题,设计了一种气吹投种的气吸滚筒式精量排种器,其单粒率达到86.83%。翟建波等<sup>[10-11]</sup>针对水稻精量排种器,一方面通过梳种条和推杆等结构改善水稻种子的流动性,另一方面通过双盘结构和调节装置设计,实现作业速度的提高和漏播率的降低。张明华等<sup>[12]</sup>利用扰种条对气吸轮式排种器进行辅助充种,利用不同蔬菜种子进行试验,得到扰种条角度和厚度的最优值,但对辣椒的充种单粒率较低。夏红梅等<sup>[13-15]</sup>为提高排种器对扁平小粒径种子适配性,分别对排种器的供种装置、气吸滚筒、种子吸附姿态调整机构进行研究,提高了排种器的单粒率。梁玉玥等<sup>[16]</sup>针对稻麦兼用排种器设计了一种振动式的供种装置,能够提供连续的单列种子流,通过垂直振幅、角振幅和料槽升角的试验和仿真分析,得出了最优参数组合。李玉环等<sup>[17]</sup>设计了一种以凹型携种孔兜种、导种槽促进充种、毛刷清种护种的扰动促充机械式绿豆精量排种器,并通过离散元软件EDEM仿真优化方法进行了参数优化试验。刘彩玲等<sup>[18]</sup>研究了一种适用于小粒径种子的精量播种机,对导种管和胶辊进行设计和优化,测试了播种机对不同品种小种子蔬菜的适应性,为小种子蔬菜精准播种机的结构设计与优化提供了思路。

结合研究现状发现,气力式精量排种器适用性广,但是存在结构复杂和成本高等问题,机械式精量排种器相比于气力式结构简单,易维护,使用成本低,更适合丸粒化和大颗粒种子的精量播种<sup>[19-21]</sup>。为提高辣椒漂浮育苗播种自动化程度,降低劳动强度和育苗成本,本研究在磁力回位型排种器<sup>[22]</sup>的基础上,提出一种适配辣椒漂浮育苗的机械式辣椒精量排种装置,通过离散元仿真分析装置的最优参数组合,并制作实机对该装置在最优参数组合下的性能进行验证,以为辣椒漂浮育苗提供低成本的自动化排种装置,为辣椒轻简化生产提供参考。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 磁力回位型排种器结构

磁力回位型排种器结构如图1,人工操作时,首先将辣椒种子播撒在充种板上,人工晃动和转动排种器,种子在种槽中移动掉落在充种孔实现充种;然后推动活动排种板,排种孔移动到充种孔的下方,种子落下实现排种,释放外力后活动排种板在磁性吸附块的作用下复位,完成一次播种作业。磁力回位型排种器具有操作简单特点,相比较人工点播极大地提高了播种效率,但是存在人工重复



1. 活动排种板; 2. 排种孔; 3. 充种孔; 4. 充种板; 5. 磁性吸附块; 6. 种槽  
1. Movable seeding plate; 2. Seed holes; 3. Seed filling holes; 4. Seeding plate;  
5. Magnetic suction blocks; 6. Seed grooves

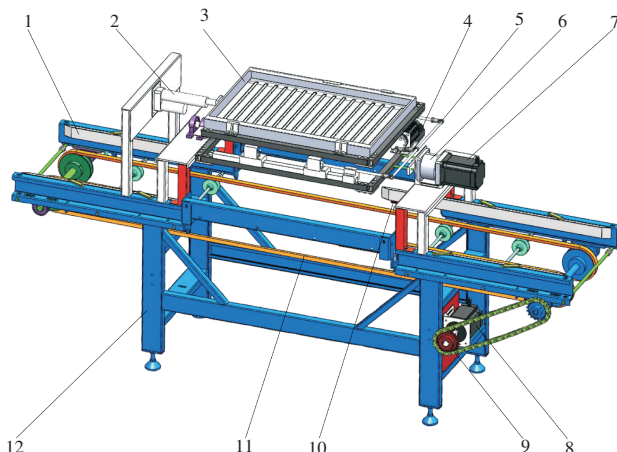
图1 磁力回位型排种器

Figure 1 Magnetic return-type seed metering

操作劳动强度大及作业一致性不好等问题。

### 1.2 机械式辣椒精量排种装置结构与工作原理

机械式辣椒精量排种装置主要由机架、穴盘输送机构、往复旋转充种机构、排种机构组成,其结构如图2。其中机架由钢材焊接而成;穴盘输送机构主要包括驱动电机、传送带和红外光电传感器,用于将穴盘输送至排种作业区域,排种完毕后再将穴盘输送至播种流水线的下一环节;往复旋转充种机构主要包括曲柄电机、曲柄连杆机构、行星减速机和旋转电机,功能是实现磁力回位型排种器中辣椒种子的自动充种;排种机构主要包括电动推杆,功能是在充种后进行排种,完成穴盘的播种作业。



1.导向架;2.电动推杆;3.磁力回位型排种器;4.曲柄电机;5.曲柄连杆机构;6.行星减速机;7.旋转电机;8.驱动电机;9.链轮链条;  
10.红外光电传感器;11.传送带;12.机架  
1. Guide frame; 2. Electric actuator; 3. Magnetic return-type seed meter; 4. Crank motor; 5. Crank linkage mechanism; 6. Planetary speed reducer;  
7. Rotary motor; 8. Drive motor; 9. Sprocket chain; 10. Infrared photoelectric sensors; 11. Conveyor belt; 12. Frame

图2 机械式辣椒精量排种装置整体结构简图

Figure 2 Structural schematic diagram of the pepper seed precision mechanical metering device

装置通过机械结构设计,模拟人工操作磁力回位型排种器动作,实现辣椒精量播种,装置的工作原理如图3。开机后设置曲柄电机、旋转电机和驱动电机等相关作业参数,装置启动后,驱动电机驱动链轮

