

基于 EDEM – RecurDyn 的辣椒钵苗自动栽植机构设计与试验

周福君¹ 李正敏¹ 廖 广¹ 卫学琦¹ 林心岚¹ 赵立军²

(1. 北部湾大学机械与船舶海洋工程学院, 钦州 535000; 2. 重庆文理学院智能制造工程学院, 重庆 402160)

摘要: 针对辣椒钵盘育苗移栽过程存在的移栽效率低、开合性能差、成穴效果差等问题, 本文设计了一种链式凸轮栽植机构。根据辣椒育苗移栽的农艺要求, 对栽植机构运动学机理进行分析, 选定虚拟栽植机构的基本参数, 利用 Solidworks 软件进行三维模型建模并建立运动学理论模型; 确定土壤颗粒离散元模型, 建立栽植机构 EDEM – RecurDyn 耦合仿真模型并进行仿真分析, 初步验证机构正确性和合理性。以移栽机前进速度、速比特征参数、中心轴高度为试验因素, 以直立度、漏栽率、株距变异系数为试验指标, 进行二次旋转正交组合试验, 建立各指标与因素间的回归模型, 确定移栽作业较优参数组合。验证试验结果表明: 当前进速度为 0.4 m/s、速比特征参数为 1.29、中心轴高度为 336.8 mm 时, 直立度为 78.2°, 漏栽率为 1.7%, 株距变异系数为 5.23%, 能满足辣椒栽植作业的实际生产需求。

关键词: 辣椒栽植机构; 扎穴机构; 参数优化

中图分类号: S223.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0069-10

OSID:



Design and Experiment of Automatic Transplanting Mechanism of Pepper Potting Plants Based on EDEM – RecurDyn

ZHOU Fujun¹ LI Zhengmin¹ LIAO Guang¹ WEI Xueqi¹ LIN Xinlan¹ ZHAO Lijun²

(1. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China

2. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402160, China)

Abstract: In response to the problems of low transplanting efficiency, poor opening and closing performance, and poor hole formation in the seedling transplanting process of pepper seedling tray, a chain cam planting mechanism was designed. According to the agronomic requirements of pepper seedling transplantation, the kinematic mechanism of the planting mechanism was analyzed, the basic parameters of the virtual planting mechanism were selected, the three-dimensional modeling was constructed by using Solidworks software, and the kinematic theoretical model was established; the discrete element model of the soil particles was determined, the coupled EDEM – RecurDyn simulation model of the planting mechanism was established, simulation analysis of the planting mechanism was carried out, and the simulation results preliminarily verified preliminary verification of the correctness and rationality of the mechanism. Taking the forward speed of the transplanting machine, characteristic parameter of speed ratio, and height of center axis, as test factors, and the uprightness, missed planting rate, and coefficient of variation of spacing of plants as test indexes, the quadratic rotary orthogonal combination test was conducted to establish the regression model between indexes and factors to determine the better parameter combinations of transplanting operation. The results of validation test showed that under the conditions of parameter forward speed of 0.4 m/s, speed ratio of 1.29, and height of center axis of 336.8 mm, target value of uprightness was 78.2°, the missed planting rate was 1.7%, and the coefficient of variation of spacing of plants was 5.23%, which can meet the actual production requirements of the pepper planting operation.

Key words: pepper transplanting mechanism; tying mechanism; parameter optimization

收稿日期: 2024-12-28 修回日期: 2025-04-27

基金项目: 重庆市科技局创新发展联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0024)

作者简介: 周福君(1969—),男,教授,博士,主要从事现代农业机械装备设计与研究,E-mail: fjzhou@163.com

0 引言

辣椒富含维生素 C 且具有独特的味道和口感^[1],不仅是居民日常饮食的重要调味品,还被广泛应用于医药、美妆等领域^[2],是重要的农业经济发展作物。目前,我国是世界上最大的辣椒生产国和消费国^[3],辣椒种植面积约占世界总种植面积的 40%^[4]。辣椒多采用先育苗后移栽的种植模式,这种模式能补偿气候变化对幼苗生长的影响,缩短幼苗田间生长周期,促进农作物生长发育^[5]。辣椒钵苗移栽多采用人工种植或借助简易农业机具,移栽效率低且移栽效果差,不利于后续除草、喷洒等过程或全程机械化作业。因此,实现辣椒苗移栽机械化、标准化具有重要意义^[6]。

栽植机构是自动移栽机的核心工作部件,其结构与作业性能直接影响植苗质量^[7]。为实现机械化移栽作业,学者针对作物类别和种植农艺要求研制了多种移栽机械,根据栽植机构类型可分为链夹式、导管苗式、鸭嘴式等多种形式^[8]。其中鸭嘴式栽植机构对秧苗的适应性强,可同时适用露地移栽和膜上移栽,其驱动方式主要为多杆式和行星轮系^[9]。胡飞等^[10]运用曲柄摇杆机构原理设计了一种能实现膜上双行移栽的蔬菜栽植装置,该装置栽植过程对地膜破坏程度较小,膜口破坏长度变化较均匀,膜上栽植频率可达到 70 株/(min·行),栽植合格率 90% 以上,能满足蔬菜膜上移栽要求。颜华等^[11]设计了一种能实现栽植静轨迹无级调节的往复鸭嘴栽植机构,主要包括曲柄导杆机构和平面四边形机构 2 部分,该机械株距变化范围较广,扎土穴口长度较小,可适用于大范围株距变化且要求扎穴口径小的移栽作物。尹大庆等^[12]提出了一种高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构,利用非圆齿轮的不等速运动变化优化栽植运动轨迹,得到“水滴”形轨迹,验证了机构轨迹无级调节的合理性与正确性,能满足钵苗移栽直立度要求。辛亮等^[13]提出了一种高姿态接苗、低姿态栽苗的差速变姿态行星轮系栽植机构,通过轮系间特定传动比关系实现小株距作业要求,适用于株距 150 ~ 200 mm 间变化。

针对辣椒钵苗移栽过程存在的人工移栽效率低、移栽质量不稳定、机械化移栽程度低等问题,本文结合链传动机构、凸轮机构、四杆机构运动特性,设计一种链式凸轮栽植机构,并进行理论模型设计、仿真分析及试验研究,以实现机构运行过程平稳、无较大波动,使栽植器能实现快速开合的投苗运动转换,保证移栽质量。

