doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.020

基于 DEM－MBD 的辣椒钵苗移栽机取苗装置优化设计与试验

金　鑫[1,2]　赵国庆[1]　李明勇[1,2]　李少凡[1]　梁　佳[3]　解晓琳[1,2]

（1. 河南科技大学农业装备工程学院，洛阳 471003；2. 龙门实验室农机装备产业研究院，洛阳 471000；
3. 巴州良佳农机制造有限公司，巴音郭楞蒙古自治州 841000）

摘要：针对移栽取苗环节中末端执行器与苗钵互作机理不明，现有末端执行器取苗成功率低、易伤苗等问题，本文设计了一种基于Ⅱ型齿轮五杆机构的取苗装置，建立了取苗装置运动学模型，对取苗装置的位姿进行了优化，分析了影响钵苗损伤程度的主要因素；以辣椒钵苗为研究对象，通过 EDEM－RecurDyn 联合仿真建立了机械-钵苗耦合模型；对取苗过程进行了仿真分析，以入钵深度、取苗爪转角、取苗角度为试验因素进行了仿真单因素试验；在取苗仿真过程中分析了不同因素水平下对钵体施加的压缩力以及基质颗粒间 Bond 键数量随时间的变化情况。搭建取苗装置样机，以取苗成功率和钵体质量损失率为试验指标，进行了三因素三水平正交试验并得到最优参数组合为：入钵深度为 25 mm、取苗爪转角为 4°、取苗角度为 0°，以 128 穴辣椒苗为试验对象进行验证试验，取苗成功率为 93.33%，钵体质量损失率为 1.56%。

关键词：钵苗移栽机；取苗装置；联合仿真；EDEM；RecurDyn

中图分类号：S223.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)17-0210-11　　**OSID**：

Structural Parameters Optimization Design and Experiment of Seedling Picking Device for Chili Plug Seeding Transplanter Based on DEM－MBD

Jin Xin[1,2]　Zhao Guoqing[1]　Li Mingyong[1,2]　Li Shaofan[1]　Liang Jia[3]　Xie Xiaolin[1,2]

(1. *College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*
2. *Agricultural Equipment Industry Research Institute*, *Longmen Laboratory*, *Luoyang* 471000, *China*
3. *Bazhou Liangjia Agricultural Machinery Manufacturing Co.*, *Ltd.*, *Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture* 841000, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low success rate of seedling taking by the existing end-effector and easy to hurt the seedlings in the transplanting and seedling taking process, a seedling picking device was designed based on Ⅱ type geared five bar mechanism. The kinematic model of the seedling picking device was established, the working trajectory and position of the seedling picking device were optimized, and the main factors affecting the damage degree of the pot seedling were analyzed. Taking chili pepper pot seedling as the research object, the coupled mechanical-pot seedling model was established through EDEM－RecurDyn co-simulation to simulate and analyze the seedling picking process, and the simulation single-factor experiment was carried out with the insertion depth, seedling picking claw turning angle, and seedling picking angle as the test factors. The magnitude of the compression force exerted on the substrate and the number of Bond keys between the substrate particle over time were analyzed at different levels of factors during the seedling pickup simulation process. A three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted by setting up a prototype machine to test the success rate of seedling pickup and the loss rate of pot quality. At the best parameter combination of insertion depth of 25 mm, seedling picking claw turning angle of 4°, and seedling picking angle of 0°, a validation test was carried out with 128 cells of chili pepper seedlings, and the success rate of seedling picking was 93.33%, and the rate of substrate loss was 1.56%.

