

植物工厂蔬菜穴盘育苗吸针式精密播种装置设计与试验

秦亦娟¹ 谭穗妍² 杨传艺³ 王曦成³ 刘赛赛⁴ 马旭^{3,5}

(1. 广州理工学院智能制造与电气工程学院, 广州 510540; 2. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642;
3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 4. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014;
5. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对植物工厂岩棉栽培基质育苗中种子易弹跳、投种区域小导致传统播种设备精度不足的问题,设计一种吸针式精密播种装置。以 PLC(可编程逻辑控制器)为控制核心构建控制系统,设计气缸驱动组件曲线轨道实现吸针垂直取、投种;基于 ANSYS Fluent 仿真获得气室与吸针最优参数(气孔直径为 8 mm、间距为 205.3 mm),并通过试验确定气室真空压力及适配不同种子的吸针直径。经 EDEM 仿真,抛物面减速引导面与圆弧方向引导面组合的导种管投种效果最佳。Box - Behnken 试验优化结果表明:罗莎绿最优参数为吸种负压 5.9 kPa、吸针直径 0.6 mm、振动频率 44.4 Hz;青梗菜最优参数为吸种负压 4.2 kPa、吸针直径 0.5 mm、频率 42.5 Hz。当生产率为 80、100 盘/h 时,罗莎绿单粒合格指数分别为 98.35%、98.08%;青梗菜分别为 98.29%、98.11%,满足高精密作业要求,为植物工厂蔬菜穴盘育苗高精度播种装备提供技术支撑。

关键词: 植物工厂;蔬菜穴盘育苗;吸针式;精密播种装置;岩棉栽培基质

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)08-0055-14

OSID:



Design and Experiment of Needle-suction Precision Seeding Device for Plug Seedling Production of Vegetables in Plant Factories

QIN Yijuan¹ TAN Suiyan² YANG Chuanyi³ WANG Xicheng³ LIU Saisai⁴ MA Xu^{3,5}

(1. School of Intelligent Manufacturing and Electrical Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou 510540, China
2. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
4. Nanjing Institute of Agriculture Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China
5. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Aiming to address the low precision of traditional seeding equipment in rock wool substrate seedling cultivation of plant factories caused by easy seed bouncing and small seeding area, a needle-suction precision seeding device was designed. A control system was built with a programmable logic controller (PLC) as the core; a curved track for the cylinder-driven component was designed to enable the suction needle to pick and drop seeds vertically. Based on ANSYS Fluent simulation, the optimal parameters of the air chamber and suction needle were obtained (air hole diameter: 8 mm, spacing: 205.3 mm), and experiments were conducted to determine the air chamber's vacuum pressure and suction needle diameters suitable for different seeds. EDEM simulation showed that the seed guide tube combining a parabolic deceleration guide surface and an arc-shaped direction guide surface achieved the best seeding effect. Box - Behnken experiment-based optimization and verification revealed: for *Lactuca sativa*, the optimal parameters were 5.9 kPa of seed suction negative pressure, 0.6 mm of suction needle diameter, and 44.4 Hz of vibration frequency; for *Brassica rapa subsp. chinensis*, the optimal parameters were 4.2 kPa of negative pressure, 0.5 mm of suction needle diameter, and 42.5 Hz of frequency. When the productivity was 80 trays/h and 100 trays/h, the single-seed qualification indices of *Lactuca sativa*

收稿日期: 2025 - 09 - 24 修回日期: 2025 - 11 - 02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000702 - 3)和广州理工基金项目(YBL2025014)

作者简介: 秦亦娟(1998—),女,助教,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: yijuan.qin@foxmail.com

通信作者: 马旭(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

were 98.35% and 98.08%, respectively, while those of *Brassica rapa subsp. chinensis* were 98.29% and 98.11%, respectively. These results can meet the requirements of high-precision operations and provide technical support for high-precision plug seedling seeding equipment for vegetables in plant factories.

Key words: plant factory; vegetable plug seedling raising; suction needle type; precision seeding device; rock wool cultivation substrate

0 引言

我国为全球蔬菜生产与消费第一大国,蔬菜在国民膳食结构里举足轻重,其中水培叶类蔬菜以植物工厂作为高效的农业生产系统,凭借对垂直立体空间的利用,可实现叶类蔬菜的全年持续生产^[1-2]。与大棚种植相比,植物工厂对设备生产率要求相对不高,却更注重作业精度。在植物工厂的蔬菜育苗环节,为维持无菌育苗环境,主要采用岩棉栽培块作为生长基质进行育苗,以保证良好的透气性、保水性且自身不易滋生微生物等特性^[3-4]。然而,岩棉栽培块作为基质其表面弹性大导致播种过程中种子易发生弹跳滚动位移,且岩棉栽培块上穴孔投种区域较常规基质更小,投种精度难保证,对播种质量提高形成了双重制约,致使传统播种设备难以满足植物工厂蔬菜穴盘育苗高精度精密播种的要求^[5]。为此,针对这一技术瓶颈,亟需研发适配于岩棉栽培块作为基质的精密播种装置。

植物工厂水培蔬菜技术在现代农业生产中具有重要地位^[6-7]。国外对植物工厂水培蔬菜栽培模式研究比较早,欧洲荷兰植物工厂技术先进,日本和北美也相继开展相关研究;荷兰、意大利和美国等企业开发出多种蔬菜穴盘育苗自动化生产线^[8-9]。美国 Black More 公司生产的气吸针式播种机能够播种多种类型的种植,如瓜类、豆类、玉米等,播种效率不低于 300 盘/h。意大利 MOSA 公司生产的 Line 系列播种生产线具有极强的竞争力;播种生产线采用模块化设计,由堆垛机、拆垛机、灌溉机、播种机等模块组成,通过电子控制系统控制全部模块^[10]。荷兰 VISSER 公司生产的 Granette 2000 型气吸双排针式流水线播种机,通过编程可实现自定义设置吸针真空度、播种杆和种子料斗的振动参数,从而适配各种尺寸种子以及包衣种子、异形种子^[11]。整体来看国外设备的作业效率与播种精度高,正朝着高度自动化、智能化方向发展。我国设施与植物工厂蔬菜育苗产业化发展迅速,众多机构开展了大量研究,其中实现“一穴一粒”的穴盘精密播种育苗要求是关键技术之一^[12-16]。杭州赛得林智能装备有限公司生产的 2BPC-1000 型蔬菜花卉滚筒式播种机,采用气吸式滚筒播种方式,从基质装盘、压穴、播种、覆土

到喷淋,全机采用光机电一体控制、无盘检测等创新技术,实现了蔬菜播种育苗的自动化流水生产,播种效率为 1 000 盘/h。台州市一鸣机械股份有限公司生产的 YM-0913 型蔬菜花卉气吸式精量播种流水线,能高效播种花卉、果蔬、烟草等种子,并能够一次完成铺土、打穴、播种、覆土、洒水等操作,播种效率为 360 盘/h^[17]。山东中天盛科自动化设备有限公司生产的 ZK-100W 型吸针式精量播种机工作效率为 260 盘/h。广州市绿翔机电安装工程有限公司生产的流水线针式播种机能够播种秋海棠到甜瓜等多种大小不一的种子,针对大田基质播种穴盘播种精度可达 98%。综合国内外研究与应用可见,相较于磁吸式和机械式育苗播种机,气力式因对种子形状尺寸要求低、不伤种,且兼具高效率与高精度的综合优势,已成为国内外小粒径蔬菜种子穴盘育苗的首选技术,尤其是气吸滚筒式和吸针式,已成为植物工厂育苗装备的主流方向^[18-27]。但上述研究主要适用于装有常规基质且穴孔尺寸较大的传统穴盘育苗,不适用于岩棉栽培块作为基质形成的投种区域小、表面弹性大的植物工厂穴盘高精度精密播种。

为此,针对植物工厂蔬菜穴盘育苗高精度精密播种技术要求,本文采用 ANSYS Fluent、EDEM 等软件对播种气室与吸针、导种构件等播种关键技术进行设计与优化,研制适用于岩棉作为基质的蔬菜穴盘育苗吸针式精密播种装置,并通过 Box-Behnken 试验设计优化装置工作参数,以期对植物工厂蔬菜穴盘育苗播种设备研发奠定基础。

1 精密播种装置结构与工作原理

1.1 整机总体结构

气力蔬菜苗盘育苗精密播种机主要由穴盘输送机构、吸针式育苗精密播种装置、淋水装置、电气控制系统等组成,如图 1 所示。整机一次作业可对穴盘完成同步定位输送和单粒精密播种等工序;还可以挂接机械振动式精密撒播装置和淋水装置,进行蔬菜精密撒播和淋水作业,实现一机多用。

1.2 吸针式精密播种装置结构及工作原理

植物工厂水培蔬菜采用的育苗穴盘为 12 行 20 列,共有 240 穴孔。育苗穴盘外形尺寸 596 mm × 396 mm × 44 mm,穴孔上部直径 24 mm、底部直径