1 辣椒钵苗栽植机构结构与工作原理

1.1 辣椒钵苗栽植机构结构

辣椒钵苗栽植机构作业性能直接决定辣椒自动移栽机移栽效果,主要由左圆盘、右圆盘、偏心圆盘、中心轴、主动链轮、链条、从动链轮、鸭嘴式栽植器、偏心连杆和机架等组成,基本结构如图 1 所示。

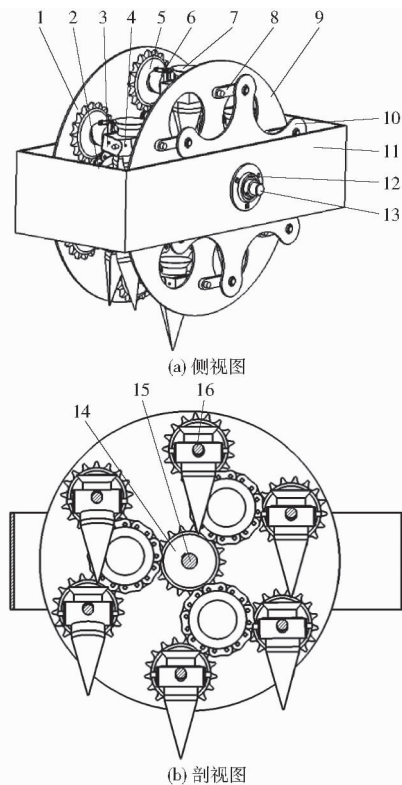


图 1 结构示意图

Fig.1 Schematic of structure

1. 左圆盘 2. 链条 3. 左栽植器 4. 右栽植器 5. 从动链轮
6. 圆柱凸轮 7. 接苗口 8. 偏心连杆 9. 右圆盘 10. 偏心圆盘
11. 机架 12. 轴承座 13. 偏心轴头 14. 主动链轮 15. 中心轴
16. 栽植器右轴

1.2 辣椒钵苗栽植机构工作原理

栽植机构以某一特定的运动轨迹将钵苗运输到土里进行栽植,作业时主要包括接苗、运苗、植苗、返程 4 个阶段。移栽机带动栽植机构前进,移栽机上安装的电机通过链传动带动主动链轮和偏心圆盘机构转动,主动链轮经过链条驱动从动链轮转动,从而带动圆柱凸轮转动,通过凸轮机构的轮廓变化控制连杆转动,进而带动左栽植器和右栽植器运动,完成栽植器打开或闭合状态转换,实现自动释放钵苗并完成移栽。移栽过程,偏心圆盘与右圆盘间的连接杆始终保持水平状态,栽植器安装在双圆盘之间,在偏心式圆盘机构带动下始终与土壤起垄面垂直,从而保证钵苗入土栽植的直立度。

2 理论模型建立

2.1 栽植机构运动轨迹分析

为保证蔬菜田间生长状态,蔬菜钵苗类移栽机完成植苗作业后的秧苗直立程度是移栽机栽植性能的重要评判指标^[14],因此需基于零速投苗原理设计栽植机构,即要求栽植机构在相对静止的状态下释放钵苗完成栽植,以满足秧苗直立移栽效果^[15]。根据零速投苗原理,为更好分析栽植机构旋转角速度与移栽机前进速度间关系,引入速比特征参数 λ ^[16],表达式为

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_0} \quad (1)$$

式中 R ——栽植圆盘上栽植器旋转半径,mm

ω ——栽植机构旋转角速度,rad/s

v_0 ——移栽机前进速度,m/s

根据速比特征参数 λ 的不同取值范围,栽植轨迹可分为 3 种类型。取 $\omega = 1.3 \text{ rad/s}$, $v_0 = 0.4 \text{ m/s}$,栽植轨迹如图 2a 所示;取 $\omega = 1.7 \text{ rad/s}$, $v_0 = 0.4 \text{ m/s}$,栽植轨迹如图 2b 所示;取 $\omega = 2.24 \text{ rad/s}$, $v_0 = 0.4 \text{ m/s}$,即 $\lambda > 1$,栽植轨迹如图 2c 所示。

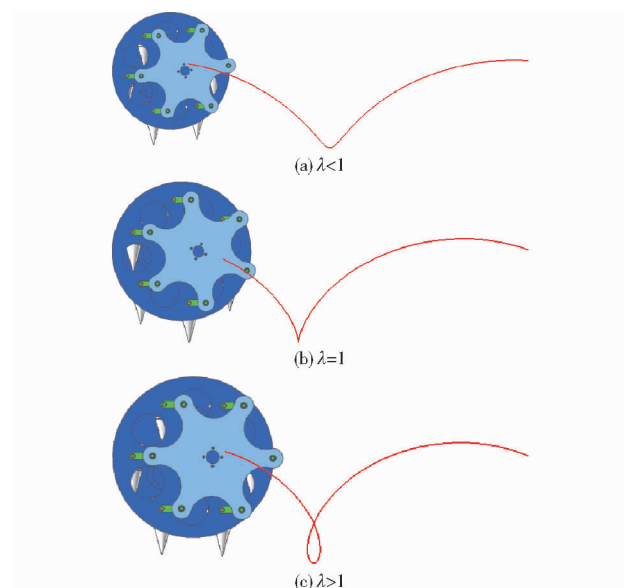


图 2 运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectory

当 $\lambda < 1$ 时,栽植机构栽植器线速度小于前进速度,栽植轨迹曲线不存在相对速度为零的点,故不能满足零速投苗要求;当 $\lambda = 1$ 时,栽植轨迹曲线存在一个特殊拐点,该点处的相对速度为零,理论上满足零速投苗要求;当 $\lambda > 1$ 时,栽植轨迹“环扣”曲线内存在 2 点,能使栽植机构线速度水平分速度与前进速度大小相等,从而满足零速投苗要求。在零速点附近,钵苗相对于地面的速度几乎为零,能更好地满足钵苗直立度要求。

在设计栽植机构时,考虑到左右栽植器打开并释放钵苗的过程需要一定时间,因此选择 $\lambda > 1$ 的情况进行机构设计;为进一步减小栽植过程栽植器运动对植苗后钵苗直立度的影响,需尽量保证在栽植器上升阶段的零速点附近进行投苗作业^[17]。