Key words: plug seedling transplanter; seedling-picking device; co-simulation; EDEM; RecurDyn

收稿日期：2025－04－17　修回日期：2025－05－06

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2000603)、河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN015)和河南省科技攻关计划项目(242102110346)

作者简介：金鑫(1986—)，男，教授，博士，主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究，E-mail：jx.771@163.com

通信作者：李明勇(1993—)，男，副教授，博士，主要从事蔬菜智能化种植技术装备研究，E-mail：mingyonglee@163.com

0　引言

辣椒是我国重要的经济作物之一，年产量超过 1 600 万吨，产量占全球的近 40%[1]。而我国蔬菜机械化种植水平较低，制约了蔬菜种植业发展。自动取苗机构主要为夹钵式、夹茎式、顶出式等，且以夹钵式为主[2]。目前夹钵式取苗机构由于末端执行器与苗钵互作机理不明，存在取苗成功率低、钵体完整性差等问题[3]，研制一种低损取苗装置对我国辣椒种植业发展具有重要意义。

为解决取苗环节伤苗率高的问题，国内外学者进行了大量研究[4-7]。侯加林等[8]设计了一种插夹联动式末端执行器，采用 DEM－MFBD 方法分析了取苗过程中钵苗损伤机理。赵翔烽等[9]设计弹性扎入式取苗爪，通过 EDEM－RecurDyn 建立柔性取苗爪的刚柔耦合动力学模型，并分析取苗爪扎深和扎入速度对钵体颗粒的影响。崔永杰等[10]设计了一种基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器，利用 EDEM 和 RecurDyn 建立苗钵根土复合模型，分析不同作业因素对苗钵形变量和取苗成功率的影响。胡建平等[11]以指夹式取苗爪为研究对象，通过 EDEM－RecurDyn 耦合仿真模拟取苗爪插入、夹取、提离过程，分析取苗爪插入钵体深度、开始夹苗深度对取苗时钵体的影响。张学东等[12]以顶夹式取苗末端执行器为研究对象，以顶针直径、顶针长度、顶苗速度和夹苗加载距离为试验因素，利用 EDEM 模拟顶苗与夹苗过程。童俊华等[13]设计了一种指铲式末端执行器，通过 EDEM 分析了末端执行器对基质的抓取过程，以基质配比和含水率为因素，内聚力和粘附力为指标进行试验。韩豹等[14]设计了一种插入针间距可调的针式取苗末端执行器，利用 EDEM 以穴盘规格、取苗加速度、取苗针插入边距比和含水率为试验因素，钵体完整率和取苗失败率为指标进行试验。高国华等[15]利用 EDEM 分析了嫁接机钢针顶起钵苗的过程，以钢针长度、钢针茎粗、顶起速度为因素，最大顶起高度为指标进行试验。上述研究通过动力学与离散元耦合仿真方法分析了不同因素对取苗成功率以及钵体损伤的影响，为后续的取苗装置结构优化提供了理论指导。

综上所述，为解决取苗装置取苗成功率低、钵苗损伤率高的问题，本文提出一种基于Ⅱ型齿轮五杆机构的取苗装置，通过理论分析、仿真模拟与样机试验对取苗装置结构参数进行分析与优化，以提高取苗成功率，减少钵苗损伤。

1　取苗装置结构与工作原理

1.1　取苗装置结构

本文所研究的取苗装置如图 1 所示，该装置基于Ⅱ型齿轮五杆机构[16-17]设计，由行星轮驱动机构、行星臂、取苗臂、摆臂和取苗爪组成。其中，行星轮驱动机构由铰接在行星架上的太阳轮、中间轮以及行星轮组成，行星臂的一端与行星轮的齿轮轴固连，另一端与取苗臂铰接于点 C，取苗臂的一端安装有取苗爪，另一端与安装在机架上的摆臂铰接于点 D。

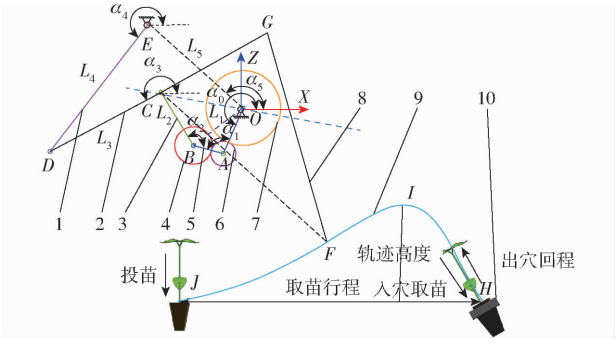


图 1　取苗装置结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of seedling picking device