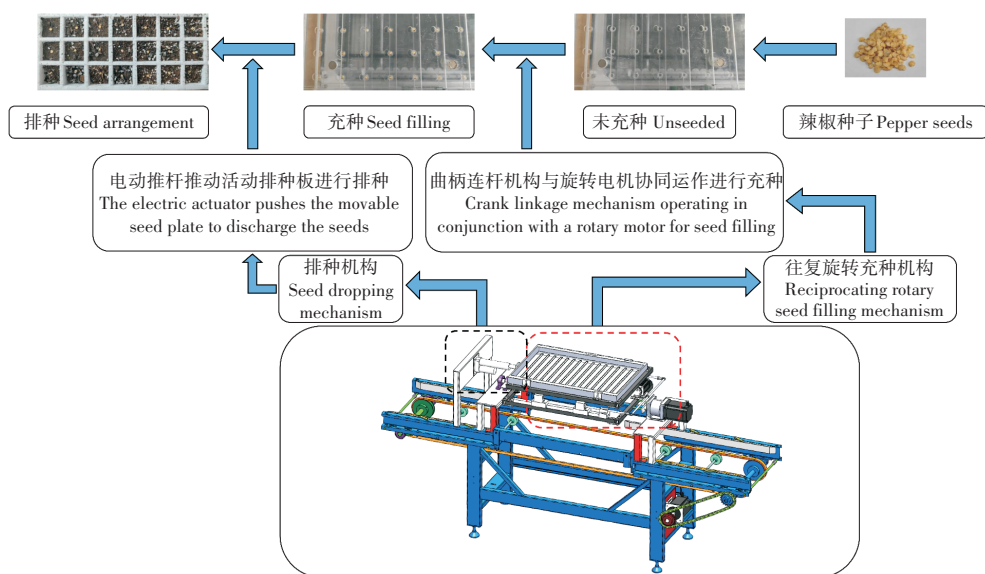


图3 机械式辣椒精量排种装置工作原理简图

Figure 3 Working principle sketch of pepper seed precision mechanical metering device

链条带动传送带转动,将穴盘输送往排种作业区域,穴盘触发红外光电传感器,驱动电机停止转动,穴盘停止在排种作业区域,排种装置开始排种作业,往复旋转充种机构中的曲柄电机驱动曲柄连杆机构进行往复运动,带动磁力回位型排种器进行往复运动,同时旋转电机进行旋转,带动排种器旋转至指定角度,往复和旋转带动种子流运动实现充种,完成充种作业后,旋转电机进行反转将排种器旋转至水平位置,排种器复位后,排种机构中的电动推杆启动,推动活动排种板,使排种板上排种孔与充种孔对齐,辣椒种子掉落至穴盘相应的孔穴,随后驱动电机启动带动传送带将穴盘输送至播种流水线下一环节。

## 2 关键部件设计

### 2.1 充种孔设计

2.1.1 辣椒种子物理特性 辣椒种子的物理特性是排种装置设计的重要依据,选用兴蔬皱辣2号线椒种子为研究对象,对其长度 $L_p$ 、宽度 $W_p$ 、厚度 $H_p$ 等基本物理特性进行测定,辣椒种子三轴尺寸如图4。

得到辣椒种子的物理特性参数如表1。

2.1.2 充种孔结构设计 充种孔的结构设计是实现1穴1粒充种的关键,其结构参数对充种性能具有直接影响<sup>[23]</sup>,结合辣椒种子的轴尺寸,充种孔结构参数设计如图5。

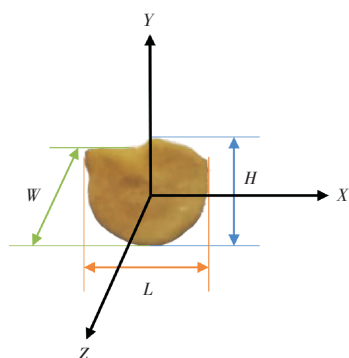


图4 辣椒种子三轴尺寸示意图

Figure 4 Schematic diagram of triaxial dimensions of pepper seeds

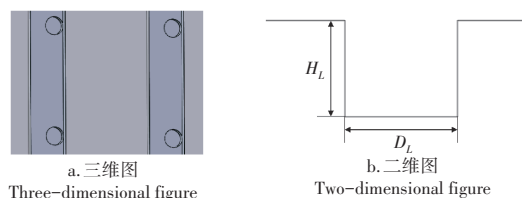


图5 充种孔结构示意图

Figure 5 Schematic diagram of the structure of seed filling hole

表1 辣椒种子物理特性参数

Table 1 Parameters of physical properties of pepper seeds

品种 Variety	平均长度/mm Average length	平均宽度/mm Average width	平均厚度/mm Average thickness	含水率/% Water content	千粒重/g Thousand grain weight	自然休止角/(°) Natural repose angle	滑动摩擦角/(°) Sliding friction angle	密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Density
兴蔬皱辣2号 Xingshuzhoula No.2	4.09	3.47	0.79	8.32	6.47	28.9	26.14	0.63

图5中,充种孔的主要结构参数为孔径 $D_L$ 和孔深 $H_L$ ,在排种装置充种过程中,合适的孔高和孔径能提高单粒率,其与辣椒种子几何参数关系式为:

$$l \leq D_L \leq 2l \tag{1}$$

$$h \leq H_L \leq 2h \tag{2}$$

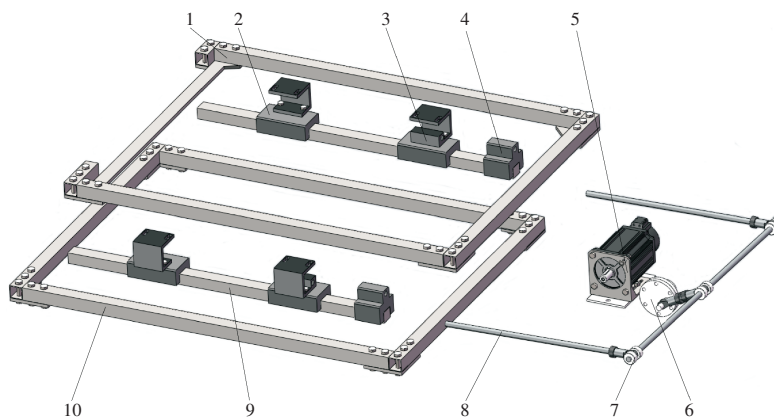
式中: $D_L$ 为充种孔孔径(mm); $H_L$ 为充种孔孔深(mm); $l$ 为辣椒种子平均长度(mm); $h$ 为辣椒种子平均厚度(mm)。

根据前期试验中的辣椒种子尺寸参数, $l$ 为4.09 mm, $h$ 为0.79 mm,设计充种孔孔径 $D_L$ 为5 mm,孔深 $H_L$ 为1 mm。

### 2.2 往复旋转充种机构设计

2.2.1 曲柄机构设计 往复旋转充种机构由其中的曲柄连杆机构带动上承载层为磁力回位型排种器提

供所需的往复运动,使充种板上的种子在种槽内往复移动,提高排种装置的充种效果,其结构原理如图6。



1.上承载层;2.滑块;3.承载层连接件;4.直线轴承;5.曲柄电机;6.曲柄;7.紧固限位环;8.连杆组;9.导轨;10.下承载层  
1.Upper load layer; 2.Slider; 3.Load layer connectors; 4.Linear bearings; 5.Crank motor; 6.Crank; 7.Fastening limit rings; 8.Connecting rod set; 9.Guide rails; 10.Lower load layer