2.2 栽植器运动学分析

栽植器到达栽植轨迹最低点,左右栽植器迅速打开,钵苗在零速点附近完成栽植,栽植器上升,准备进入下一次移栽作业。建立栽植机构运动分析模型,如图 3 所示。

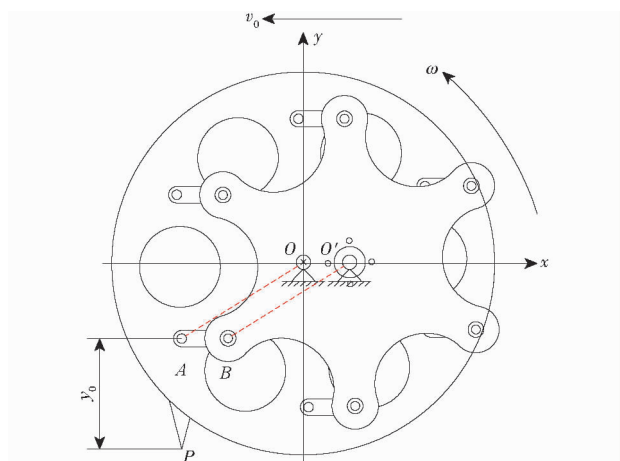


图 3 栽植机构运动分析

Fig. 3 Motion analysis of planting mechanism

栽植器闭合状态下底部尖端点 P 在 x, y 方向位移方程为

$$\begin{cases} x_P = v_0 t + R \cos(\omega t) \\ y_P = -y_0 + R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 y_0 ——栽植器从动链轮中心轴到栽植器底端距离,mm

t ——栽植器运动时间,s

栽植器在链传动和凸轮机构共同作用下左右栽植器张开或闭合,其运动分析如图 4 所示。

左栽植器点 D, F 绕点 M 转动位移方程为

$$\begin{cases} l_{MD} = \theta R_{MD} \\ l_{MF} = \theta R_{MF} \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ ——左栽植器绕点 M 转过角度, ($^\circ$)

R_{MD} ——点 D 绕点 M 所转过圆弧半径,mm

R_{MF} ——点 F 绕点 M 所转过圆弧半径,mm

由式(3)可知 l_{MD}, l_{MF} 间关系为

$$l_{MD} = \frac{R_{MD}}{R_{MF}} l_{MF} \quad (4)$$

栽植器底部尖端点 F 位移方程为

$$\begin{cases} x_F = -R_{EF} \sin \theta \\ y_F = R_{EF} \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_{EF} ——栽植器高度,mm

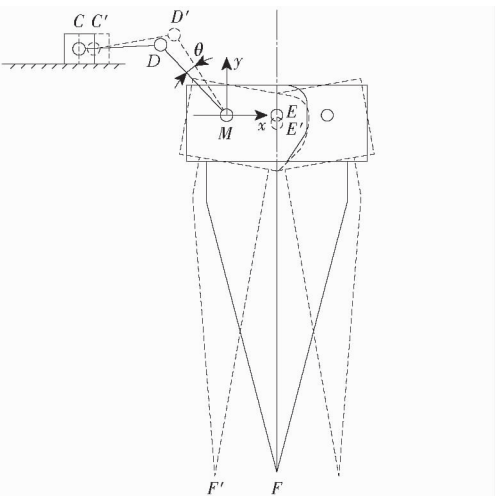


图4 栽植器运动学分析

Fig.4 Kinematic analysis diagram of planter

根据辣椒钵苗移栽农艺要求以及栽植机构相关运动学分析,确定栽植机构基本设计参数: $\theta_{\max}=10^{\circ}$, $l_{MD}=0.26l_{MF}$, $R_{EF}=y_0=178\text{ mm}$ 。

3 EDEM-RecurDyn 耦合仿真

土壤与农业机械间的相互作用是农业机械研究领域的重要内容^[18],土壤性质及其动态作用对农业机械作业性能影响显著。因此通过 EDEM-RecurDyn 耦合仿真方式探究栽植机构作业性能^[19],验证栽植机构合理性和正确性。

3.1 RecurDyn 多体动力学模型构建

利用 RecurDyn 仿真软件分析栽植机构作业过程,验证栽植机构正确性与合理性。将栽植机构三维模型的 x_t 格式文件导入 RecurDyn 软件,根据机构栽植工作原理在 RecurDyn 软件中对各零部件添加约束 (Joint)、运动 (Motion)、力 (Force) 和接触 (Contact) 条件。设置栽植机前进速度 v_0 为 0.4 m/s、速比特征参数 λ 为 1.3、仿真时间 t 为 3 s,研究并分析栽植机构空载情况下的运动。标记 1 个栽植器底部尖点,进行栽植运动仿真分析,其运动轨迹呈现“环扣”形,如图 5 所示。

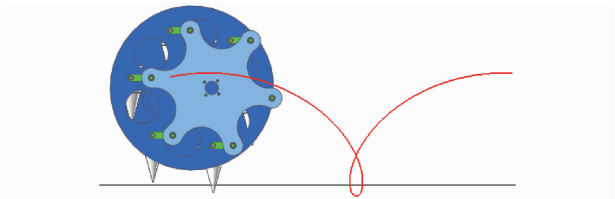


图5 栽植机构运动轨迹

Fig.5 Trajectory of planting mechanism

以 1 个栽植器为研究对象,在 RecurDyn 仿真软件后处理界面中导出栽植器位移、速度、加速度随时间变化数据,绘制曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,栽植器位移随时间变化曲线存在

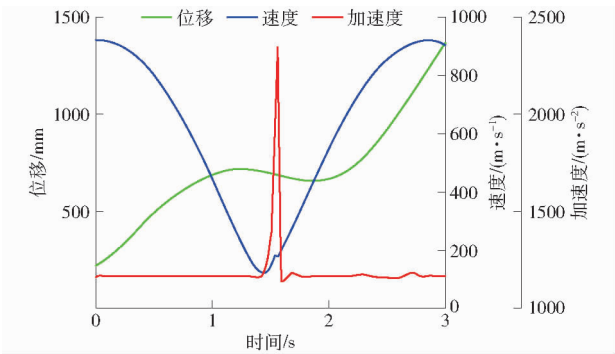


图6 栽植器运动变化曲线

Fig.6 Motion variation curves of planter

近似水平线段,表明栽植过程存在速度为零时刻,在该时刻完成投苗,理论上能满足钵苗直立度要求。栽植器速度变化曲线近似于正弦变化曲线,在栽植点附近左右栽植器由闭合状态迅速转换成张开状态的过程历时较短,栽植器速度出现波动,但整体速度变化较均匀。栽植器需满足在栽植点附近能迅速打开,并保持打开状态运行一段时间,直至栽植器完全离开苗体,随后缓慢闭合,因此在栽植点附近加速度变化明显。