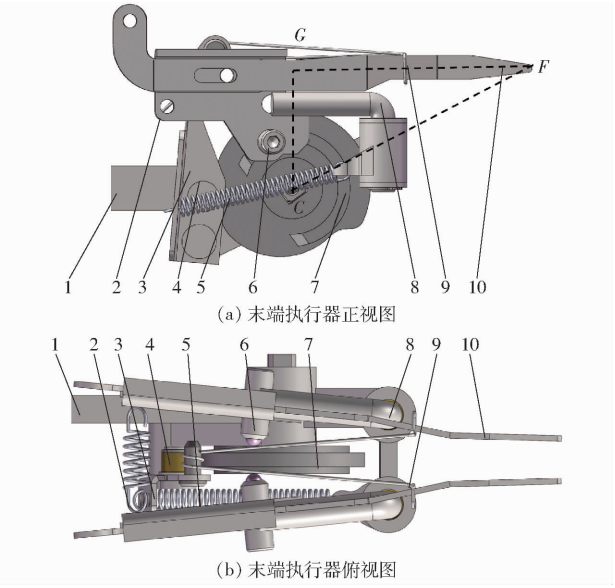
1. 摆臂　2. 取苗臂　3. 行星臂　4. 行星轮　5. 行星架　6. 中间轮　7. 太阳轮　8. 取苗爪　9. 取苗轨迹　10. 穴盘

1.2　取苗装置工作原理

取苗装置在作业时，太阳轮固定于机架不动，中间轮与太阳轮啮合，行星轮与中间轮啮合，3 个齿轮通过行星架保持相对位置，动力输入轴驱动行星架绕太阳轮转动中心点 O 转动，行星架带动行星臂转动同时驱动取苗臂运动，取苗臂在摆臂的约束下，其另一端安装的取苗爪尖端点 F 的运动轨迹为曲线 JIH，其中，IH 段取苗爪进入穴盘并夹紧钵苗，HIJ 段取苗爪夹紧钵苗退出穴盘，并向栽植装置上方移动，点 J 为投苗点，JI 段取苗爪始终保持张开状态，为下一次取苗做准备。

取苗末端执行器结构如图 2 所示，当进行取苗作业时，取苗臂带动整个取苗末端执行器按固定轨迹进行运动，当取苗爪尚未插入穴盘时保持开启状态，当取苗爪插入穴盘一定深度后，端面凸轮进入推程段并将球头紧定螺钉顶起，使得取苗爪绕销轴转动并将钵体夹紧，此时夹紧弹簧被压缩，从开始插入穴盘开始平面凸轮进入回程段，推苗摆杆带动推苗杆向取苗爪后方运动；随后取苗末端执行器携带钵苗到达投苗位置，在投苗位置时端面凸轮进入回程段，此时夹紧弹簧恢复原长，取苗爪张开，同时平面凸轮进入推程段，推苗摆杆带动推苗杆向取苗爪尖端运动，在推苗杆的作用下，钵苗脱离取苗爪落入下

方的栽植器中,随后取苗爪进入回程段,为下一次取苗做准备。



(a) 末端执行器正视图

(b) 末端执行器俯视图

图 2 取苗末端执行器结构图

Fig. 2 Structure diagrams of end-effector

1. 取苗臂 2. 夹紧弹簧 3. 推苗摆杆 4. 推苗滚子 5. 推苗弹簧 6. 球头紧定螺钉 7. 凸轮 8. 销轴 9. 推苗杆 10. 取苗爪

2 取苗装置结构优化

2.1 取苗装置运动学方程

如图 1 所示,以太阳轮转动中心 O 作为坐标原点建立水平方向为 X 轴、竖直方向为 Z 轴的平面直角坐标系 XOZ,定义逆时针转动为正。以行星架为主动件,对取苗装置进行运动学分析。

根据取苗装置结构图可建立矢量方程为

$$\begin{cases} \boldsymbol{l}_{OA}+\boldsymbol{l}_{AB}+\boldsymbol{l}_{BC}=\boldsymbol{l}_{OE}+\boldsymbol{l}_{ED}+\boldsymbol{l}_{DC} \\ \boldsymbol{l}_{CG}+\boldsymbol{l}_{GF}=\boldsymbol{l}_{CF} \end{cases} \tag{1}$$