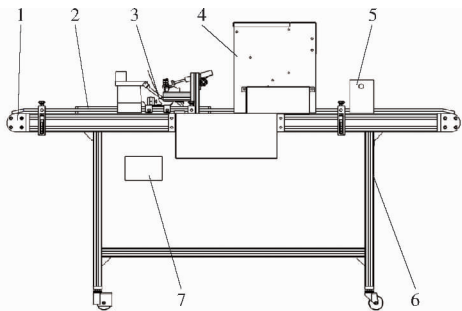
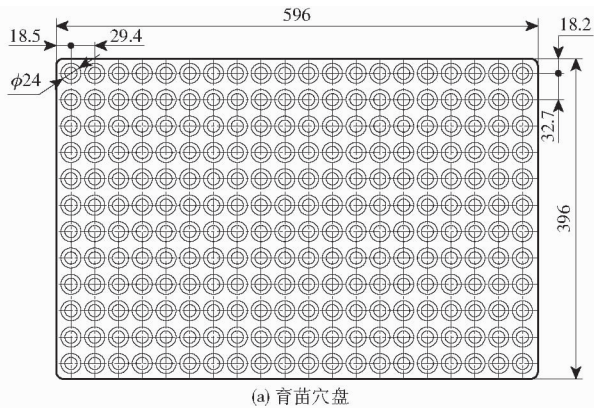


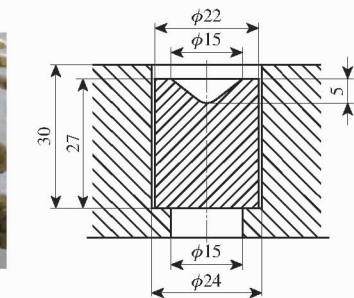
图 1 气力蔬菜苗盘育苗精密播种机示意图
Fig.1 Structure diagram of pneumatic precision seeder for vegetable seedling tray cultivation

1. 穴盘输送机构 2. 穴盘 3. 吸针式育苗精密播种装置 4. 机械振动式精密撒播装置 5. 淋水装置 6. 机架 7. 电气控制系统

15 mm, 深 30 mm, 如图 2a 所示。岩棉栽培块为单侧有凹圆锥体的圆柱体, 直径 22 mm, 高度 27 mm, 凹圆锥体上部直径 15 mm、中部深 5 mm, 如图 2b 所示。育苗前将岩棉块凹锥体朝上放入穴盘的每个穴孔。种子需要精准播放在岩棉块上面的凹圆锥体处。



(a) 育苗穴盘



(b) 岩棉栽培块

图 2 穴盘与岩棉栽培块

Fig.2 Tray and rockwool cultivation

精密播种装置采用吸针式, 主要由吸针、气室、气缸驱动组件、穴盘输送定位机构、导种构件和种盒等组成, 如图 3 所示。吸针式精密播种装置的工作过程包括放种、放盘、穴盘检测和精密播种等环节。工作时, 将育苗穴盘放置传送带上, 当穴盘输送定位机构检测到穴盘时, 控制系统控制振动马达转动, 使种盒内种子振动, 种群“沸腾”以提升充种效果, 气室接通负压, 吸针处于吸种状态, 实现种子吸附

(图 4a)。同时, 控制系统控制传送带前进一个穴孔距离, 使穴盘穴孔正中心移动至导种构件落种孔下方并停止。然后, 气缸驱动吸针移动至导种构件上方, 使吸针对准落种孔(图 4b)。最后控制系统控制气室断开负压, 吸针上的整排种子通过落种孔落入导种构件上滑至穴盘岩棉栽培块上部的凹圆锥体中心, 完成一行播种作业。播种后气缸带动吸针返回到吸种位置, 重复以上播种作业。

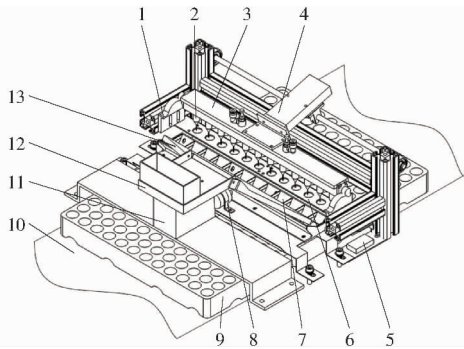


图 3 吸针式精密播种装置

Fig.3 Needle-suction precision seeding device

1. 导轨 2. 吸针 3. 气室 4. 气缸驱动组件 5. 穴盘输送定位机构 6. 导种构件 7. 种盒 8. 振动马达 9. 岩棉穴盘 10. 皮带 11. 直振送料器 12. 振动盘 13. 输料件

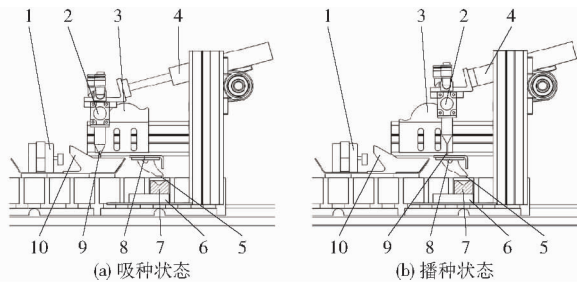


图 4 精密播种装置工作状态示意图

Fig.4 Diagrams of working state of precision seeding device

1. 振动马达 2. 气室 3. 导轨 4. 气缸驱动组件 5. 导种构件出种孔 6. 穴盘输送定位机构 7. 岩棉栽培块 8. 导种构件落种孔 9. 吸针 10. 种盒

2 关键部件设计与优化

2.1 气缸驱动组件设计

气缸驱动组件是播种机构精量吸种、精准投种的关键运动部件, 主要由气缸、导轨、滚轮、轴承座、支架、二位五通电磁阀和空压机等组成, 气室和吸针连接在滚动轮上。气缸的伸缩运动受到轴承转动副、气缸移动副以及滚动轮与导轨组成的滚动副约束, 如图 5a 所示。气缸为双出杆, 具有较强的抗扭转能力, 伸缩工作行程为 50 mm; 气缸通过钢制连接件与气室固定连接, 减少气室在 2 个工位之间运动的偏差, 提高吸针重复定位精度。

导轨是气缸驱动组件中决定吸针角度和高度的

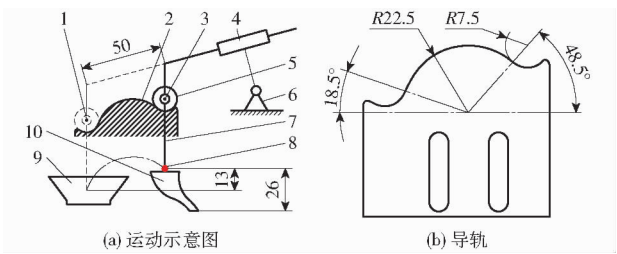


图 5 气缸驱动组件的运动与导轨

Fig. 5 Motion of cylinder-driven mechanisms and guide rail

1. 取种点 2. 滑动区间 3. 投种点 4. 气缸 5. 滚动轮 6. 气缸支点 7. 吸针 8. 种子 9. 种盒 10. 导种构件

关键部件,如图 5b 所示,导轨分为取种点、滑动区间和投种点 3 部分。为了实现吸针取、投种时位置准确控制,在气缸、气缸支点、滚动轮和导轨等部件共同约束下,使吸针在取种点和投种点时均处于垂直姿态。滑动区间为圆弧轨道,可使吸针能够从取种点平稳运行到达投种点,保证吸针在 2 个工位间精准切换。取种点和投种点的两端为两相切的半圆弧轨道,保证取、投种位置准确控制。

2.2 气室及吸针设计

2.2.1 气室及吸针结构与原理

气室及吸针是保证单粒吸种的核心部件。气室及吸针与气缸驱动组件固定连接,两端由端盖和硅胶垫密封,并连接有滚动轮;气室的主管内径为 12 mm,主管顶端开有 2 个负压孔(内径 8 mm),依次通过气管接头、气管、电磁阀与真空泵连接;主管底端开有 12 个吸气孔(内径 8 mm),间隔 l 与育苗穴盘穴孔间距一致,吸气孔通过转接头与吸针连接,吸针为点胶螺口针头,针头长 13 mm,针头内径为 0.3 ~ 1.5 mm。可适用于不同类型的蔬菜种子并实现快速更换,如图 6 所示。

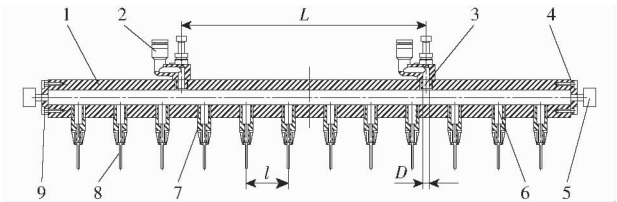


图 6 气室结构

Fig. 6 Gas chamber structure

1. 主管 2. 气管接头 3. 负压孔 4. 硅胶垫 5. 滚动轮 6. 吸气孔 7. 转接头 8. 吸针 9. 气室端盖

吸针口处的流速是影响负压产生和种子吸附效果的重要因素,在一定压力下,流速稳定会保证吸附种子性能。为提高吸针口处流速的均匀性,提高吸种精度,需对气室内部气路进行优化设计。分析可知,影响吸孔吸种效果的因素主要有气管直径 D 、气管间距 L 及吸针间距 l 。其中,吸针间距受到穴盘穴孔间距参数的约束,无法进行更改。因此,对气管直