3.2 EDEM 离散元模型构建

广西滨海地区土壤主要分为红壤、赤红壤和砖红壤^[20],土壤颗粒间存在的化学键及含水机制,使得土壤颗粒粘结在一起,组成复杂团聚体,直接影响栽植器性能。考虑广西滨海地区土壤颗粒间存在凝聚力,在 EDEM 软件中选取 Hertz-Mindlin with JKR 颗粒接触模型^[21]。参照文献^[22-25],设置离散元仿真模型相关参数。设置土壤颗粒离散元模型仿真参数^[22],如表 1 所示。

表1 土壤仿真参数

Tab.1 Parameters of soil simulation

项目	参数	数值
颗粒	泊松比	0.38
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 790
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
土槽	泊松比	0.28
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
	剪切模量/Pa	8.2×10^{10}
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.51
	动摩擦因数	0.72
	静摩擦因数	0.08
土槽-颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	0.453
	静摩擦因数	0.158

在 EDEM 软件中设定土壤颗粒表面能为 8.89 J/m^2 ^[22],建立一个长 2 000 mm、宽 300 mm、高 300 mm 的土壤离散元模型,为进行栽植器入土研究做准备,如图 7 所示。

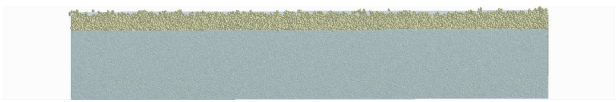


图 7 土壤离散元模型

Fig.7 Soil discrete element model

根据辣椒钵苗特征,设置辣椒土钵离散元仿真模型参数^[25],如表 2 所示。

表 2 土钵仿真参数

Tab.2 Parameters of soil bowl simulation

项目	参数	数值
颗粒	泊松比	0.3
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 120
	剪切模量/Pa	2.76×10^6
土钵	泊松比	0.28
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
	剪切模量/Pa	8.2×10^{10}
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.8
	动摩擦因数	0.9
	静摩擦因数	0.01
土钵-颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	动摩擦因数	0.08
	静摩擦因数	0.07

根据辣椒育苗盘尺寸,建立辣椒基质块苗三维模型,在 EDEM 软件中导入基质块苗三维模型,并设定土钵表面能为 $13.07\text{ J}/\text{m}^2$ ^[25],建立土钵离散元模型,如图 8 所示。

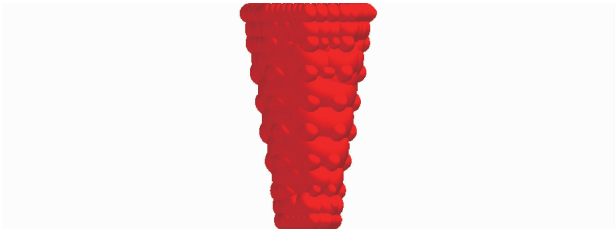


图 8 辣椒土钵颗粒模型

Fig.8 Particle model of pepper soil bowl

3.3 EDEM – RecurDyn 耦合仿真试验

3.3.1 耦合仿真模型建立

基于 EDEM – RecurDyn 耦合对辣椒钵苗栽植机构工作过程进行仿真分析^[26]。将 RecurDyn 中导出的 wall 格式文件导入 EDEM,并设置相关仿真参数,建

立耦合仿真模型,待耦合仿真状态如图 9 所示。

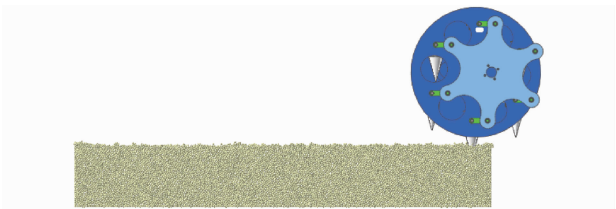


图 9 待耦合仿真模型

Fig.9 Coupled simulation model

3.3.2 EDEM – RecurDyn 耦合仿真过程

基于 EDEM – RecurDyn 耦合,对辣椒栽植机构的入土栽植工作性能进行耦合仿真分析,仿真过程如图 10 所示。

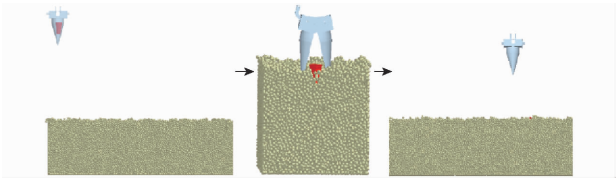


图 10 EDEM – RecurDyn 耦合仿真过程

Fig.10 EDEM – RecurDyn coupling simulation

3.3.3 单因素仿真试验

在辣椒移栽过程,不同移栽前进速度、速比特征参数、中心轴高度会直接影响移栽效果。因此以移栽机前进速度 v_0 、速比特征参数 λ 、栽植机构中心轴高度 h 为试验因素,以栽植机构仿真过程栽植器受力为指标进行单因素仿真试验,单因素试验方案如表 3 所示。

表 3 单因素试验方案

Tab.3 Single-factor experimental program

序号	因素		
	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	λ	h/mm
1	0.3 ~ 0.5	1.3	347
2	0.4	1.1 ~ 1.5	347
3	0.4	1.3	327 ~ 367

通过分析仿真试验结果(图 11a、12a)可知,土壤对左右栽植器的作用力受前进速度影响较大。当速比特征参数一定时,前进速度越大,栽植器与土壤的相互作用时间越短,栽植频率越高。通过分析