将矢量方程转化为解析形式,即有点 A 位移方程为

$$\begin{cases} x_A=(R_0+R_1)\cos(\alpha_0+\varphi_0) \\ z_A=(R_0+R_1)\sin(\alpha_0+\varphi_0) \end{cases} \tag{2}$$

式中 R_0——太阳轮分度圆半径,mm

R_1——中间轮分度圆半径,mm

α_0——行星架 OA 的初始安装角,(°)

φ_0——行星架 OA 转过的角度,(°)

(x_A,z_A)——点 A 坐标,mm

点 B 位移方程为

$$\begin{cases} x_B=x_A+(R_1+R_2)\cos(\alpha_0+\alpha_1-\pi+\varphi_0) \\ z_B=z_A+(R_1+R_2)\sin(\alpha_0+\alpha_1-\pi+\varphi_0) \end{cases} \tag{3}$$

式中 R_2——行星轮分度圆半径,mm

α_1——行星架 OA 与 AB 的夹角,(°)

(x_B,z_B)——点 B 坐标,mm

点 C 位移方程为

$$\begin{cases} x_C=x_B+L_2\cos\left(\alpha_2+\left(1-\dfrac{R_0}{R_2}\right)\varphi_0\right) \\ z_C=z_B+L_2\sin\left(\alpha_2+\left(1-\dfrac{R_0}{R_2}\right)\varphi_0\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中 L_2——行星臂 BC 长度,mm

α_2——行星臂 BC 的初始安装角,(°)

(x_C,z_C)——点 C 坐标,mm

点 D 位移方程为

$$\begin{cases} x_D=x_E+L_4\cos\alpha_4=x_C+L_3\cos\alpha_3 \\ z_D=z_E+L_4\sin\alpha_4=z_C+L_3\sin\alpha_3 \end{cases} \tag{5}$$

式中 L_3——取苗臂上 CD 长度,mm

L_4——摆臂 ED 长度,mm

α_3——取苗臂 CD 与 X 轴的夹角,(°)

α_4——行星臂 BC 与 X 轴的夹角,(°)

(x_D,z_D)——点 D 坐标,mm

(x_E,z_E)——点 E 坐标,mm

根据式(1)可得到方程

$$(m-L_3\cos\alpha_3)^2+(n-L_3\sin\alpha_3)^2=L_4^2 \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} m=x_C-L_5\cos\alpha_5 \\ n=z_C-L_5\sin\alpha_5 \end{cases} \tag{7}$$

式中 L_5——机架 OE 长度,mm

α_5——机架 OE 的安装角,(°)

将式(6)化简后可得

$$A\sin\alpha_3+B\cos\alpha_3+C=0 \tag{8}$$

其中

$$\begin{cases} A=2mL_4 \\ B=2nL_4 \\ C=-m^2-n^2 \end{cases} \tag{9}$$

根据式(8)可求解 α_3 为

$$\alpha_3=2\arctan\frac{A+\sqrt{A^2+B^2-C^2}}{B-C} \tag{10}$$

由式(1)矢量方程可以得到点 F 坐标为

$$\begin{cases} x_F=x_C+L_{CF}\cos(\alpha_3+\alpha_6) \\ z_F=z_C+L_{CF}\sin(\alpha_3+\alpha_6) \end{cases} \tag{11}$$

式中 (x_F,z_F)——点 F 坐标,mm

L_{CF}——取苗点到凸轮轴的距离,mm

α_6——取苗臂与 L_{CF} 的夹角,(°)

设 FC 连线与 X 轴的夹角为 β_2,则

$$\tan\beta_2=(z_C-z_F)/(x_C-x_F) \tag{12}$$

点 G 位移方程为

$$\begin{cases} x_G=x_C+L_{CF}\cos\alpha_7\cos(\beta_2+\pi-\alpha_7) \\ z_G=z_C+L_{CF}\cos\alpha_7\cos(\beta_2+\pi-\alpha_7) \end{cases} \tag{13}$$