径 D 和气管间距 L 进行优化设计。

2.2.2 气管直径和气管间距优化设计

为分析气管直径和气管间距对吸针口流速均匀性的影响,通过初步试验验证后进行正交仿真试验。根据左右吸针最大间隔 360 mm 与气管机械结构能够实现的最小间距 20 mm,设置气管间距因素的不同水平。选取气管间距 20、190、360 mm 和气管直径 4、6、8 mm 进行二因素三水平正交试验,各因素编码如表 1 所示。使用 ANSYS Fluent 软件对气室流体域进行流体仿真分析,流体域网格模型如图 7 所示^[28]。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of experimental factors

编码	因素	
	气管直径/mm	气管间距
-1	4	20
0	6	190
1	8	360

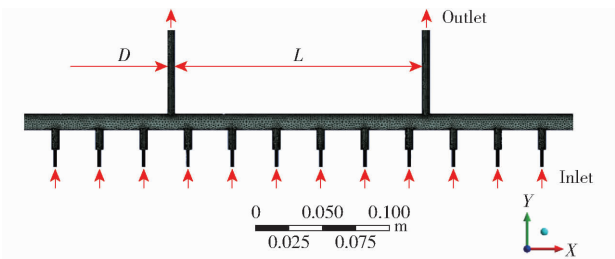


图 7 流体域网格模型

Fig. 7 Fluid domain mesh model

仿真得出 12 个气孔出口流速与压力,并以流速变异系数作为评价指标,每组进行 3 次仿真,试验结果取平均值。仿真试验方案与结果如表 2 所示, A 、 B 为因素编码值。

表 2 仿真试验方案与结果

Tab. 2 Simulation experimental scheme and results

试验序号	A	B	流速均值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压力 均值/ Pa	流速变 异系数 Y/%	压力 变异系 数/%
1	-1	-1	23.98	-352.49	1.96	3.95
2	1	-1	67.87	-2 823.21	1.85	3.69
3	-1	1	24.44	-366.21	1.54	3.08
4	1	1	69.67	-2 974.51	1.32	2.65
5	-1	0	24.41	-365.36	0.80	1.60
6	1	0	69.13	-2 927.57	0.62	1.24
7	0	-1	49.08	-1 477.00	2.18	4.39
8	0	1	50.34	-1 553.08	1.59	3.18
9	0	0	50.18	-1 543.09	0.88	1.77
10	0	0	50.26	-1 547.74	0.83	1.68
11	0	0	50.13	-1 539.74	0.86	1.74
12	0	0	50.15	-1 540.97	0.80	1.62
13	0	0	50.20	-1 543.81	1.01	2.06

利用 Design-Expert 13.0 软件对仿真试验结果和回归方程进行方差分析和显著性检验,结果如表 3 所示。流速变异系数模型拟合度极显著 ($P < 0.01$),同时失拟项不显著,与实际情况拟合较好。通过比较各因素的 F 值可知, B 、 A^2 和 B^2 对流速变异系数的影响极显著, A 对流速变异系数的影响显著。剔除不显著的回归项,在保证回归模型显著、失拟项不显著的前提下,流速变异系数回归方程为

$$Y=0.889\,1-0.085\,3A-0.257\,4B-0.194\,3A^2+0.986\,6B^2$$

(1)

表 3 回归模型方差分析

Tab.3 Analysis of variance for regression models

变异来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	3.24	5	135.66	<0.000 1 **
<i>A</i>	0.043 6	1	9.14	0.019 3 *
<i>B</i>	0.397 6	1	83.27	<0.000 1 **
<i>AB</i>	0.002 6	1	0.5368	0.487 6
<i>A</i> ²	0.104 3	1	21.84	0.002 3 **
<i>B</i> ²	2.69	1	563.07	<0.000 1 **
残差	0.033 4	7		
失拟项	0.006 5	3	0.319 1	0.812 4
误差	0.027 0	4		
总和	3.27	12		

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

通过 Design-Expert 13.0 软件对响应曲面分析,如图 8 所示。各因素对流速变异系数影响的主次顺序为气管间距 B 、气管直径 A ,交互项 AB 对流速变异系数的影响不显著。基于此结果,以气管间距 B 和气管直径 A 为因素,流速变异系数为性能指标进行优化求解,其目标函数和边界条件为

$$\begin{cases} \min Y \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

(2)

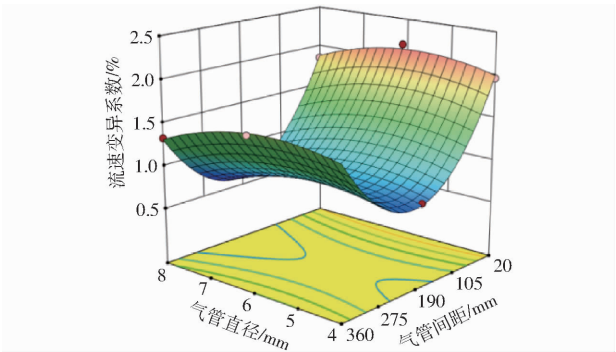


图 8 响应曲面

Fig.8 Response surface analysis chart

求解得到最佳优化结果为气管直径 7.9 mm,气管间距 205.3 mm。仿真得到吸针口流速变异系数为 0.61%,气室垂直截面流速云图如图 9 所示,各

吸针口流速如表 4 所示。考虑到气管为标准工业产品,气室气管直径取 8 mm。

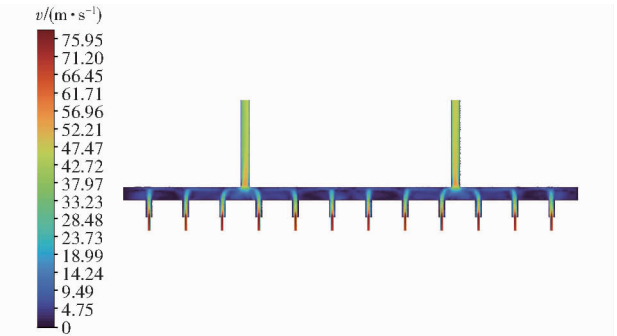


图 9 气室流速云图

Fig.9 Velocity contour map of gas chamber

表 4 吸针口流速

Tab.4 Flow velocity at suction needle port

吸针序号	1	2	3	4	5	6
流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	68.98	68.92	69.85	69.44	69.25	68.60
吸针序号	7	8	9	10	11	12
流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	68.63	68.81	69.36	69.87	69.31	68.96

2.2.3 气室工作负压优化

充种精度是影响播种装置性能的核心指标。当气室工作负压过低时,无法产生足够的吸附力以成功吸吸种子,进而引发漏播现象;反之,若负压过高,则会导致吸针单次吸附多颗种子,造成重播问题。为探究适宜的负压参数,选取 0.5 mm 吸针,设置气室真空负压为 2 ~ 7 kPa,对青梗菜和罗莎绿种子开展吸附试验。试验结果如图 10 所示,随着负压增大,种子吸附成功率相应提高,但同时也会增加多粒吸附的概率。由于青梗菜种子颗粒尺寸较小,质量轻于罗莎绿种子,满足一定充种合格率所需真空负压小于罗莎绿的。当吸附青梗菜种子时,将真空负压设定在 3 ~ 4 kPa 范围,吸附罗莎绿种子时,将真空负压设定在 5 ~ 6 kPa,获得较为理想的充种效果。

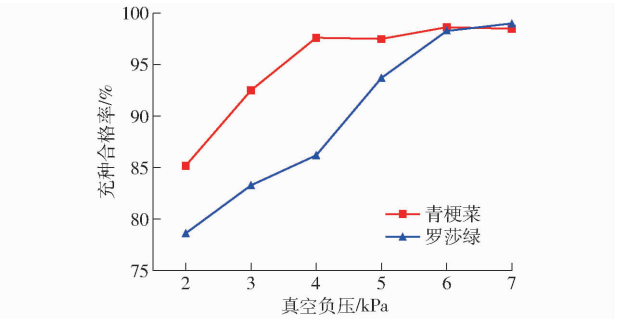


图 10 真空负压与充种合格率的关系

Fig.10 Relationship between negative pressure and qualification rate

2.2.4 吸针选型

为探究适配的吸针直径参数,对青梗菜种子,将

真空负压固定为 3 kPa、振动频率设为 30 Hz;对罗莎绿种子,则将真空负压调节为 5 kPa、振动频率设为 45 Hz,分别采用 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 mm 5 种孔径的吸针进行对比试验。试验结果如图 11 所示,吸针孔径对充种合格率呈现显著的非线性影响,随着孔径增大,充种合格率先升高后降低。从机理上,当吸针孔径增大时,与种子的接触面积增加,产生的吸附力相应增强,孔径过大则会因吸附范围扩大而同时吸附多粒种子;但孔径过小会因吸附力不足导致无法有效吸种,两者均会降低充种精度。根据充种合格率初步选型结果为青梗菜种子采用 0.5 mm 左右孔径的吸针;罗莎绿种子采用 0.6 mm 左右孔径的吸针。