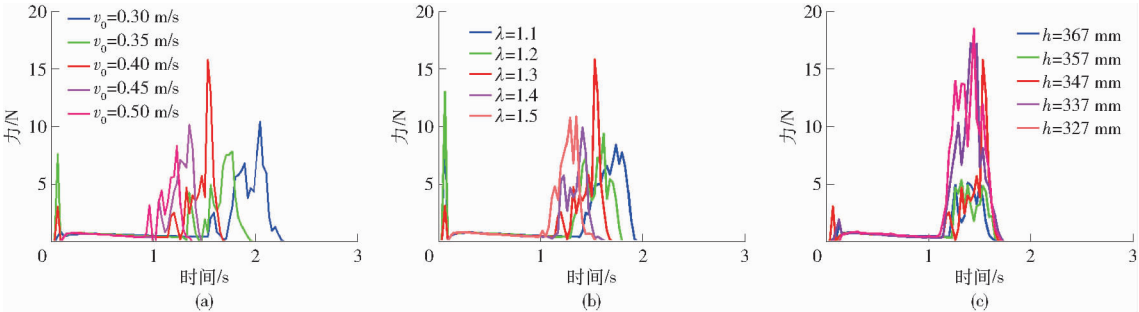


图 11 左栽植器受力变化曲线

Fig.11 Force on left planter

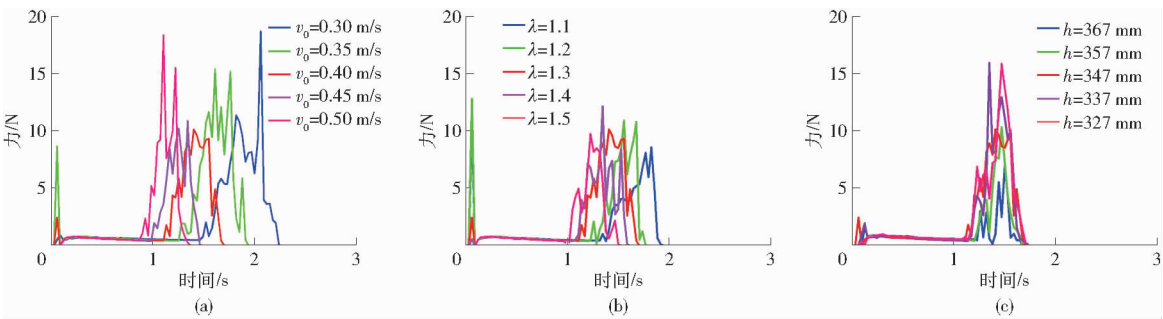


图 12 右栽植器受力变化曲线
Fig. 12 Forces on right planter

图 11b、12b 可知,当前进速度一定时,土壤对左右栽植器的作用力在不同速比特征参数下变化相似。

通过分析图 11a、11b 与图 12a、12b 可知,前进速度和速比特征参数都会对栽植频率产生影响,且前进速度对栽植频率的影响更大。当速比特征参数一定时,前进速度与栽植器角速度呈正比,此时两者共同影响栽植频率;当前进速度一定时,速比特征参数与栽植器角速度呈正比,此时栽植器角速度影响栽植频率。

通过图 11c、12c 可知,不同中心轴高度下载植器入土过程中受到土壤的挤压力变化趋势相似,呈先上升后下降变化趋势。当速比特征参数和前进速度一定时,栽植机构中心轴高度越低,栽植器入土深度越深,栽植器所受土壤挤压力越大。

4 试验与结果分析

4.1 单因素试验

根据辣椒育苗移栽农艺要求,选择直立度 U 、漏

栽率 M 、株距变异系数 C_v 作为试验指标进行单因素台架试验^[27-29],试验方案如表 3 所示。

统计每组试验中辣椒钵苗的栽植情况,利用水平仪测量栽植后的钵苗直立程度,并计算直立度 U ;统计栽植过程漏栽株数 N_{LZ} ;利用卷尺测量栽植后辣椒苗株间距离 X ,测量过程如图 13 所示。



图 13 测量过程
Fig. 13 Measurement process

根据机械行业标准 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》,计算直立度 U 、漏栽率 M 和株距变异系数 C_v 。

以不同前进速度、速比特征参数、中心轴高度为试验因素进行单因素台架试验,每组试验重复 3 次,每次统计 100 组数据,试验结果如表 4 所示。

表 4 台架单因素试验结果
Tab. 4 Results of single-factor test on bench

前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验 序号	直立度/ ($^{\circ}$)	漏栽 率/%	株距变异 系数/%	速比特 征参数	试验 序号	直立度/ ($^{\circ}$)	漏栽率/ %	株距变异 系数/%	中心轴 高度/mm	试验 序号	直立度/ ($^{\circ}$)	漏栽 率/%	株距变异 系数/%
0.30	1	71.9	5.0	7.61	1.1	1	65.4	5.0	7.14	367	1	67.6	4.0	6.20
	2	71.0	4.0	6.70		2	69.9	3.0	6.75		2	67.7	5.0	6.70
	3	68.9	4.0	7.98		3	70.3	3.0	7.93		3	70.7	5.0	5.70
	平均值	70.6	4.3	7.43		平均值	68.5	3.7	7.27		平均值	68.7	4.7	6.20
0.35	1	70.1	5.0	6.97	1.2	1	69.6	4.0	6.34	357	1	71.6	5.0	5.94
	2	73.0	4.0	6.68		2	67.1	3.0	7.13		2	67.2	4.0	7.45
	3	72.9	3.0	6.23		3	69.9	5.0	7.33		3	69.4	4.0	6.49
	平均值	72.0	4.0	6.63		平均值	68.9	4.0	6.93		平均值	69.4	4.3	6.63
0.40	1	74.2	4.0	5.16	1.3	1	72.2	4.0	6.06	347	1	71.9	4.0	6.91
	2	70.8	2.0	5.37		2	70.2	2.0	6.44		2	69.0	5.0	6.40
	3	71.5	4.0	5.30		3	69.4	3.0	6.14		3	70.7	4.0	6.74
	平均值	72.2	3.3	5.28		平均值	70.6	3.0	6.21		平均值	70.5	4.3	6.68
0.45	1	66.1	4.0	5.26	1.4	1	67.4	3.0	6.45	337	1	70.3	3.0	5.78
	2	65.7	3.0	5.30		2	68.9	3.0	6.01		2	70.9	4.0	5.19
	3	69.7	4.0	5.65		3	67.5	4.0	6.75		3	70.6	2.0	5.88
	平均值	67.2	3.7	5.40		平均值	67.9	3.3	6.40		平均值	70.6	3.0	5.62
0.50	1	68.4	5.0	6.54	1.5	1	64.8	5.0	7.89	327	1	64.2	4.0	5.44
	2	63.0	2.0	6.05		2	67.4	4.0	7.27		2	64.8	4.0	6.78
	3	64.5	5.0	7.09		3	66.5	4.0	7.45		3	72.9	3.0	5.77
	平均值	65.3	4.0	6.56		平均值	66.2	4.3	7.54		平均值	67.3	3.67	6.00