图6 曲柄连杆机构结构图

Figure 6 Schematic diagram of the crank linkage mechanism

曲柄连杆机构中曲柄尺寸和曲柄电机转速是影响充种效果的核心因素,选择合适的曲柄尺寸及曲柄电机旋转速度,对于确保高效播种和提升播种质量,具有至关重要的作用。辣椒种子平均长度为4.09 mm,磁力回位型育苗排种器种槽宽度设计为10 mm,种子在种槽中可以实现至少5.91 mm的移动距离。进一步分析承载层的运动情况,将其中的曲柄连杆机构进行了平面化处理(图7)。

图7中, $OA_1$ 为曲柄; $A_1B$ 为连杆。当曲柄连杆处于 $OA_1B$ 位置时,此时为曲柄连杆初始位置;当曲柄连杆处于 $OA_2C$ 时,此时为曲柄连杆的极限位置, $x_r$ 为上承载层的极限位移。根据种子在种槽中所需的最小移动距离,求得曲柄直径的范围,其方程为:

$$R \geq r \tag{3}$$

$$r^2 + (L + r - x_r)^2 = L^2 \tag{4}$$

式中: $L$ 为连杆长度(mm); $R$ 为曲柄半径(mm); $r$ 为最小曲柄半径(mm); $x_r$ 为上承载层的极限位移(mm)。

将 $L=75$  mm, $x_r=6$  mm代入式(4)中进行求解,求得最小曲柄半径 $r$ 为5.8 mm。

2.2.2 旋转机构设计 往复旋转充种机构的旋转运动由旋转机构驱动实现,目的是使充种板上的种子从排种器一端运动向另一端,在提高排种装置的充种效果的同时完成种子的收集。旋转机构由旋转电机提供动力带动排种装置进行旋转运动。电机扭矩是旋转机构的关键参数,其计算公式为:

$$M = mgL_N \tag{5}$$

式中: $M$ 为电机扭矩(N·m); $m$ 为排种装置旋转部分质量(kg); $g$ 为重力加速度( $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ); $L_N$ 为排种装置旋转部分质心到力的作用线距离(m)。

测量可得排种装置中旋转部分的质量为7.50 kg,采用悬吊法<sup>[24-25]</sup>测量质心位置,并获得排种装置旋转部分质心到力的作用线距离 $L_N$ 为0.046 m。将数据代入式(5)进行计算,得到旋转所需最大扭矩为3.381 N·m。

为满足设计需要,选用型号为86EBP181ALC-TK0的闭环步进电机,自带1000p的编码器,能够实现全面闭环,防止丢步,其参数如表2。

同时选用PX86步进电机行星减速机,提高步进电机的输出扭矩,增加稳定性,参数如表3。

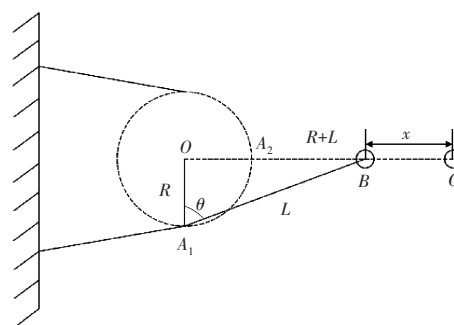


图7 曲柄连杆机构平面图

Figure 7 Planar view of crank linkage mechanism

表2 旋转电机参数

Table 2 Parameter list of rotary motor

型号 Model number	步距角/(°) Step angle	相数 Phase	电流/A Current	电阻/ $\Omega$ Resistive	电感/mh Inductor	保持转矩/(N·m) Holding torque
86EBP181ALC-TK0	1.8	2	6	0.52	7.2	12.5

表3 行星减速机参数

Table 3 Parameter list of planetary speed reducer

型号 Model number	减速比 Reduction ratio	额定负载/(N·m) Rated load	最大负载/(N·m) Maximum load	效率/% Efficiency	额定输入转速/(r·min <sup>-1</sup> ) Rated input speed
PX86 步进系列二级 PX86 stepper series secondary	12	50	80	90	$\leq 3\ 000$

### 2.3 排种机构设计

排种机构主要由图1中电动推杆组成,其作用是待往复旋转充种机构完成充种后,电动推杆推动活动排种板,充种孔与排种孔重合,种子依靠自身重力从充种孔落入穴盘中,电动推杆收回,活动排种板在此磁性吸附块的作用下收回,完成排种。

电动推杆可根据作业距离设置行程,满足不同安装距离需求,其参数如表4。

表4 电动推杆参数

Table 4 Parameter list of electric actuator

名称 Name	功率/W Power	电压/V Voltage	最大推力/N Maximum thrust	速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) Speed	作业温度/°C Operating temperature
直流电机驱动推杆 DC motor driven actuator	50~60	24	1 400	7~110	-25~100

### 2.4 控制系统设计

机械式辣椒精量排种装置的控制系統<sup>[26]</sup>以S7-200 Smart ST30 PLC为控制中心,具备18个数字输入和12个数字输出,能够适配最高100 kHz的脉冲输出,支持以太网和RS485/RS232等传统端口以便在不同场合下进行通信。人机交互方面,使用了MCGS TPC7032Kt型号的触摸屏进行操作,工作电源24 V。在动力系统方面,旋转电机与驱动电机选用的型号为86EBP181ALC-TK0,选用时代超群的HBS86步进驱动器;旋转电机选用的型号为60EBP133ALC-TK0,选用时代超群的HBS57步进驱动器。此外,每个电机都装备1000p的编码器,保证了精确的闭环控制,防止丢步。控制系统硬件组成如图8。

排种装置通过电气设备与机械装置的协同运作,实现了辣椒漂浮穴盘的自动精量播种,控制系统作业流程图如图9。

## 3 排种装置仿真试验

### 3.1 仿真模型建立及参数设置

使用相机对辣椒种子进行近距离拍摄,得到清晰的辣椒种子图片,再将种子图片导入AutoCAD并进行比例缩放,以保证图片尺寸与实际尺寸相符,然后进行轮廓描绘,得到辣椒种子轮廓曲线(图10a)。再将得到的种子轮廓导入SOLIDWORKS进行处理后,导入EDEM进行种子建模,手动进行填充,得到辣椒种子多球模型(图10b)。

同时,将机械式辣椒精量排种装置进行简化,导入EDEM软件进行仿真。在EDEM软件中对种子和排种器的相关参数进行设置,相关参数设置如表5。仿真时间步长设置为 $6.73 \times 10^{-6}$  s。

### 3.2 仿真方案

根据前期预试验,在排种装置旋转角度为 $35^\circ$ ,旋转角速度为 $0.07 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (即生产率约 $206 \text{ 盘} \cdot \text{h}^{-1}$ )下,以曲柄电机转速、曲柄直径、种量为试验因素对排种装置性能进行基于Box-Behnken设计的响应曲面法试验,选取曲柄电机转速范围为 $250 \sim 270 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,种量范围为 $3\ 000 \sim 5\ 000$ 粒,曲柄直径范围为