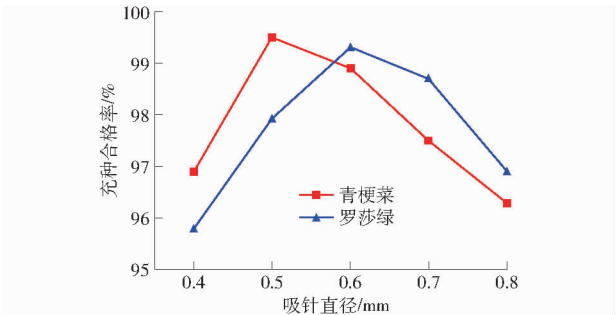


图 11 吸针直径与充种合格率的关系

Fig. 11 Relationship between needle diameter and qualification rate

2.3 导种构件结构设计与优化

蔬菜种子投放至岩棉栽培块凹圆锥体处时,因碰撞产生弹跳滚动,会导致播种合格率降低问题。如何减少种子弹跳滚动的有效方式是采用导种构件,通过控制种子下落轨迹,降低种子与岩棉栽培块接触时的相对速度大小,并改变方向,从而提高种子投种精度。

2.3.1 导种构件结构

导种构件由安装板与导种件构成,如图 12 所示。安装板材料为 Q235 钢板,设有 12 个落种孔和弯折肋板,用于固定导种件并保证其与穴盘穴孔中岩棉栽培块凹圆锥体中心精准对位。导种件材料为光固化类 ABS 树脂,采用 SLA(立体光固化)加工,后处理使用粗砂纸打磨,内部设置多个导种通道(共 12 个,与穴盘每排穴孔数相等),通道由落种孔、导种管(减速引导管、方向引导管)和出种孔组成。

2.3.2 导种管作用机理

种子进入导种管后,通过摩擦消耗重力势能降低下落速度并改变方向。采用 2 段相切曲面进行导种管引导面的设计,分别实现种子减速与方向调整,如图 12 所示。种子进入导种管后首先接触减速引

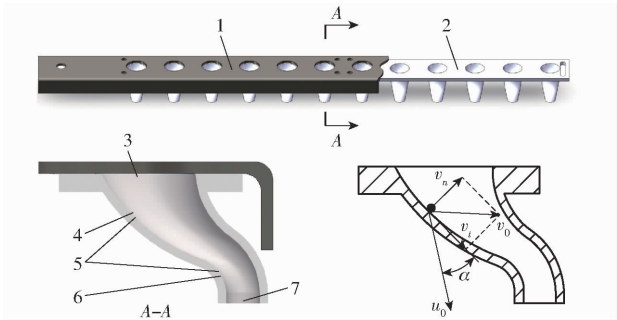


图 12 导种构件结构

Fig. 12 Guide component structure

1. 安装板 2. 导种件 3. 落种孔 4. 减速引导面 5. 导种管
6. 方向引导面 7. 出种孔

导面,碰撞过程其速度特性满足^[29]

$$\begin{cases} v_t = u_0 [f \sin \alpha (k - 1 + \cos \alpha)] \\ v_n = k u_0 \sin \alpha \\ v_0 = \sqrt{v_t^2 + v_n^2} \end{cases} \quad (3)$$

- 式中 v_t ——碰撞后种子切向分速度, m/s
 v_n ——碰撞后种子法向分速度, m/s
 v_0 ——碰撞后种子合速度, m/s
 α ——种子与减速引导面的碰撞角度, (°)
 u_0 ——种子碰撞前合速度, m/s
 k ——法向碰撞恢复系数
 f ——种子与减速引导面的摩擦因数

碰撞角度 α 由减速引导面的曲率半径决定。减速引导面曲率半径越大,碰撞点处 α 越小,导致法向分速度 v_n 越低。种子与导种件的摩擦因数 f 及法向碰撞恢复系数 k 为定值,因此种子运动轨迹主要受减速引导面的几何参数影响。种子经减速引导面减速后,继续沿方向引导面运动,二者相切设计保证种子运动连贯性。方向引导面通过分解水平速度分量使种子垂直落入岩棉栽培块的凹圆锥体中心处,有效提高投种精度。

2.3.3 导种构件仿真

为分析导种构件对种子碰撞后的轨迹,以及减速性能的调控效果,采用 EDEM 软件构建种子从导种管落至岩棉栽培块上全过程动力学仿真模型,以量化分析其运动特性^[30-32]。通过初步分析,构建 4 种减速引导面,分别为抛物面、椭圆面、圆弧面和平面结构。为实现 4 种导种管的平稳连接,并控制种子下落方向,方向引导面统一用圆弧面导向,4 种导种管的结构及参数如图 13 所示。

(1) 仿真方法与材料

为了对比 4 种引导面形态对种子投放后下落位置的影响,基于 EDEM 离散元软件建立蔬菜种子-导种管-岩棉栽培块等多体相互作用仿真分析模型,模拟种子实际运动过程,构建的模型如图 14 所示。

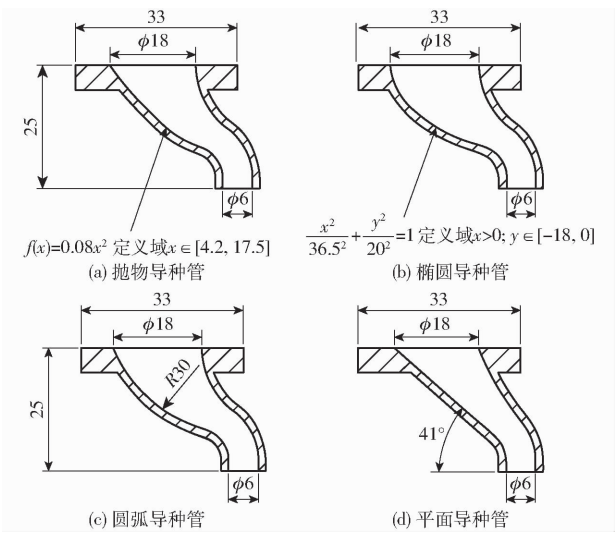


图 13 导种管结构及参数
Fig. 13 Motion process of seed collision

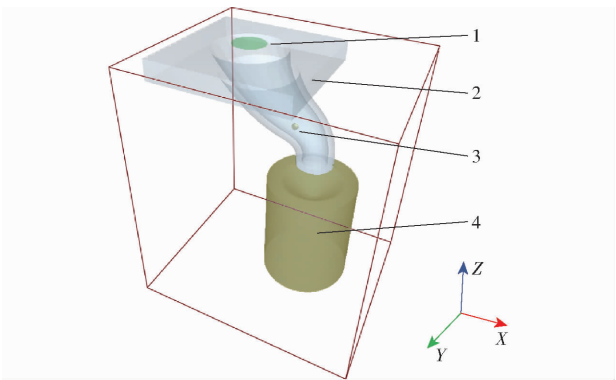


图 14 EDEM 仿真多体相互作用模型
Fig. 14 EDEM simulation multi-body interaction model
1. 投种点区域 2. 导种构件 3. 种子 4. 岩棉栽培块

EDEM 仿真时设定投种点区域为岩棉栽培块凹圆锥体上部直径 15 mm 的圆,仿真吸针投种下落后种子的位置偏移和速度变化。

蔬菜种子颗粒模型有青梗菜和包衣罗莎绿,如图 15 所示。根据测定的蔬菜种子的本征参数进行

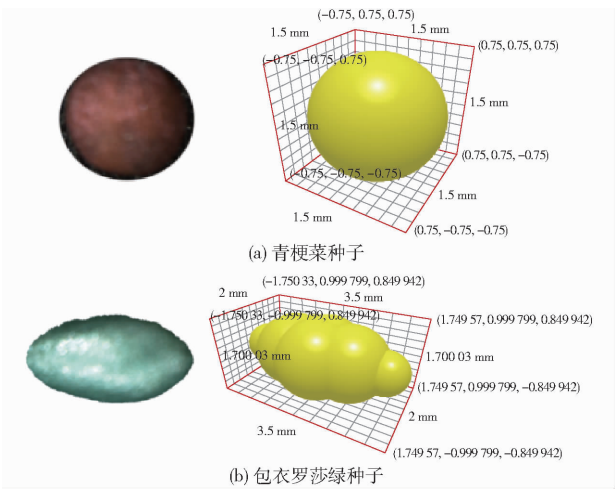


图 15 种子实物图与颗粒模型
Fig. 15 Photographs of actual seeds and granular models

建模,青梗菜种子球度为 96%,球度较高,可选用单球模型;包衣罗莎绿种子为椭球形,球度为 65%,通过若干球形颗粒堆积形成颗粒模型。由于 EDEM 仿真中颗粒间接触模型直接影响动力学结果的准确性,需根据种子物理特性确定模型参数。蔬菜种子含水率为 5%,颗粒间黏附力可忽略,因此将种子视为理想非黏性颗粒,EDEM 仿真选用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型^[33]。该模型通过简化颗粒间切向力与法向力的计算,避免黏附效应干扰,适用于低含水率种子的力学分析。种子、导种管及岩棉栽培块的密度、弹性模量等参数见表 5,颗粒-颗粒、颗粒-边界摩擦因数及碰撞恢复系数见表 6,其中 ABS 树脂参数通过与导种管相同流程加工的样品测试得出。