4.2 二次旋转正交组合试验

4.2.1 试验方案与结果

为进一步研究试验因素对辣椒钵苗栽植机构移栽作业性能的影响,开展三因素五水平二次旋转正交组合试验,共 23 组。根据单因素台架试验结果,进行多因素试验设计,试验因素编码如表 5 所示,试验方案与结果如表 6 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 5 试验因素编码

Tab.5 Experimental factors and codes

编码	因素		
	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速比特征 参数	中心轴高度/ mm
1.682	0.45	1.40	347
1	0.43	1.36	343
0	0.40	1.30	337
-1	0.37	1.24	331
-1.682	0.35	1.20	327

4.2.2 方差分析

运用 Design-Expert 数据处理软件对试验数据进行多元回归拟合分析,建立评价指标与试验因素的二次多项式回归模型^[30],方差分析结果如表 7 所示。栽植机构移栽过程中各影响因素与试验指标之间的回归方程分别为

表 7 方差分析

Tab.7 Analysis of variance

方差来源	直立度				漏栽率				株距变异系数			
	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	273.81	9	11.15	<0.000 1 **	45.84	9	11.03	<0.000 1 **	18.31	9	26.67	<0.000 1 **
X_1	2.26	1	0.826 3	0.379 9	0.233 7	1	0.506 2	0.489 4	0.000 4	1	0.005 6	0.941 5
X_2	23.49	1	8.60	0.011 6 *	1.41	1	3.06	0.103 9	0.264 8	1	3.47	0.085 2
X_3	10.49	1	3.84	0.071 8	0.190 7	1	0.413 0	0.531 6	0.119 5	1	1.57	0.232 9
X_1X_2	0.080 0	1	0.029 3	0.866 7	0.361 3	1	0.782 6	0.392 4	0.316 0	1	4.14	0.062 7
X_1X_3	6.84	1	2.51	0.137 3	0.001 3	1	0.002 7	0.959 3	0.154 0	1	2.02	0.178 9
X_2X_3	1.62	1	0.593 5	0.454 8	3.00	1	6.50	0.024 2 *	0.495 0	1	6.49	0.024 3 *
X_1^2	85.02	1	31.15	<0.000 1 **	9.14	1	19.79	0.000 7 **	4.09	1	53.66	<0.000 1 **
X_2^2	117.53	1	43.06	<0.000 1 **	22.89	1	49.58	<0.000 1 **	6.26	1	82.08	<0.000 1 **
X_3^2	29.33	1	10.74	0.006 0 **	9.14	1	19.79	0.000 7 **	6.84	1	89.64	<0.000 1 **
残差	35.48	13			6.00	13			0.991 8	13		
失拟	16.25	5	1.35	0.334 8	2.50	5	1.14	0.411 5	0.229 0	5	0.480 4	0.782 3
误差	19.23	8			3.50	8			0.762 8	8		
总和	309.29	22			51.84	22			19.31	22		

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

$$Y_1=77.70+0.406\,4X_1-1.31X_2-0.876\,3X_3-0.10X_1X_2-0.925X_1X_3-0.45X_2X_3-2.31X_1^2-2.72X_2^2-1.36X_3^2$$

(6)

$$Y_2=1.76+0.130\,8X_1+0.321\,5X_2-0.118\,2X_3-0.212\,5X_1X_2+0.012\,5X_1X_3+0.612\,5X_2X_3+0.758\,3X_1^2+1.20X_2^2+0.758\,3X_3^2$$

(7)

表 6 试验方案与结果

Tab.6 Experimental program and results

试验号	因素			直立度	漏栽率	株距变异系
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/(^{\circ})$	$Y_2/\%$	数 $Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	72.6	4.2	7.10
2	1	-1	-1	75.8	5.8	7.07
3	-1	1	-1	69.7	4.2	6.47
4	1	1	-1	73.9	4.2	7.37
5	-1	-1	1	71.7	3.3	6.51
6	1	-1	1	72.6	4.2	6.06
7	-1	1	1	68.4	5.0	7.01
8	1	1	1	67.5	5.8	7.22
9	-1.682	0	0	71.4	4.2	6.74
10	1.682	0	0	70.3	3.3	6.32
11	0	-1.682	0	71.1	4.2	6.70
12	0	1.682	0	68.3	5.8	7.04
13	0	0	-1.682	73.6	4.2	6.97
14	0	0	1.682	73.5	3.3	6.93
15	0	0	0	78.3	2.5	5.41
16	0	0	0	77.5	1.7	5.11
17	0	0	0	78.8	1.7	5.04
18	0	0	0	79.6	2.5	4.74
19	0	0	0	78.5	0.8	4.49
20	0	0	0	74.3	1.7	5.18
21	0	0	0	76.5	0.8	5.46
22	0	0	0	77.6	1.7	5.24
23	0	0	0	78.3	2.5	4.99

$$Y_3=5.07-0.005\,6X_1+0.139\,3X_2-0.093\,5X_3+0.198\,8X_1X_2-0.138\,7X_1X_3+0.248\,8X_2X_3+0.507\,6X_1^2+0.627\,8X_2^2+0.656\,1X_3^2$$

(8)

由表 7 可知,直立度 Y_1 模型、 X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 拟合度均 $P<0.05$;漏栽率 Y_2 模型、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 拟合度均 $P<0.05$;株距变异系数 Y_3 模型、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、

X_3^2 拟合度均 $P < 0.05$ 。直立度、漏栽率、株距变异系数三者回归模型失拟项均 $P > 0.05$, 失拟项均不显著。方差分析表明回归模型拟合效果好。

4.2.3 响应曲面分析

探究影响因素交互作用对试验指标的影响, 并进行交互响应曲面绘制^[31], 如图 14 所示。在因素交互作用影响下, 存在一个栽植效果较优区域, 该区域内直立度较高, 漏栽率较低, 株距变异系数较小。