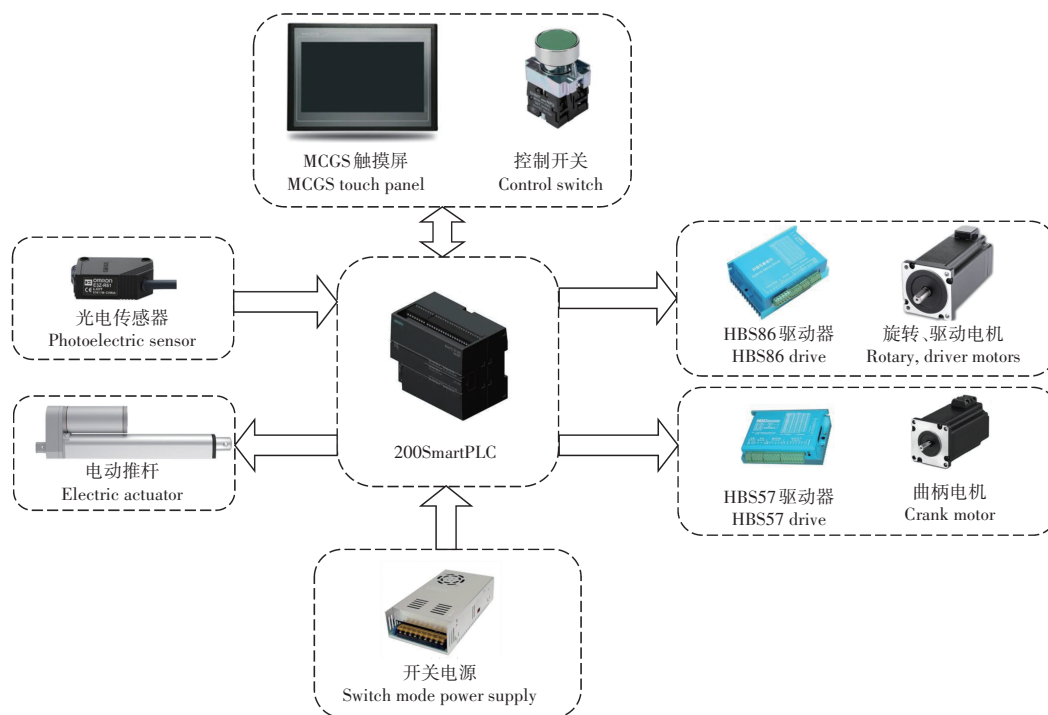


图8 控制系统硬件组成

Figure 8 Hardware composition of control system

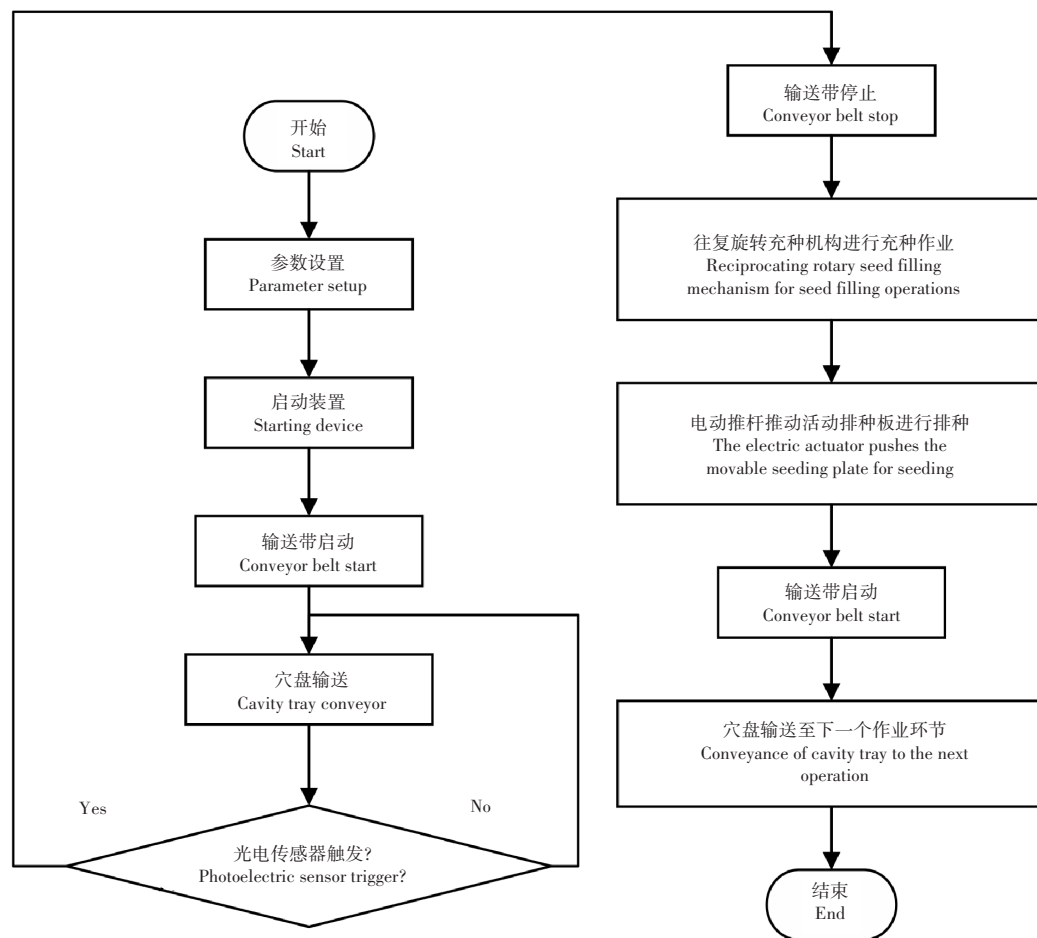


图9 控制系统流程图

Figure 9 Flowchart of control system

28~32 mm,在该范围区间排种装置工作性能较好。试验因素水平编码如表6。

以单粒率  $Y_1$ 、重播率  $Y_2$  和漏播率  $Y_3$  为试验指标<sup>[27-29]</sup>,各指标计算公式为:

$$Y_1(\%) = \frac{n_1}{N} \quad (6)$$

$$Y_2(\%) = \frac{n_2}{N} \quad (7)$$

$$Y_3(\%) = \frac{n_3}{N} \quad (8)$$

式中: $Y_1$ 为单粒率; $Y_2$ 为重播率; $Y_3$ 为漏播率; $n_1$ 为单粒合格穴数; $n_2$ 为重播穴数; $n_3$ 为漏播穴数; $N$ 为穴盘穴孔总数。