表 5 材料属性参数设置
Tab. 5 Material property parameter settings

参数	青梗菜	罗莎绿	ABS 塑料	岩棉
泊松比	0. 25	0. 25	0. 39	0. 25
剪切模量/Pa	1.1×10^7	1.0×10^7	8.9×10^8	1.3×10^6
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 094	1 327	1 060	77. 75

表 6 离散元仿真接触力学参数设置
Tab. 6 Contact mechanics parameter settings for discrete element simulation

类别	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
青梗菜种间	0. 60	0. 50	0. 02
包衣罗莎绿种间	0. 50	0. 50	0. 05
青梗菜- ABS	0. 71	0. 44	0. 02
包衣罗莎绿- ABS	0. 33	0. 63	0. 05
青梗菜-岩棉	0. 41	0. 62	0. 05
包衣罗莎绿-岩棉	0. 28	0. 75	0. 05

(2) 仿真结果与分析

为排除随机误差,针对每个导种构件,对青梗菜与包衣罗莎绿种子分别进行 400 次仿真,仿真结果如图 16 所示。

每种工况下种子落点分布如图 16a 所示,所有种子均能够在导种管的作用下落在岩棉凹圆锥体区域内,实现了提高投种精度的效果,但不同种子和不同导种管结构的种子落点存在差异。受种子均匀度的影响,青梗菜比包衣罗莎绿的种子落点更为集中;而罗莎绿种子因形状的各向异性引发运动差异,使落点分布呈现环形。种子落点统计结果如表 7 所示,其中 4 种导种管的种子位置距岩棉凹圆锥体上部中心的平均偏移距离 S 为抛物导种管 < 圆弧导种管 < 椭圆导种管 < 平面导种管。总体看落种距离均远小于凹圆锥体上部直径 15 mm。

种子通过导种构件后与岩棉接触的速度分布如

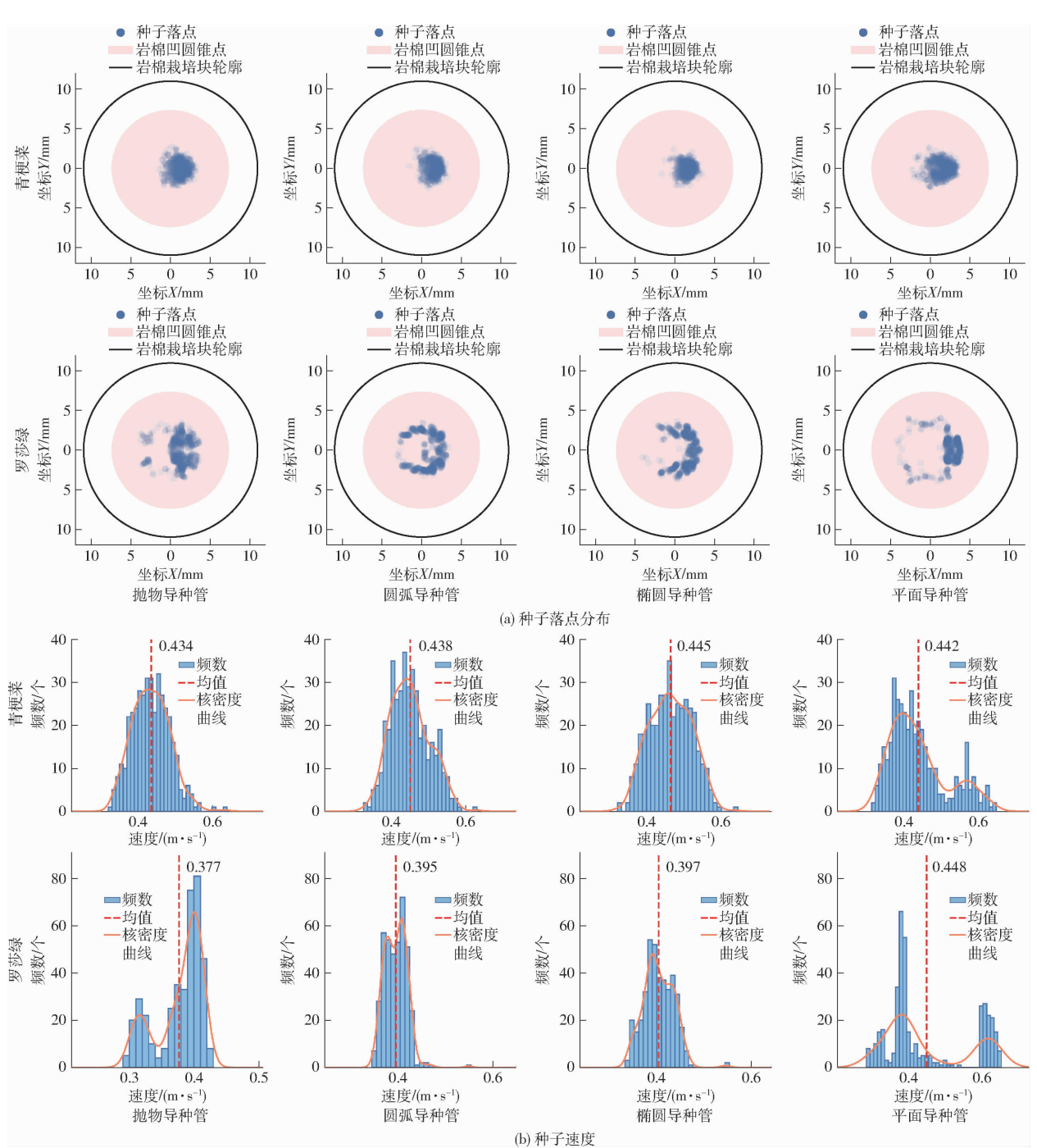


图 16 EDEM 仿真结果

Fig. 16 EDEM simulation results

表 7 种子落点分布结果				
Tab.7 Result of seed landing point distribution				
落点参数	抛物导种管	圆弧导种管	椭圆导种管	平面导种管
青梗菜				
平均距离/mm	1.671	1.861	1.869	1.931
标准差/mm	0.581	0.527	0.529	0.710
变异系数/%	34.71	28.34	28.32	36.75
罗莎绿				
平均距离/mm	2.257	2.616	2.636	3.112
标准差/mm	0.889	0.491	0.471	0.626
变异系数/%	39.38	18.79	17.85	20.12

图 16b 所示,导种件降速效果为抛物面 > 圆弧面 >

椭圆面 > 平面。总体看 4 种导种管结构均能够实现种子的降速,根据减速引导面作用机理可知降速效果主要受导种管的曲率影响,接触时具有较大曲率可以一定程度避免弹跳现象,而减速引导面的末端高曲率会频繁改变种子运动方向,进而消耗更多动能实现降速。

综上所述,抛物导种构件对种子落点有较好的约束效果,还使青梗菜投种降速 49.7%,罗莎绿投种降速 42.1%。抛物面减速引导面和圆弧方向引导面的组合,能够有效实现最佳的投种效果。

2.4 振动种盘结构与优化

2.4.1 振动种盘结构设计

振动种盘由安装架、振动马达、固定座、调速器、种盒和分隔板等组成,如图 17 所示。安装架与机架弹性连接,安装架上设置有 12 个分隔板,将种盒内种群均匀分隔为独立吸种区,设计的分隔板具有倾斜角度,使吸种区呈“梯形”,避免种子因激振向一侧偏移,可引导种子有序分布以提升吸种稳定性。振动器采用 24 V 6 000 r/min 的微型直流振动马达,通过固定座安装于安装架;配套的 PWM (Pulse width modulation) 直流电机调速器可实现 0 ~ 100% 无级变速控制,结合 PLC (Programmable Logic Controller) 控制系统通过调控调速器电流通断实现振动马达的间歇式启停。当播种机构执行吸种作业时,振动种盘通过间歇振动使种群保持蓬松离散状态,为高效充种提供基础条件。

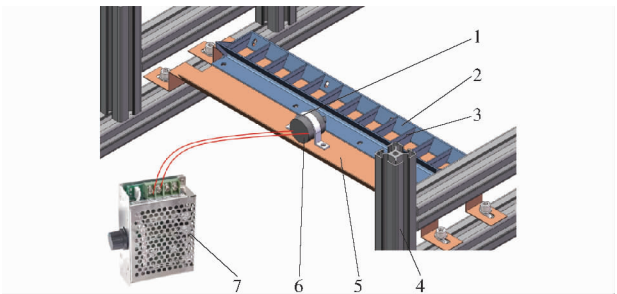


图 17 振动种盘结构图

Fig. 17 Structural diagram of vibrating seed tray

1. 固定座 2. 种盒 3. 分隔板 4. 机架 5. 安装架 6. 振动马达 7. 调速器

种子在种盒内的运动状态主要由振动频率调控(通过调速器调节振动马达转速实现)^[34]。当振动频率较低时,种群颗粒间内聚力较强,类流体化的“沸腾”效果不显著,种子难以与吸针有效接触,不利于充种;随着振动频率升高,颗粒间内摩擦力逐渐减弱,种群“沸腾”效果逐步优化至理想状态;若振动频率过高,种子会因过度“沸腾”弹跳出种盒,不仅增加种粒损失率,还会导致吸针重复吸附概率上升,降低播种精度。