式中 (x_G,z_G)——点 G 坐标,mm

α_7——取苗点与凸轮轴连线和取苗爪夹角的余角

取苗爪的姿态角即 FG 与 X 轴的夹角 β_3 为

$$\beta_3 = \arctan((z_G - z_F)/(x_G - x_F)) \tag{14}$$

通过取苗爪末端点 F 位移方程对时间分别求一次和二次导数，可得到点 F 的速度和加速度。点 F 速度为

$$\begin{cases} v_{xF} = \dot{x}_C - L_{CF}\sin(\alpha_3 + \alpha_6)\dot{\alpha}_3 \\ v_{zF} = \dot{z}_C + L_{CF}\sin(\alpha_3 + \alpha_6)\dot{\alpha}_3 \end{cases} \tag{15}$$

点 F 加速度为

$$\begin{cases} a_{xF} = \ddot{x}_C - L_{CF}(\sin(\alpha_3 + \alpha_6)\dot{\alpha}_3^2 + \\ \qquad \ddot{\alpha}_3\sin(\alpha_3 + \alpha_6)) \\ a_{zF} = \ddot{z}_C + L_{CF}(\sin(\alpha_3 + \alpha_6)\dot{\alpha}_3^2 + \\ \qquad \ddot{\alpha}_3\sin(\alpha_3 + \alpha_6)) \end{cases} \tag{16}$$

2.2　取苗装置位姿优化

通过分析人工取投苗作业过程以及其他取苗装置作业流程与结构原理，取苗装置位姿应满足如下要求：

（1）入穴取苗段轨迹与出穴送苗段轨迹应尽量重合，且在入穴与出穴时取苗爪应与穴盘尽量垂直，保证能够顺利取苗且使取苗爪对钵体造成的损伤最小[18]。

（2）投苗时钵苗应竖直向下落入下方栽植器中以保证钵苗在栽植器中处于直立状态，即取苗爪在投苗点应处于竖直状态[19]。

（3）取苗轨迹应具有一定高度和长度，避免取出的钵苗与苗盘发生干涉且能够在栽植器正上方进行投苗[20]。

（4）在取投苗过程中，为保证取苗成功率与减少钵苗基质损伤，要求在取苗点速度接近零；为保证钵苗竖直落入分苗杯以及投苗稳定性，在接近投苗点时水平速度以及水平加速度需接近零[21]。

为能够直观地对取苗装置的轨迹和姿态进行参数优化，基于建立的取苗装置运动学方程，利用 Matlab 软件中的 App Designer[22] 模块编写Ⅱ型齿轮五杆取苗装置位姿优化软件。程序人机交互界面如图 3 所示。该界面包括参数输入区、程序控制区、计算结果及图像显示区以及数据查询区。该程序通过改变取苗装置的结构参数模拟不同结构下取苗装置作业时的运动特性和运动状态（包括取苗点位移、速度、加速度、取苗针姿态）。

设置取苗装置在 0 s 时位于取苗点，取苗装置作业频率为 60 株/min，即主动轴转速为 60 r/min，计算并仿真两个作业周期内的取苗点位移、速度、加速度以及取苗爪的姿态角。

通过借助人机交互界面，采用逐次逼近的方法获得了 1 组满足取苗动作要求的取苗装置结构参数

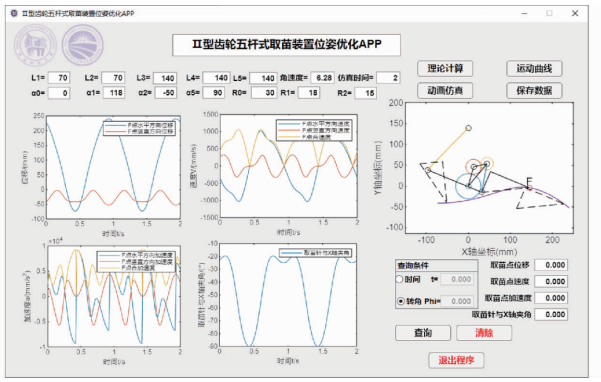


图 3　Ⅱ型齿轮五杆机构取苗装置位姿优化软件界面

Fig. 3　Position and orientation optimization software for Ⅱ-type gear five-bar mechanism seedling picking device