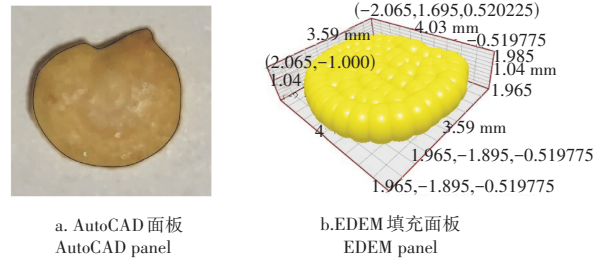


图10 辣椒种子轮廓设计

Figure 10 Contour design of pepper seed

表5 仿真参数

Table 5 Simulation parameters

参数 Parameter	辣椒种子 Pepper seed	亚克力 PMMA
泊松比 Poisson's ratio	0.30	0.37
剪切模量 Shear modulus/Pa	$1 \times 10^6$	$8.5 \times 10^8$
密度 Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	630	1 190
碰撞恢复系数(与颗粒)Coefficient of restitution between particles and particles	0.35	0.45
静摩擦系数(与颗粒)Coefficient of static friction between particles and particles	0.30	0.43
滚动摩擦系数(与颗粒)Coefficient of rolling friction between particles and particles	0.01	0.02

表6 因素水平编码

Table 6 Experimental factor and level table

水平 Level	曲柄电机转速 $A(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ Crank rotary speed	种量 $B/\text{粒}$ Seed quantity	曲柄直径 $C/\text{mm}$ Crank diameter
-1	250	3 000	28
0	260	4 000	30
1	270	5 000	32

为了更好地寻求最佳因素组合,将单粒率、重播率、漏播率进行量化,分别表示为相应的隶属度  $S_i$ 、 $R_i$  和  $M_i$ <sup>[30-31]</sup>,在辣椒漂浮育苗播种作业中,单粒率是首要目标,同时减少漏播,降低重播,且漏播率的权重高于重播率的权重。因此,为单粒率、漏播率和重播率设定权重分别为0.7,0.2,0.1。结合隶属度计算综合得分  $Y_i$ ,其表达式为  $Y_i = 0.7(1 - S_i) + 0.2M_i + 0.1R_i$ 。得分  $Y_i$  越低,意味着各项关键参数的组合越优。

### 3.3 试验结果分析

试验方案及试验结果如表7。

将试验结果导入 Design-Expert 13.0 并进行回归拟合分析,得到各指标的方差分析,其中单粒率的方差分析如表8。由表8可知,单粒率模型的  $p$  值小于0.01,单粒率的回归模型极显著,失拟项的  $p$  值大于0.05,影响不显著,代表单粒率试验在一定参数范围内,其回归模型与实际情况拟合度较高。 $A^2$  的  $p$  值小于0.01,该因素对单粒率的影响极显著;因素  $A$  的  $p$  值小于0.05,该因素对单粒率的影响显著。根据对单粒率的影响程度从大到小的顺序进行排序,依次为曲柄电机转速、种量、曲柄直径。以单粒率  $Y_1$  为响应函数,各因素为自变量,得到单粒率  $Y_1$  的回归方程为:

$$Y_1 = 92.75 - 1.56A - 0.8594B - 0.8594C - 0.9375AC + 0.1563BC - 8.33A^2 - 1.61B^2 - 0.0469C^2 \quad (9)$$

重播率的方差分析如表9。由表9可知,重播率模型的  $p$  值小于0.01,重播率的回归模型极显著,失拟项的  $p$  值大于0.05,影响不显著,代表重播率试验在一定参数范围内,其回归模型与实际情况拟合度较高。因素  $A^2$  的  $p$  值小于0.01,该因素对重播率的影响极显著;因素  $A$ 、 $B$ 、 $B^2$  的  $p$  值小于0.05,该因素对重播率的影响显著。按照对重播率的影响程度从大到小的顺序进行排序,依次为曲柄电机转速、种量、曲柄直径。以重播率  $Y_2$  为响应函数,各因素为自变量,得到重播率  $Y_2$  的回归方程为:

表7 试验方案及结果

Table 7 Test scheme and results

试验号 No.	曲柄电机转速 <i>A</i> Crank rotary speed	种量 <i>B</i> Seed quantity	曲柄直径 <i>C</i> Crank diameter	单粒率 $Y_1$ Single grain rate	重播率 $Y_2$ Reseeding rate	漏播率 $Y_3$ Missed seeding rate	综合分 $Y_i$ Comprehensive score
1	0	-1	1	91.250	6.250	2.500	0.73
2	0	1	1	89.375	10.000	0.625	0.26
3	1	-1	0	83.125	14.375	3.125	1.41
4	1	0	1	80.000	18.750	1.250	1.00
5	-1	0	1	86.875	12.500	0.625	0.40
6	0	0	0	91.250	6.875	1.250	0.34
7	1	1	0	81.250	18.125	0.625	0.73
8	0	0	0	93.750	5.625	0.625	0.00
9	-1	1	0	82.500	16.875	0.625	0.66
10	-1	-1	0	84.375	13.750	1.875	0.94
11	0	1	-1	91.250	8.125	0.625	0.15
12	0	0	0	92.500	6.875	0.625	0.07
13	0	-1	-1	92.500	6.250	1.250	0.27
14	-1	0	-1	86.875	11.875	1.250	0.60
15	0	0	0	93.750	5.625	0.625	0.00
16	0	0	0	92.500	6.875	0.625	0.07
17	1	0	-1	83.750	15.000	1.250	0.78

表8 单粒率方差分析

Table 8 Variance analysis of single grain rate

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	346.22	9	38.47	23.41	0.000 2
<i>A</i>	19.53	1	19.53	11.88	0.010 7
<i>B</i>	5.91	1	5.91	3.60	0.099 8
<i>C</i>	5.91	1	5.91	3.60	0.099 8
<i>AB</i>	0.000 0	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
<i>AC</i>	3.52	1	3.52	2.14	0.187 0
<i>BC</i>	0.097 7	1	0.097 7	0.059 4	0.814 4
<i>A</i> <sup>2</sup>	292.03	1	292.03	177.70	< 0.000 1
<i>B</i> <sup>2</sup>	10.91	1	10.91	6.64	0.036 7
<i>C</i> <sup>2</sup>	0.009 3	1	0.009 3	0.005 6	0.942 3
残差 Residual	11.50	7	1.64		
失拟项 Lack of fit	7.13	3	2.38	2.17	0.233 9
误差 Pure error	4.38	4	1.09		
合计 Cor total	357.72	16			

$$Y_2 = 6.38 - 1.41A + 1.56B + 0.7813C + 0.1562AB + 0.7813AC + 0.4687BC + 8.14A^2 + 1.27B^2 + 0.0156C^2 \quad (10)$$