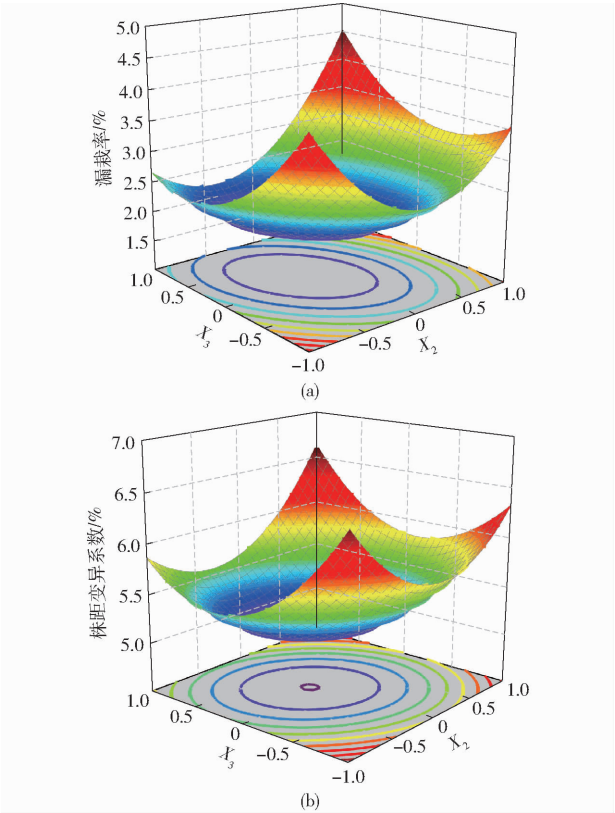


图 14 交互响应曲面 ($X_1 = 0$)

Fig. 14 Response surfaces and contours of interactions

图 14a 为栽植机构前进速度处于零水平 (0.4 m/s) 时, 速比特征参数和中心轴高度交互作用对漏栽率的影响, 该交互响应曲面呈下凹状态。当速比特征参数一定时, 漏栽率随中心轴高度增加先下降后上升; 当中心轴高度一定时, 漏栽率随速比特征参数增加先下降后上升。

图 14b 为栽植机构前进速度处于零水平 (0.4 m/s) 时, 速比特征参数和中心轴高度交互作用对株距变异系数的影响, 该交互响应曲面呈下凹状态。当速比特征参数一定时, 株距变异系数随速比特征参数增加先下降后上升; 当中心轴高度一定时, 株距变异系数随速比特征参数增加先下降后上升。

综上所述, 漏栽率、株距变异系数受各因素影响与方差分析结论一致。

5 参数优化与试验验证

为保证移栽作业过程的钵苗直立度和成功率, 进一步在水平约束下寻求因素最优组合, 结合因素边界条件建立数学模型, 并对评价指标回归模型进行多目标求解。其优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \quad \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

基于各项性能目标的综合考虑, 求解得到栽植性能最佳状态下试验因素最佳参数组合为前进速度 0.4 m/s、速比特征参数 1.29、中心轴高度 336.8 mm, 此时钵苗移栽直立度为 77.9°, 漏栽率为 1.8%, 株距变异系数为 5.07%。

为验证栽植机构栽植过程最佳工作参数组合, 以小米辣钵苗为试验对象, 进行台架试验, 如图 15 所示。以前进速度 0.4 m/s、速比特征参数 1.29、中心轴高度 336.8 mm, 重复进行 60 组台架验证试验。试验结果表明, 栽植直立度为 78.2°, 漏栽率为 1.7%, 株距变异系数为 5.23%, 能满足栽植要求。

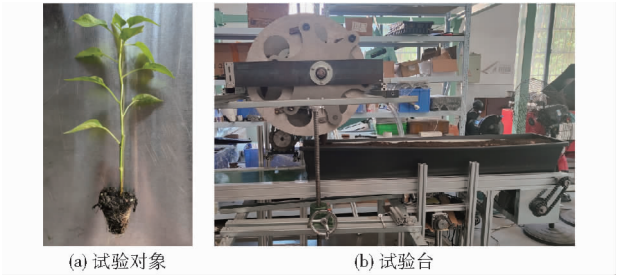


图 15 台架试验

Fig. 15 Bench test

6 结论

(1) 设计了一种链式凸轮栽植机构, 结合辣椒钵苗物理形态对栽植机构主要参数进行了设计, 分析了栽植机构工作原理及其栽植运动轨迹; 利用 RecurDyn 软件建立了栽植机构多体动力学仿真模型, 验证了仿真轨迹与理论轨迹的一致性; 利用 EDEM 软件建立了土壤离散元模型; 利用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真方法, 建立了栽植机构耦合仿真模型, 通过耦合仿真试验, 分析了栽植过程中不同影响因素对栽植器受力的影响。

(2) 通过单因素试验、二次旋转正交组合试验探究各因素对栽植机构性能的影响, 通过方差分析和响应曲面分析得出了栽植机构关键因素对试验指标的影响规律, 获得较优参数组合并进行了台架试

验验证。试验结果表明：当前进速度为 0.4 m/s、速
比特征参数为 1.29、中心轴高度为 336.8 mm 时，栽
植后钵苗平均直立度为 78.2°，漏栽率为 1.7%，株
距变异系数为 5.23%，能满足栽植要求。

参 考 文 献

[1] 王怡雯, 曹斌. 推进辣椒产业高质量发展的经验、问题和建议——以柘城县辣椒产业为例[J]. 蔬菜, 2024(7): 11–17.
WANG Yiwen, CAO Bin. Experience, problems and countermeasures for promoting high-quality development of pepper industry—taking the pepper industry in Zhecheng County as an example[J]. Vegetables, 2024(7): 11–17. (in Chinese)

[2] 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.
QIAO Lijuan, ZHAO Banghong, ZONG Yixiang, et al. Development current situation, tendency, and countermeasure for China’s pepper industry[J]. China Vegetables, 2023(11): 9–15. (in Chinese)

[3] 赵研科, 邢鹏飞, 姜涛. 辣椒收获机现状与发展趋势[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(5): 1–4, 21.
ZHAO Yanke, XING Pengfei, JIANG Tao. Current status and development trends of pepper harvesters[J]. Tractor and Farm Transporter, 2024, 51(5): 1–4, 21. (in Chinese)

[4] 张子峰. 我国辣椒产业发展现状、主要挑战与应对之策[J]. 北方园艺, 2023(14): 153–158.
ZHANG Zifeng. Current development situation, main challenges and its countermeasures of the pepper industry in China[J]. Northern Horticulture, 2023(14): 153–158. (in Chinese)

[5] ZHAO Xiong, GUO Junlin, LI Kewei, et al. Optimal design and experiment of 2–DoF five-bar mechanism for flower seedling transplanting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105746.