（$L_1 = 70$ mm、$L_2 = 70$ mm、$L_3 = 140$ mm、$L_4 = 140$ mm、$L_5 = 140$ mm、$\alpha_0 = 0°$、$\alpha_1 = 118°$、$\alpha_2 = 0°$、$\alpha_5 = 90°$、$R_0 = 30$ mm、$R_1 = 18$ mm、$R_2 = 15$ mm），优化后的取苗爪轨迹与姿态如图 4 所示。

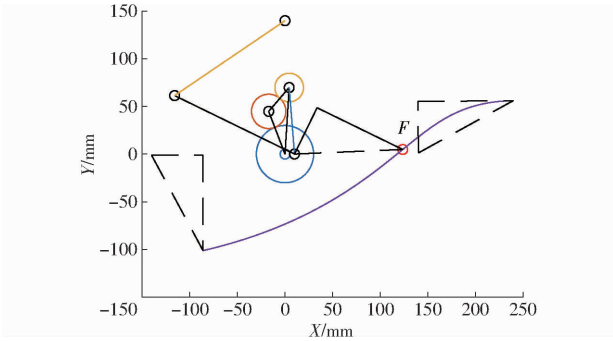


图 4　优化后的取苗爪轨迹与姿态

Fig. 4　Optimized trajectory and attitude of seedling picking claw

优化后的取苗装置取苗点速度与加速度曲线如图 5 所示，图中速度与加速度曲线在取苗与投苗点均符合要求（4）中的速度与加速度要求。在取苗位置，速度为零有利于取苗成功；在投苗位置，水平速度与加速度均为零有利于保证钵苗竖直投苗精度，提高投苗成功率[21]。

3　末端执行器结构分析

3.1　钵体损伤区域分析

对取苗末端执行器进行简化，建立如图 6 所示直角坐标系 XQY，以取苗爪中心销轴（即取苗爪转动中心）为坐标原点 Q，水平方向为 X 轴，竖直方向为 Y 轴。在钵体压缩分析过程中，假设各零件均为刚性结构，不考虑各转动副之间的摩擦和转动间隙[23]。

取苗装置作业时，取苗爪插入穴孔后处于如图 6 所示的初始位置，图中点 A 为紧定螺钉与凸轮接触点，点 B 为取苗爪与钵体底部接触点，点 D 为取苗爪与钵体上边缘接触点；取苗爪以垂直钵体表

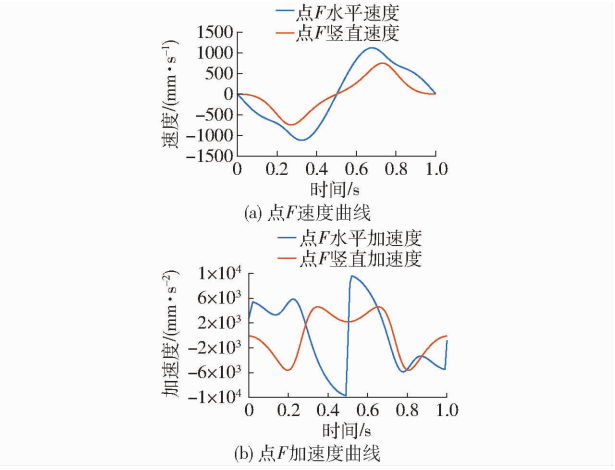


图 5 优化后的取苗点速度与加速度曲线

Fig. 5 Optimized velocity and acceleration curves at seedling picking point

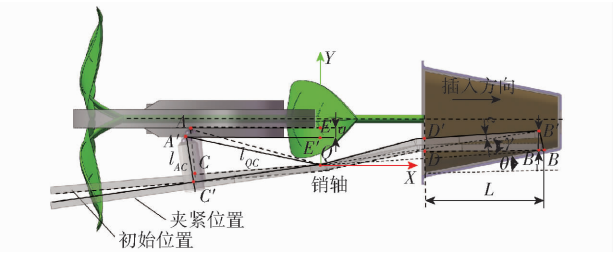


图 6 夹持过程钵体损伤分析

Fig. 6 Pot damage analysis during clamping process

面的方向插入钵体以对钵体造成的损伤最小,取苗爪以销轴 Q 为轴转动角度 γ 后将钵体夹紧随后退出穴孔。根据几何关系可求得取苗爪转角 γ 为

$$\gamma = \arccos\frac{l_{QE}}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{QC}^2}} - \arccos\frac{l_{QE} - a}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{QC}^2}} \tag{17}$$