漏播率的方差分析如表10。由表10可知,漏播率模型的 $p$ 值小于0.01,漏播率的回归模型极显著,失拟项的 $p$ 值大于0.05,影响不显著,代表漏播率试验在一定参数范围内,其回归模型与实际情况拟合度较高。因素 $B$ 的 $p$ 值小于0.01,该因素对漏播率的影响极显著;因素 $B^2$ 的 $p$ 值小于0.05,该因素对漏播率的影响显著。按照对重播率的影响程度从大到小的顺序进行排序,依次为种量、曲柄电机转速、曲柄直径。以重播率 $Y_3$ 为响应函数,各因素为自变量,得到重播率 $Y_3$ 的回归方程为:

$$Y_3 = 0.75 + 0.2344A - 0.7831B + 0.0781C - 0.3125AB + 0.1563AC - 0.3125BC + 0.3281A^2 + 0.4844B^2 + 0.0156C^2 \quad (11)$$

### 3.4 响应面分析

利用 Design-Expert 13.0 将回归模型的分析结果进行处理,将曲柄电机转速  $A$ 、种量  $B$ 、曲柄直径  $C$  中任意 1 个影响因子固定其水平,根据其对应的响应面图分析另外 2 个影响因子对各指标的影响。

3.4.1 各影响因子对单粒率的影响 由图11a可知,曲柄直径固定为30 mm,当种量一定时,单粒率随着曲柄电机转速的增大呈先增大后减小的趋势,因为增加转速会提高振动频率,更多的种子有机会被填充到充种孔,可以提高单粒率。然而,过高的转速可能导致振动过快,影响种子的充种,从而导致单

表9 重播率方差分析

Table 9 Variance analysis of reseeding rate

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>
模型 Model	336.030 0	9	37.340 0	26.450 0	0.000 1
A	15.820 0	1	15.820 0	11.210 0	0.012 3
B	19.530 0	1	19.530 0	13.830 0	0.007 5
C	4.880 0	1	4.880 0	3.460 0	0.105 3
AB	0.097 7	1	0.097 7	0.069 2	0.800 1
AC	2.440 0	1	2.440 0	1.730 0	0.229 9
BC	0.878 9	1	0.878 9	0.622 5	0.456 0
A <sup>2</sup>	279.030 0	1	279.030 0	197.640 0	< 0.000 1
B <sup>2</sup>	6.740 0	1	6.740 0	4.780 0	0.065 1
C <sup>2</sup>	0.001 0	1	0.001 0	0.000 7	0.979 2
残差 Residual	9.880 0	7	1.410 0		
失拟项 Lack of fit	8.010 0	3	2.670 0	5.690 0	0.063 1
误差 Pure error	1.880 0	4	0.468 8		
合计 Cor total	345.910 0	16			

表10 漏播率方差分析

Table 10 Variance analysis of missed seeding rate

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>
模型 Model	7.780 0	9	0.864 6	6.080 0	0.013 3
A	0.439 5	1	0.439 5	3.090 0	0.122 3
B	4.880 0	1	4.880 0	34.310 0	0.000 6
C	0.048 8	1	0.048 8	0.343 1	0.576 4
AB	0.390 6	1	0.390 6	2.750 0	0.141 5
AC	0.097 7	1	0.097 7	0.686 3	0.434 8
BC	0.390 6	1	0.390 6	2.750 0	0.141 5
A <sup>2</sup>	0.453 3	1	0.453 3	3.190 0	0.117 5
B <sup>2</sup>	0.987 9	1	0.987 9	6.940 0	0.033 7
C <sup>2</sup>	0.001 0	1	0.001 0	0.007 2	0.934 6
残差 Residual	0.996 1	7	0.142 3		
失拟项 Lack of fit	0.683 6	3	0.227 9	2.920 0	0.163 9
误差 Pure error	0.312 5	4	0.078 1		
合计 Cor total	8.780 0	16			

粒率下降;当曲柄电机转速一定时,单粒率随着种量的增大呈先增大后减小的趋势,因为增加种量在一定程度上会增加充种的机会,提高了单粒率,但种量过多可能会导致种子相互堆叠,难以单粒充种,导致单粒率的下降。由图11b可知,种量固定为4 000粒,当曲柄直径一定时,单粒率随着曲柄电机转速的提高呈先增大后减小的趋势;当曲柄电机转速一定时,单粒率随着曲柄直径的增大呈减小的趋势,且曲柄电机转速越大,减小的趋势越明显,因为曲柄直径的增加导致振动幅度变大,造成种子运动幅度变大,同时,更高的曲柄电机转速带来更大的振动频率,更多的种子会运动到充种孔,因此单粒率下降。由图11c,曲柄电机转速固定为260 r·min<sup>-1</sup>,当曲柄直径一定时,单粒率随着种量的增大呈先增大后减小的趋势;当种量一定时,单粒率随着曲柄直径的增大呈减小的趋势。

3.4.2 各影响因子对重播率的影响 由图12a可知,曲柄直径固定为30 mm,当种量一定时,重播率随着曲柄电机转速的增大呈先减小后增大的趋势,因为随着转速的提高,振动频率的增加减少了种子之间的相互聚集,重播率会下降,但如果转速过快,种子可能会因振动而相互叠加,导致重播率上升;当曲柄电机转速一定时,重播率随着种量的增大呈逐渐增大的趋势,随着种量的增加,多个种子进入排种孔的概率增大,因而重播率会增大。由图12b可知,种量固定为4 000粒,当曲柄直径一定时,重播率随着曲柄电机转速的提高呈先减小后增大的趋势;当曲柄电机转速一定时,重播率随着曲柄直径的增大呈增大的趋势,且曲柄电机转速越大,增大的趋势越明显,这是因为曲柄直径的增加导致振动幅度变大,造成种子运动幅度变大,同时,更高的曲柄电机转速带来更大的振动频率,更多的种子会运动到充种孔,因此重播率增大。由图12c,曲柄电机转速固定为260 r·min<sup>-1</sup>,当曲柄直径一定时,重播率随着