[6] 毛灿, 罗海峰, 朱毅, 等. 钵苗移栽机械研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 215–222.
MAO Can, LUO Haifeng, ZHU Yi, et al. Research status and development trend of seedling transplanting machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 215–222. (in Chinese)

[7] 李林林, 邓干然, 林卫国, 等. 作物移栽机械栽植机构发展现状与趋势[J]. 现代农业装备, 2022, 43(1): 2–7.
LI Linlin, DENG Ganran, LIN Weiguo, et al. Development status and trend of mechanical planting mechanism for crop transplanting[J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(1): 2–7. (in Chinese)

[8] 刘蒙滋, 姜凯, 王秀, 等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 1–8, 20.
LIU Mengzi, JIANG Kai, WANG Xiu, et al. Research status and prospect of automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 1–8, 20. (in Chinese)

[9] 俞高红, 王磊, 孙良, 等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1–20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1–20. (in Chinese)

[10] 胡飞, 郭栋, 陈彩蓉, 等. 复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 62–69.
HU Fei, GUO Dong, CHEN Cairong, et al. Design and experiment on compound crank rocker double-row planting device of vegetable plug seedling up-film transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 62–69. (in Chinese)

[11] 颜华, 刘冲, 李鹏斌, 等. 蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 71–81.
YAN Hua, LIU Chong, LI Pengbin, et al. Design and experiment of duckbill planting device with adjustable static trajectory for planting vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 71–81. (in Chinese)

[12] 尹大庆, 张诺一, 周脉乐, 等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 65–72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65–72. (in Chinese)

[13] 辛亮, 孙铭翼, 李泽泽, 等. 高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 161–169, 265.
XIN Liang, SUN Mingyi, LI Zeze, et al. Optimization design and experiment of high catching and low planting type differential variable attitude planetary gear system planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 161–169, 265. (in Chinese)

[14] 郭畅. 行星轮式茄子钵苗栽植机构的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
GUO Chang. Design and experiment study of planetary gear type eggplant pot seedling planting mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[15] 王洪波, 张开兴, 刘贤喜, 等. 蔬菜移栽机五杆栽植机构的仿真与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 112–116.
WANG Hongbo, ZHANG Kaixing, LIU Xianxi, et al. Design and experiment of five bar planting mechanism for vegetable

- transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 112–116. (in Chinese)
- [16] ZHANG Jiqiang, NIU Ziru, LI Tianhua, et al. Design and optimization of planting process parameters for 2ZYX-2 type green onion ditching and transplanting machine[J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2020(1): 147–166.
- [17] 石峰, 孙松林, 邓向春, 等. 偏心圆盘指夹式幼苗移栽机栽植机构运动轨迹分析[J]. 湖南农业大学学报, 2012, 38(3): 333–336.
- SHI Feng, SUN Songlin, DENG Xiangchun, et al. Trajectory analysis of planting device of eccentric disc and finger clip pattern seedling planting machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2012, 38(3): 333–336. (in Chinese)
- [18] 李博, 陈军, 黄玉祥. 机械与土壤相互作用的离散元仿真研究进展[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 217–222.
- LI Bo, CHEN Jun, HUANG Yuxiang. Research progress of discrete element simulation of soil-machine interaction[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 217–222. (in Chinese)
- [19] 王善博, 阿力木·买买提吐尔逊, 黄强斌, 等. 基于 EDEM-RecurDyn 耦合的玉米剥皮装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 115–120, 143.
- WANG Shanbo, Aym·Memettrsun, HUANG Qiangbin, et al. Simulation analysis and experiment of a maize peeling device based on EDEM-RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 115–120, 143. (in Chinese)
- [20] 尹春梅, 施建平, 潘恺, 等. 广西土种志——基于全国第二次土壤普查的数据集[J]. 中国科学数据, 2017, 2(3): 28–39.
- YIN Chunmei, SHI Jianping, PAN Kai, et al. A database of soil types in Guangxi: based on the Second National Soil Survey [J]. China Scientific Data, 2017, 2(3): 28–39. (in Chinese)
- [21] 苑晓亮. 蔬菜移栽机吊杯式栽植机构优化设计与试验[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- YUAN Xiaoliang. Optimization design and experiment of the suspended cup planting mechanism of vegetable transplanter[D]. Chongqing: Southwest University, 2023. (in Chinese)
- [22] 陶利民, 石艳琪, 黄柳益, 等. 广西滨海地区甘蔗耕种土壤离散元仿真模型的参数标定[J]. 江西农业学报, 2022, 34(10): 94–100.
- TAO Limin, SHI Yanqi, HUANG Liuyi, et al. Parameter calibration of soil discrete element simulation model for sugarcane cultivation in Guangxi coastal area[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(10): 94–100. (in Chinese)
- [23] 贾翠平. 基于 DEM 的穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器-土壤相互作用机理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- JIA Cuiping. Study on the interaction mechanism between hanging cup planter and soil of high-speed transplanter for plug seedling based on DEM[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
- [24] 杨启志, 朱梦岚, 贾翠平, 等. 穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器膜上成穴性能仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(7): 1–7.
- YANG Qizhi, ZHU Menglan, JIA Cuiping, et al. Simulation and experiment of hole forming performance on the membrane of hanging cup planter of high-speed transplanter for pot seedling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 1–7. (in Chinese)
- [25] 张洪东. 基于机械-作物-土壤耦合模型的小株距榨菜栽植装置设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- ZHANG Hongdong. Design and experiment of small plant spacing planting device of tuber mustard based on mechanical-crop-soil coupling model[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [26] FENG Yinnan, WU Juan, GUO Chenhao, et al. Numerical simulation and experiment on excavating resistance of an electric cable shovel based on EDEM-RecurDyn bidirectional coupling[J]. Machines, 2022, 10(12): 1203.
- [27] JIN Xin, CHENG Qun, ZHAO Bo, et al. Design and test of 2ZYM-2 potted vegetable seedlings transplanting machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 101–110.
- [28] 旱地移植机械: JB/T 10291—2013[S]. 2013.
- [29] 金丽宇. 辣椒钵育移栽机栽植机构设计与试验[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
- [30] WU Guangwei, WANG Shoujiang, ZHANG Anqi, et al. Optimized design and experiment of a self-covering furrow opener for an automatic sweet potato seedling transplanting machine[J]. Sustainability, 2023, 15(17): 13091.
- [31] JI Dong, TIAN Subo, WU Huiying, et al. Design and experimental verification of an automatic transplant device for a self-propelled flower transplanter[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(8): 420.