2.4.2 振动频率优化试验

为明确振动种盘的有效频率调节范围及种子“沸腾”效果最佳的振动参数,试验采用维特智能 WT-VB02-485 型振动监测传感器,通过强磁铁吸附于振动种盘表面采集振动数据,传感器经 USB 接口连接计算机实现数据实时记录,直流振动电机实际可调振动频率范围为 20 ~ 90 Hz。

单因素试验选用适用青梗菜和罗莎绿种子的 0.5/0.6 mm 内孔直径的吸针,真空压力分别设定为 3 kPa 和 5 kPa,振动频率梯度设为 20、30、40、50、

60 Hz。试验结果如图 18 所示,充种合格率随振动频率升高而上升,达到峰值后随频率继续增大而下降。振动频率增大可提升种群“沸腾”程度,增强种子活跃度,提高吸针与种子的接触概率,从而提升充种合格率;但当频率过高时,种群颗粒间及颗粒与种盒间的碰撞速度剧增,导致种子运动状态紊乱,反而降低充种效果。综合试验数据,青梗菜和罗莎绿种子最佳振动频率分别在 30 Hz 和 45 Hz 附近。

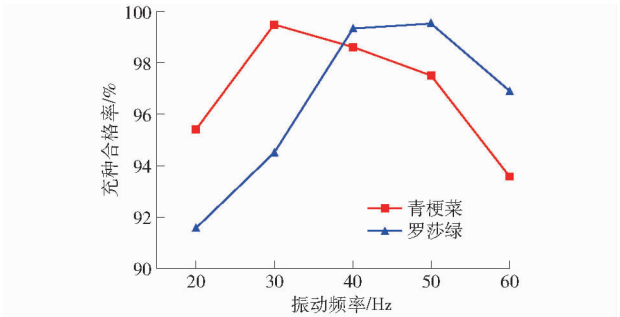


图 18 振动频率与充种合格率的关系

Fig. 18 Relationship between vibration frequency and qualification rate

3 控制系统设计

控制系统分为硬件和软件,其中硬件主要包括播种装置的气室、气缸、振动种盘控制电路和穴盘检测电路等;软件包括自动控制模块、手动控制模块和控制系统组态模块等。

3.1 硬件系统设计

根据播种生产线需求,选用三菱 FX_{3GA}-60MT 型可编程逻辑控制器 PLC 作为整体控制系统的核心。PLC 与威纶通 TK6071iP 型触控屏、SYME3Z-L30N1 型 NPN 对射常开漫反射激光穴盘检测传感器相连,接收控制指令与检测信号,并通过伺服电机、电磁阀实现精密播种。气动系统中,JH3808 型压缩机经电磁阀驱动播种机构气缸;JBL-750 型真空泵为气室提供吸种负压。此外,选用 VT317-5G-02 型二位三通电磁阀和 4V210-08/DC24V 型二位五通电磁阀,满足气动系统控制需求。

3.2 软件系统设计

3.2.1 软件程序与控制流程

PLC 程序使用三菱公司推出的 GX Work2 软件进行开发。程序主要分为初始化模块、手动控制模块、自动运行模块 3 大部分,其中自动运行模块分为皮带输送模块、排种流程模块、种盒振动模块、供料机构模块共 4 个子控制模块。蔬菜精密播种装置控制流程如图 19 所示,自动运行模式时,首先进行穴盘定位,传感器触发伺服电机进给边缘行的对齐距离 d_1 ;然后是吸种-投种循环,吸种时气缸伸出同时

启动种盒振动和负压吸附,投种时气缸收回并关闭负压投种,伺服电机进给穴盘行间距 d_2 ,重复流程直至整盘完成^[35]。

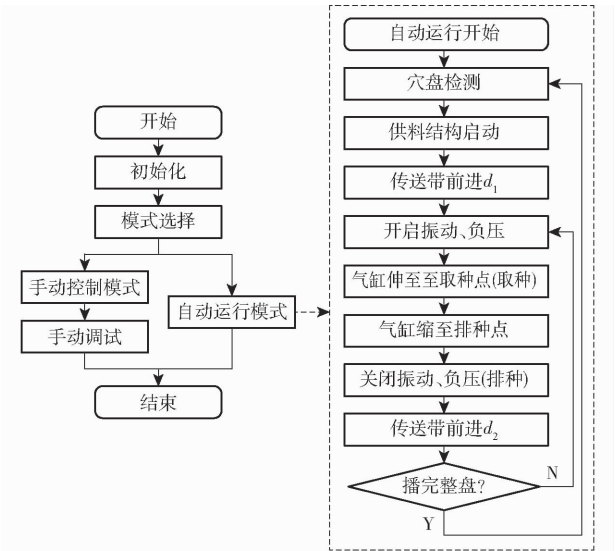


图 19 控制流程图
Fig. 19 Control flowchart

3.2.2 生产率调控模型

在植物工厂水培蔬菜实际生产中,不同的工作环境需求也不同,对蔬菜精密播种装置的生产率要求也会有所不同。因此,装置需要能够灵活地调整生产率,以适应不同的工作环境和生产需求。单次播种的生产周期可分为气缸伸出、取种、气缸收回和投种 4 个阶段。经初步测试表明传送带带动穴盘前进 1 次时间为 0.8 s。而且,穴盘前进可与气缸伸出、取种、气缸收回 3 个步骤同步进行,且穴盘前进时间少于上述 3 个同步步骤的最短总时长,因此穴盘前进时间不影响生产周期时长。计算可得单次播种的生产周期为

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \tag{4}$$

式中 T ——排种周期,s
 t_1 ——气缸伸出时间,s
 t_2 ——取种时间,s
 t_3 ——气缸收回时间,s
 t_4 ——投种时间,s

测试结果表明,气缸伸出与收回时间为 0.35 s,投种时间为 0.5 s,取种时间大于 0.2 s 具有较好效果。单行排种时间的变量因素仅为取种时间 t_2 。完成 1 个穴盘 20 行播种时间与生产率 P 的关系式为

$$P = \frac{3\,600}{20T} = \frac{3\,600}{20(t_2 + 1.2)} \tag{5}$$

式中 P ——生产率,盘/h

综上所述,蔬菜精密播种装置在吸种效果较好时的理论极限生产率为 128.57 盘/h,可以满足植物

工厂蔬菜穴盘连续生产的要求。如果在保证播种精度的同时提高生产率,可以通过双排吸针播种实现效率翻倍。

4 精密播种装置性能试验

为验证播种装置结构设计的合理性并优化其工作参数,本研究采用递进式试验方法。响应面分析试验:基于播种装置关键部件设计与优化结果,采用 Box - Behnken 设计进行多因素响应面分析,通过回归模型建立播种性能与关键参数的数学关系,解析参数交互作用机制,以“合格率最大化、漏播率最小化”为优化目标,确定最佳参数组合。整机播种性能试验:在优化参数条件下,设定生产率分别为 80、100、120 盘/h 进行重复播种试验,统计不同工况下合格率、漏播率及变异系数,验证装置稳定性与适应性。

4.1 试验材料与方法

依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》展开试验,以单粒合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 为评价指标。将研制的蔬菜精密播种装置安装在 2QSB - 2 型气力蔬菜苗盘育苗精密播种机(图 20),搭建测试平台,如图 21 所示。试验在华南农业大学农业工程楼进行,试验材料为球形青梗菜种子和椭圆形罗莎绿种子,净度 $\geq 99\%$,含水率 $\leq 5\%$ 。

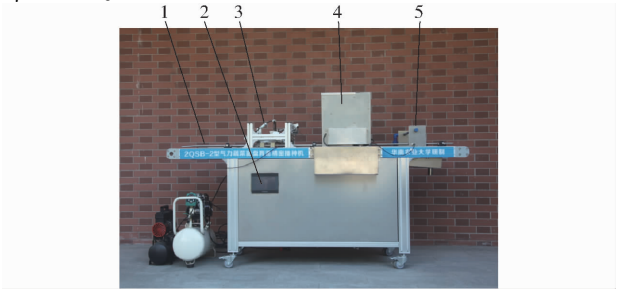


图 20 2QSB - 2 型气力蔬菜苗盘育苗精密播种机
Fig. 20 2QSB - 2 type pneumatic vegetable seedling tray precision seeder