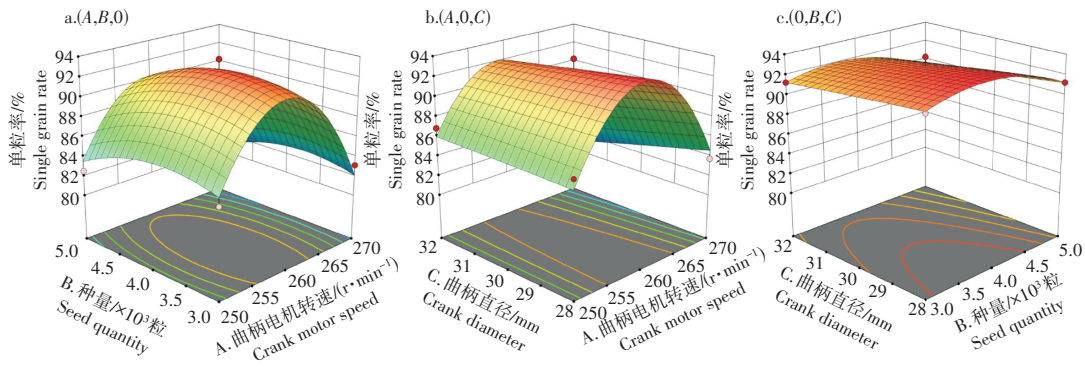


图11 各影响因子对单粒率的影响

Figure 11 Effect of various influencing factors on single grain rate

种量的增大呈增大的趋势;当种量一定时,重播率随着曲柄直径的增大呈增大的趋势。

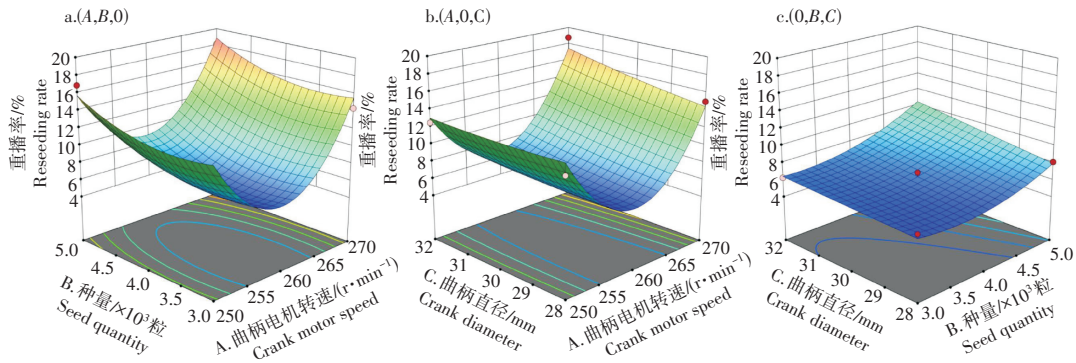


图12 各影响因子对重播率的影响

Figure 12 Effect of various influencing factors on reseed rate

3.4.1 各影响因子对漏播率的影响 由图13a可知,曲柄直径固定为30 mm,当种量一定时,漏播率随着曲柄电机转速的增大呈先减小后增大的趋势,因为在一定转速范围内对应的振动频率对于分散种子流,但是一旦超过某个转速点,振动可能会过于剧烈,导致种子无法填充到充种孔,造成漏播;当曲柄电机转速一定时,漏播率随着种量的增大呈减小的趋势,这是因为种量的增加使得排种装置中的种子密度升高,减少了种子被漏播的可能性,因此漏播率下降。由图13b可知,种量固定为4 000粒,当曲柄直径一定时,漏播率随着曲柄电机转速的提高呈先减小后增大的趋势;当曲柄电机转速一定时,漏播率随着曲柄直径的增大呈增大的趋势,且曲柄电机转速越大,增大的趋势越明显。另外,由图13c可

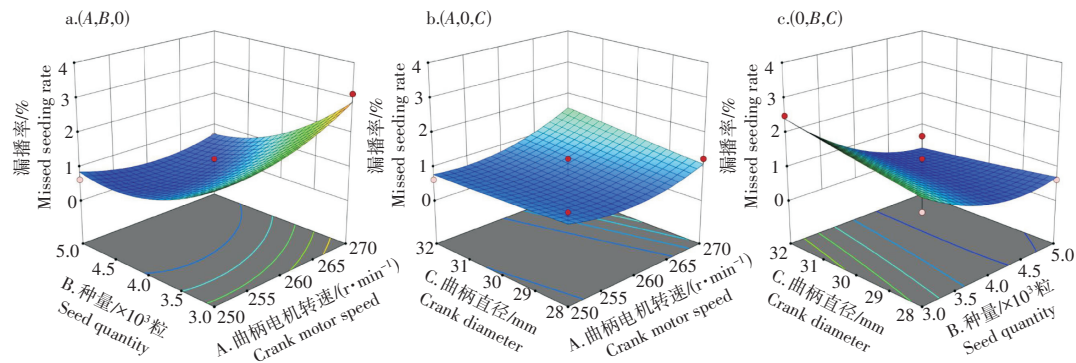


图13 各影响因子对漏播率的影响

Figure 13 Effect of various influencing factors on missed seeding rate

知,曲柄电机转速固定为 $260\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,当曲柄直径一定时,漏播率随着种量的增大呈减小的趋势;当种量大于4 500粒时,漏播率随着曲柄直径的增大呈减小的趋势,而当种量小于4 500粒时,漏播率随着曲柄直径的增大呈增大的趋势,这是因为当种量较多时(大于4 500粒),较大的振动幅度有助于分离重叠的种子,减少漏播。但当种量较少时(小于4 500粒),振动幅度的增加可能拉大了种子间的间距,导致充种孔无法在每个往返周期内都捕捉到种子,因而漏播率上升。

### 3.5 参数优化及验证

为了优化机械式辣椒精量排种装置的性能,提高排种装置的作业质量,以曲柄电机转速 $A$ 、种量 $B$ 和曲柄直径 $C$ 为变量,对各参数进行多目标优化求解。结合前文分析,通过Design-Expert 13.0进行计算,获得机械式辣椒精量排种装置的最小综合分组合为:曲柄电机工作转速 $260\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,种量4 000粒,曲柄直径28 mm。

## 4 样机试验

为验证最优参数组合下的排种装置性能,根据设计制作样机并开展样机试验,试验地点在湖南农业大学智能农机装备湖南省重点实验室。选取 $16\times 10$ 的160孔穴、尺寸为 $570\text{ mm}\times 360\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的漂浮泡沫穴盘和兴蔬皱辣2号线椒种子进行试验,试验用的育苗基质为湘正农科通用型,根据农艺要求将基质喷水,湿润后装盘并进行压穴,人工对试验用种子进行清选,确保种子饱满无损伤。试验装置如图14。

根据最优解设置相关参数进行实机试验,连续试验3次取平均值,得到平均单粒率为91.46%,平均重播率为7.29%,平均漏播率为1.25%。

## 5 讨论与结论

排种器是实现辣椒自动精量播种的关键部件,我国目前对辣椒这类扁平形状不规则种子的穴盘育苗机械式精量排种器研究较少,已有研究基本为气力式精量排种器。张欢等<sup>[32]</sup>针对辣椒等不规则且流动性差的小粒径种子,利用压力差设计了一种气吹供种盘吸式排种器,单粒率达到91.8%。赵永满等<sup>[33]</sup>通过对不同供种方式进行研究,设计了一种气吹悬浮供种的气吸滚筒式排种器,单粒率达到91.5%。梅玉茹等<sup>[34]</sup>通过振动供种配合凸形滚筒设计了一种气吸滚筒式排种器,实现了番茄种子的穴盘精量排种。这些研究推动了蔬菜穴盘育苗精量播种自动化进程,提高了蔬菜育苗的机械化水平。