1. 秧盘输送机构 2. 电气控制系统 3. 吸针式精密播种装置
4. 机械振动式精密撒播装置 5. 淋水装置

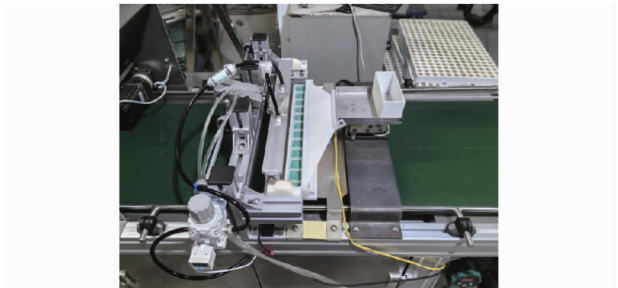


图 21 精密播种装置测试平台

Fig. 21 Precision seeding device test bench

4.2 整机播种性能优化试验

4.2.1 试验方案与结果

根据播种装置优化结果,在播种生产率为 100 盘/h 条件下,以罗莎绿种子为研究对象,采用 Design-Expert 13.0 软件中 Box – Behnken 试验设计方法进行试验。选择吸种负压 X_1 、吸针直径 X_2 和振动频率 X_3 为试验因素,各因素考察 3 个水平,试验因素编码如表 8 所示。

表 8 试验因素和编码

Tab.8 Experimental factors and codes

编码	因素		
	吸种负压/kPa	吸针直径/mm	振动频率/Hz
-1	4	0.4	40
0	6	0.6	45
1	8	0.8	50

每组试验连续播种 5 个穴盘(1 200 穴),共 3 组试验,取 3 次平均值作为试验结果,试验方案与结果如表 9 所示。

表 9 试验方案与结果

Tab.9 Experimental design and results

序号	因素			单粒合格指	漏播指数	重播指数
	X_1	X_2	X_3	数 Y_1 /%	Y_2 /%	Y_3 /%
1	-1	-1	0	92.64	7.24	0.12
2	1	-1	0	93.11	5.37	1.52
3	-1	1	0	91.94	7.16	0.90
4	1	1	0	93.12	3.01	3.87
5	-1	0	-1	93.63	5.94	0.43
6	1	0	-1	95.05	2.56	2.39
7	-1	0	1	93.31	6.18	0.51
8	1	0	1	93.87	3.86	2.27
9	0	-1	-1	93.81	5.87	0.32
10	0	1	-1	93.14	4.60	2.26
11	0	-1	1	92.86	6.83	0.31
12	0	1	1	92.30	4.83	2.87
13	0	0	0	97.73	1.19	1.08
14	0	0	0	97.70	1.36	0.94
15	0	0	0	98.33	0.52	1.15
16	0	0	0	97.94	1.02	1.04
17	0	0	0	98.37	0.31	1.32

通过分析软件分别建立单粒合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 关于 X_1 、 X_2 和 X_3 的多元非线性回归模型。并对各模型分别进行显著性检验。

4.2.2 回归模型建立与显著性检验

(1)单粒合格指数 Y_1

剔除不显著的回归项,单粒合格指数的回归方程为

$$Y_1 = 98.01 + 0.45X_1 - 0.24X_2 - 0.41X_3 - 2.19X_1^2 - 3.12X_2^2 - 1.86X_3^2$$

(6)

模型显著($P < 0.0001$),失拟项不显著,方程有效; Y_1 与吸种负压 X_1 、吸针直径 X_2 、振动频率 X_3 呈开口向下二次关系,存在最优参数组合;交互项(X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3)均不显著,仅主效应显著。

(2)漏播指数 Y_2

剔除不显著的回归项,漏播指数的回归方程为

$$Y_2 = 0.88 - 1.46X_1 - 0.71X_2 + 0.34X_3 - 0.57X_1X_2 + 1.96X_1^2 + 2.86X_2^2 + 1.80X_3^2$$

(7)

模型显著($P < 0.0001$),失拟项不显著,方程有效; Y_2 与 X_1 、 X_2 、 X_3 呈开口向上二次关系,存在使漏播最低的最优参数组合;交互项 X_1X_3 、 X_2X_3 不显著,其余主效应显著。

(3)重播指数 Y_3

剔除不显著的回归项,重播指数的回归方程为

$$Y_3 = 1.11 + 1.01X_1 + 0.95X_2 + 0.39X_1X_2$$

(8)

模型显著($P < 0.0001$),失拟项不显著,方程有效; Y_3 与 X_1 、 X_2 呈正线性相关,振动频率 X_3 无显著影响;仅交互项 X_1X_2 显著。

4.2.3 交互作用影响分析与优化

由于振动频率 X_3 不存在交互项影响评价指标,选择最佳振动频率 45 Hz,吸针直径为 0.4 ~ 0.8 mm 和吸种负压为 4 ~ 8 kPa 时,分析 X_1X_2 对 Y_2 和 Y_3 的交互影响,响应曲面图如图 22 所示。总体来看存在一个合适的参数范围使漏播指数最低,但重播指数

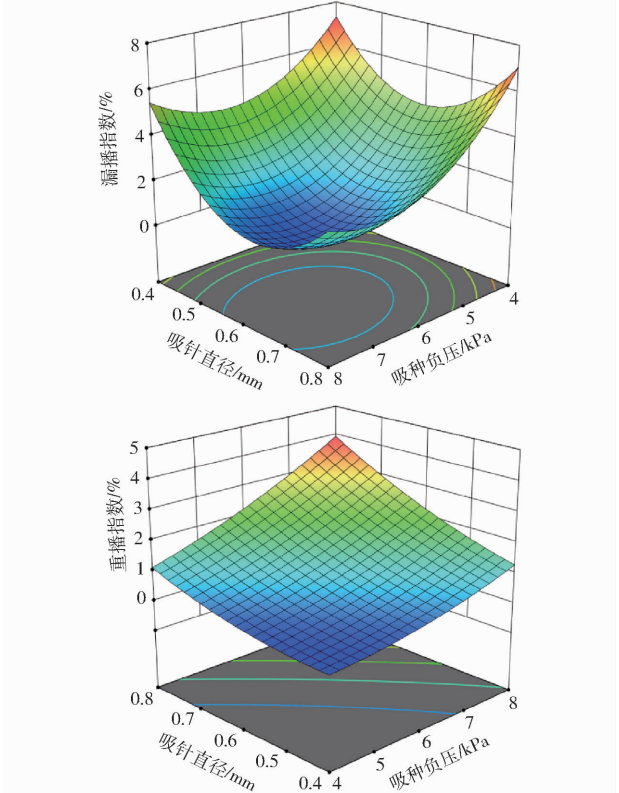


图 22 交互因素对漏播指数和重播指数的影响 ($X_3 = 0$)

Fig.22 Impact of interaction factors on index of missed seeding and index of overlapping seeding

在区间内仅显示单调关系。

为进一步优化播种参数,利用 Design-Expert 13.0 软件进行参数优化,通过预测优化 (Optimization) 预测模型的最优参数组合。选取优化目标为最大单粒合格指数 Y_1 、最小漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 ,优化模型为

$\max Y_1$

$\min Y_2$

$\min Y_3$

s. t. $\begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases}$

(9)

结果表明,罗莎绿种子最优参数组合为负压为 5.94 kPa、吸针直径为 0.58 mm、振动频率为 44.42 Hz;此时预测结果单粒合格指数为 98.012%,漏播指数为 1.015%,重播指数为 0.973%。同理,对青梗菜进行响应面分析试验,得出最优参数组合为吸种负压为 4.17 kPa、吸针直径为 0.46 mm 和振动频率为 42.51 Hz,与单因素试验中得出的青梗菜最佳振动频率 30 Hz 附近相比,响应面分析优化后的振动频率 42.51 Hz 存在明显差异,是受到了多因素协同优化对参数筛选结果的影响。此时预测结果单粒合格指数为 98.192%,漏播指数为 0.967%,重播指数为 0.841%。

4.3 整机播种性能试验

综合参数优化结果,为便于实际操作,罗莎绿播种在吸种负压设为 5.9 kPa、吸针直径取 0.6 mm 和振动频率设为 44.4 Hz 条件下进行验证试验;青梗菜播种在吸种负压设为 4.2 kPa、吸针直径取 0.5 mm 和振动频率设为 42.5 Hz 条件下进行验证试验,每组试验生产率设置为 80、100、120 盘/h,连续播种 5 盘,重复 3 次取平均值,试验结果如表 10 所示。

表 10 整机播种性能试验结果
Tab.10 Seeding performance test results

生产率/ (盘·h ⁻¹)	品种	单粒合格 指数/%	漏播指数/ %	重播指数/ %
80	罗莎绿	98.35	0.91	0.74
	青梗菜	98.29	0.76	0.95
100	罗莎绿	98.08	1.14	0.78
	青梗菜	98.11	0.79	1.10
120	罗莎绿	97.35	1.47	1.18
	青梗菜	97.64	1.53	0.83

由表 9 可知,生产率较低时,单粒合格指数较高。低生产率下,由于单行播种时间增长,会使吸针在种盒中充种时间延长,吸针吸附种子效果更好,漏播指数会降低。试验结果表明,在生产率为 80、100 盘/h 时,罗莎绿单粒合格指数分别为 98.35% 和 98.08%;青梗菜单粒合格指数分别为 98.29% 和 98.11%。在生产率为 120 盘/h 时,罗莎绿和青梗菜单粒合格指数分别为 97.35%、97.64%,受充种时间影响合格指数低于 98%。

综上所述,播种装置生产率为 80、100 盘/h 时,罗莎绿和青梗菜单粒合格指数均大于 98%,满足植物工程蔬菜穴盘育苗高精度播种技术要求。

5 结论

(1) 研制了蔬菜穴盘育苗吸针式精密播种装置,构建以 PLC 为控制核心且适用于岩棉栽培基质的吸针式蔬菜穴盘育苗精密播种装置,实现了植物工厂蔬菜穴盘育苗高精度播种。

(2) 开展了吸针式精密播种装置的关键部件的优化设计与试验。设计了气缸驱动组件的曲线轨道,保证吸针垂直吸种和投种,实现位置准确控制。基于 ANSYS Fluent 流体分析软件,仿真得到气室和吸针最优结构参数为气孔直径 8 mm、间距 205.3 mm;并通过优化试验,确定了气室真空工作压力和适于不同种子吸针直径。构建 EDEM 离散元分析导种构件模型,仿真分析了 4 种不同曲面导种的性能,抛物导种管与圆弧方向引导面的组合能够有效地实现最佳的投种效果。通过振动种盒优化试验,初步确定有利于青梗菜和罗莎绿种子吸附的最佳振动频率。

(3) 采用 Box - Behnken 试验设计方法,对播种装置开展作业性能试验,构建主要性能指标(单粒合格指数、重播指数和漏播指数)与主要影响因素(吸种负压、吸针直径和种盒振动频率)的关系,并进行多目标优化和验证试验。在生产率为 80 盘/h 和 100 盘/h 的条件下,以最优参数组合为:罗莎绿种子在吸种负压 5.9 kPa、吸针直径 0.6 mm、振动频率 44.4 Hz 进行试验,结果表明单粒合格指数分别为 98.35% 和 98.08%;青梗菜种子在负压 4.2 kPa、吸针直径 0.5 mm、频率 42.5 Hz 时,单粒合格指数分别为 98.29% 和 98.11%,满足蔬菜穴盘育苗的高精密作业要求,对提高蔬菜穴盘育苗的播种质量具有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] 祁亚卓,相姝楠.国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2020,41(1):205-208.

- QI Yazhuo, XIANG Shunan. Research status and development trend of vegetable seeder at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1):205–208. (in Chinese)
- [2] 吴媛,潘丽蓉,王东,等.我国蔬菜出口发达国家的制约因素——基于引力模型实证分析[J].安徽农业科学,2024,52(3):230–233.
- WU Yuan, PAN Lirong, WANG Dong, et al. Restrictive factors of Chinese vegetable export to developed countries—empirical analysis based on gravity model[J]. Anhui Agricultural Science, 2024, 52(3):230–233. (in Chinese)
- [3] 杨其长.植物工厂现状与发展战略[J].农业工程技术(温室园艺),2016,36(10):9–12.
- [4] 卢杰.水培叶菜自动化生产系统关键技术研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2019.
- LU Jie. Research on key technologies of automated production system for hydroponic leaf vegetables[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] 李宗耕,杨其长,沙德剑,等.植物工厂水培叶菜生产全程机械化研究进展[J].中国农业大学学报,2022,27(5):12–21.
- LI Zonggeng, YANG Qichang, SHA Dejian, et al. Research progress on the full mechanization production of hydroponic leafy vegetables in plant factory[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5):12–21. (in Chinese)
- [6] KIM H H, KOZAI T. Production of value-added transplants in closed systems with artificial lighting[C]//Transplant Production in the 21st Century Springer, Dordrecht, 2000:137–144.
- [7] WATANABE H. Light-controlled plant cultivation system in Japan—development of a vegetable factory using LEDs as a light source for plants[J]. Acta Horticulturae, 2011(907):37–44.
- [8] 任如冰,聂茹霞,陈小文,等.智能化植物工厂的发展现状与展望[J].现代园艺,2020,43(7):69–70.
- [9] TING K C, LIN T, DAVIDSON P C. Integrated urban controlled environment agriculture systems[C]//LED Lighting for Urban Agriculture, Springer Singapore, 2016:19–36.
- [10] 刘云强,赵郑斌,刘立晶,等.蔬菜穴盘育苗播种机研究现状及发展趋势[J].农业工程,2018,8(1):6–12.
- LIU Yunqiang, ZHAO Zhengbin, LIU Lijing, et al. Research status and development trend of vegetable plug seedling seeder [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(1):6–12. (in Chinese)
- [11] 周悦.气吸滚筒式穴盘育苗流水线的研制[D].镇江:江苏大学,2022.
- ZHOU Yue. Development of the vacuum-cylinder tray seedling production line[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [12] 辜松,杨艳丽,张跃峰,等.荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J].农业工程学报,2013,29(14):185–194.
- GU Song, YANG Yanli, ZHANG Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):185–194. (in Chinese)
- [13] 吴尘萱,栗君谊,韩亚芬,等.面向植物合成生物学的植物工厂生产关键技术与装备研究进展及应用展望[J].农业机械学报,2025,56(7):300–315.
- WU Chenxuan, LI Junyi, HAN Yafen, et al. Research progress and application prospects of key technologies and equipment for plant factory production in plant synthetic biology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7):300–315. (in Chinese)
- [14] 李宝刚,王祥,李玉环,等.气力式精量播种机电控系统集成设计与分布式电驱调压控制策略[J].农业机械学报,2025,56(9):417–426,472.
- LI Baogang, WANG Xiang, LI Yuhuan, et al. Integrated development of pneumatic precision seeder drill electronic control system and distributed electric drive pressure regulation control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):417–426,472. (in Chinese)
- [15] 邵伟.穴盘式大葱育苗机精量播种装置的设计与试验[D].泰安:山东农业大学,2020.
- SHAO Wei. Design and experiment of precision seeding device for plug-type onion seedling planter[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [16] 徐亚.基于PLC与组态王的育秧播种机监控系统设计[D].镇江:江苏大学,2016.
- XU Ya. Design of monitoring system for seedling planter based on PLC and Kingview[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [17] 袁益明.基于蔬菜小粒种播种机的应用探索[J].农机质量与监督,2020(7):7–8.
- [18] 张明华,姜有聪,何思禹,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.
- ZHANG Minghua, JIANG Youcong, HE Siyu, et al. Design and experiment of the air suction wheel precision seed metering device for vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7):98–109. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 李大鹏,刘飞,赵满全,等.气力式谷子精量排种器结构设计及性能试验[J].中国农业大学学报,2019,24(11):141–151.
LI Dapeng, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Structural design and performance test of one pneumatic millet precision seed metering device[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 141–151. (in Chinese)
- [22] 李晓冉,张银平,刁培松,等.我国蔬菜生产概况及精量播种机研究现状[J].农机化研究,2021,43(5):263–268.
LI Xiaoran, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. General situation of vegetable production and research status of precision seeder in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 263–268. (in Chinese)
- [23] 杨昌敏,庄文化,徐一,等.蔬菜穴盘育苗精量播种机研究[J].中国农机化学报,2020,41(2):13–18.
YANG Changmin, ZHUANG Wenhua, XU Yi, et al. Study on vegetable tray precision seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 13–18. (in Chinese)
- [24] 胡建平,郑赛男,刘文东.磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(3):60–63.
HU Jianping, ZHENG Sainan, LIU Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder-seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 60–63. (in Chinese)
- [25] 刘通.气吸式变孔径精量排种器的设计与试验研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
LIU Tong. Design and experimental study of air-suction variable aperture precision seed-metering device[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 王伟伟,宋岚洲,石文兵,等.气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):53–63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 53–63. (in Chinese)
- [27] 言育谦,刘立晶,刘云强,等.蔬菜气吸式排种器四级清种机构设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):57–65.
YAN Yuqian, LIU Lijing, LIU Yunqiang, et al. Design and test of four-stage seed cleaning mechanism for air-suction vegetables seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 57–65. (in Chinese)
- [28] 陈永,高晓勋,金鑫,等.双孔并行气吸式油莎豆精量穴播器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):213–223.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Design and experiment of two-hole parallel air-absorbing precision seed metering device for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 213–223. (in Chinese)
- [29] 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, 161:120–134.
- [30] GRIMA A P, WYPYCH P W. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle-structure interactions under iMPact conditions[J]. Powder Technology, 2011, 212: 198–209.
- [31] PASHA M, HARE C, GHADIRI M, et al. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater[J]. Powder Technology, 2016, 298:29–36.
- [32] DELANEY G W, CLEARY P W, HILDEN M, et al. Testing the validity of the spherical DEM model in simulating real granular screening processes[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 68(1): 215–226.
- [33] BOAC J M, AMBROSE K, CASADA M E, et al. Applications of discrete element method in modeling of grain postharvest operations[J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6(4): 128–149.
- [34] 王东伟,纪瑞琪,何晓宁,等.驱导组合槽辅助附种气吸式花生高速精量排种器研究[J].农业机械学报,2023,54(5):59–70.
WANG Dongwei, JI Ruiqi, HE Xiaoning, et al. Drive-guided combination slot-assisted seed-attached air-absorbing peanut high-speed precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 59–70. (in Chinese)
- [35] 王方艳,杨亮,王红提.温室大棚电驱气力式胡萝卜播种机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(8):64–73.
WANG Fangyan, YANG Liang, WANG Hongti. Design and test of electric driving pneumatic carrot planter in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 64–73. (in Chinese)