本研究在磁力回位型排种器的基础上,提出一种适配辣椒漂浮育苗的机械式辣椒精量排种装置,采用权重结合隶属度计算综合得分对排种装置的参数组合进行评价,在排种装置旋转角度 $35^\circ$ 和旋转角速度 $0.07\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (即生产率约 $206\text{ 盘}\cdot\text{h}^{-1}$ )下,最优的作业参数组合为:曲柄电机工作转速 $260\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,种量4 000粒,曲柄直径28 mm。最优作业参数组合下排种装置样机试验排种单粒率为91.46%、重播率为7.29%、漏播率为1.25%,该排种装置播种效果较好,满足辣椒漂浮育苗生产技术要求,有效降低劳动强度,相比气力式精量排种器,具有成本低、结构简单和易维护的优点,可为中小规模育苗基地提供低成本育苗设备和方案。

### 参考文献:

- [1] 乔立娟,赵帮宏,宗义湘,等.我国辣椒产业发展现状、趋势及对策[J].中国蔬菜,2023(11):9-15.
- [2] 张瑜,王宏洁,赵海誉,等.辣椒素减肥调血脂活性及其机制的研究进展[J].中国现代中药,2022,24(7):1387-1394.
- [3] ROGERS J,URBINA S L,TAYLOR L W,et al.Capsaicinoids supplementation decreases percent body fat and fat mass:Adjustment using covariates in a post hoc analysis[J].BMC Obesity,2018,5:22.

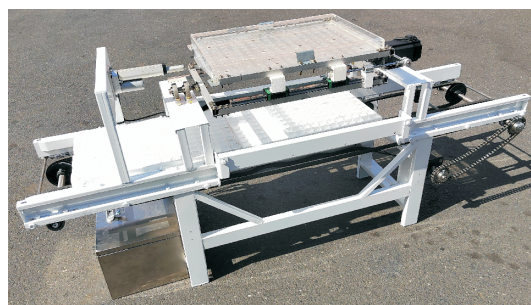


图14 机械式辣椒精量排种装置样机

Figure 14 Prototype of mechanical pepper seed precision mechanical Device

- [4] BONACCIO M,DI CASTELNUOVO A,COSTANZO S,et al.Chili pepper consumption and mortality in Italian adults [J].Journal of the American College of Cardiology,2019,74(25):3139-3149.
- [5] 苗妍秀,曲梅,李伟,等.植物工厂中不同供液方式对辣椒育苗的影响[J].长江蔬菜,2012(6):33-36.
- [6] 袁艺,陶婧,汪骞,等.辣椒漂浮育苗营养液筛选与优化研究[J].西南农业学报,2017,30(9):2085-2090.
- [7] 张锦阁,范高领,胡明文.辣椒漂浮育苗影响因素研究进展[J].中国瓜菜,2018,31(4):5-9.
- [8] 刘志雄,袁伟玲,陈卫芳,等.瓜类蔬菜漂浮育苗技术[J].湖北农业科学,2022,61(增刊1):256-258.
- [9] 姜有忠,侯晓晓,赵永满,等.气吹投种的气吸滚筒式精量排种器设计与试验[J].甘肃农业大学学报,2019,54(2):211-218.
- [10] 翟建波,夏俊芳,周勇,等.气力式水稻精量穴直播排种器排种性能试验[J].沈阳农业大学学报,2018,49(2):158-164.
- [11] 杨全军,杜俊,胡毅,等.双盘高速气力式水稻精量排种器的设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2019,50(5):576-584.
- [12] 张明华,姜有聪,何思愚,等.蔬菜气吸轮式精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(7):98-109.
- [13] 夏红梅,周士琳,刘园杰,等.扁平茄果类种子导向振动供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(9):82-88.
- [14] 张静,李志伟,刘峰春,等.气力滚筒式排种器种子吸附边界模型及验证[J].农业工程学报,2016,32(23):12-20.
- [15] 陈玉龙,刘泽琪,韩杰,等.气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(23):1-11.
- [16] 梁玉玥,郑侃,杜俊,等.稻麦兼用排种器振动供种装置性能试验[J].沈阳农业大学学报,2021,52(6):708-717.
- [17] 李玉环,魏亚男,杨丽,等.扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):43-53.
- [18] 刘彩玲,李方林,姜萌,等.点胶-纸带式小粒径种子蔬菜精密播种机设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(13):20-29.
- [19] 杨昌敏,易文裕,邱云桥,等.育苗精量播种机研究现状及发展分析[J].中国农机化学报,2022,43(4):183-188.
- [20] 贾雅丽.精量排种器对比及发展现状分析[J].农业技术与装备,2022(5):38-40.
- [21] 刘洋,杨善东,魏忠彩,等.甜菜生产全程机械化技术与装备研究进展[J].中国农机化学报,2022,43(3):36-46.
- [22] 李海艳,朴万寿,刘晔.磁力回位型育苗播种器[P].河北:CN201620339291.1,2016-08-31.
- [23] 杨潭,王应彪,李玮,等.离心式玉米种子定向整列排种装置设计与试验[J].南京农业大学学报,2022,45(4):809-817.
- [24] 钟江,张宪,蒋建福.农业机械质心测量方法研究[J].农业机械,2010(S2):116-119.
- [25] 张书会,李经玮,何登军,等.质心测量方法综述[J].科技创新与应用,2016(24):63.
- [26] 吴朝阳,解法旺,陈书法,等.基于大豆冠层状态变化的变量施药系统设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2023,54(1):90-97.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.单粒(精密)播种机试验方法:GB/T 6973-2005[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [28] 祁兵,张东兴,刘全威,等.集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J].农业工程学报,2015,31(1):20-27.
- [29] 郭军海,石林榕,赵武云,等.弹性吸种垫式滚轮排种器试验与参数优化[J].东北农业大学学报,2022,53(8):80-92.
- [30] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].2版.北京:化学工业出版社,2008.
- [31] 谢方平,刘敏章,杨小米,等.袋装缓控释肥有序排肥装置设计[J].农业工程学报,2019,35(16):40-49.
- [32] 张欢,罗昕,马亚朋,等.气吹供种盘吸式排种器排种性能试验研究[J].机械设计与制造,2017(5):92-95.
- [33] 赵永满,侯晓晓,姜有忠,等.气吹悬浮供种的气吸滚筒式排种器设计与实验[J].农机化研究,2019,41(2):114-118.
- [34] 梅玉茹,谢方平,王修善,等.番茄气吸滚筒式排种器的优化设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(6):730-736.

[责任编辑 亓国]