式中 a——凸轮行程,mm

l_{QE}——销轴 Q 到端面凸轮远休止段的距离

l_{AC}——紧定螺钉顶端与取苗爪的垂直距离

l_{QC}——销轴 Q 到紧定螺钉轴线间的距离

钵体最大压缩量为 $l_{B_1B'}$,钵体压缩区域为四边形 $BB'D'D$,在钵体压缩区域 $BB'D'D$ 中,根据几何关系可求得钵体最大压缩量 $l_{B_1B'}$ 为

$$l_{B_1B'} = 2l_{QB}\cos\gamma\sin\frac{\gamma}{2} \tag{18}$$

式中 l_{QB}——销轴 Q 与取苗爪端点 B 的距离,mm

根据图 6 中几何关系可求得钵体压缩区域 $BB'D'D$ 面积 S 为

$$S = \frac{1}{2}\left[l_{DB_1}(l_{DD'} + l_{B_1B'}) + l_{BB_1}l_{B_1B'}\right] \tag{19}$$

其中

$$\begin{cases} l_{BB_1} = L - 2l_{QB}\sin\gamma\sin\dfrac{\gamma}{2} \\ l_{DB_1} = L - l_{BB_1} \\ l_{DD'} = l_{B_1B'} - l_{DB_1}\tan\gamma \end{cases} \tag{20}$$

式中 l_{BB_1}——线段 BB_1 长度,mm

l_{DB_1}——线段 DB_1 长度,mm

L——入钵深度,mm

$L_{DD'}$——线段 DD' 长度,mm

通过式(18)~(20)可以看出钵体在夹持过程中受到的损伤大小与取苗爪转角 γ、入钵深度 L 有关,且损伤大小随着 γ、L 的增加而增大。

3.2 夹持力理论分析

取苗过程中钵体基质受力情况如图 7 所示。

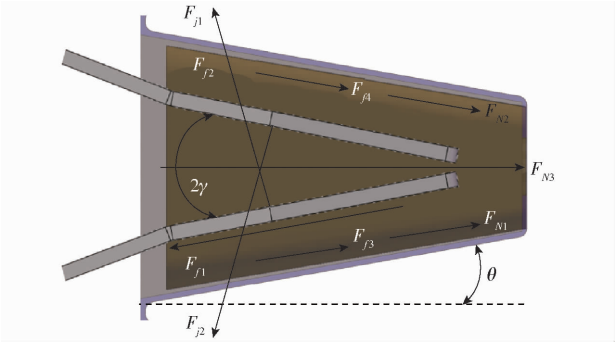


图 7 钵体水平方向受力分析

Fig. 7 Horizontal force analysis of pot

其中 F_{j1}、F_{j2} 为取苗爪对钵体基质的夹持力,F_{f1}、F_{f2} 为取苗爪对钵体基质的摩擦力,F_{f3}、F_{f4} 为穴盘与钵体基质之间的摩擦力,F_{N1}、F_{N2} 为钵体基质与穴盘之间的切向粘附力,F_{N3} 为钵体基质与穴盘之间的法向粘附力,2γ 为夹持角度。F_H 为取苗爪在水平面对钵体施加的合力。通过对钵体水平方向受力分析可知

$$F_H = (F_{f3} + F_{f4} + F_{N1} + F_{N2})\cos\theta + F_{N3} \tag{21}$$

式中 θ——穴孔侧壁与插入方向的夹角,(°)

为保证取苗成功,钵体在水平方向上的合力需满足关系

$$(F_{f1} + F_{f2})\cos\gamma + 2F_j\sin\gamma = F_H \tag{22}$$

式中 F_j 表示钵体基质对取苗爪的作用力,方向与取苗爪垂直,计算式为

$$F_j = \sigma_j A_0 \tag{23}$$

式中 σ_j——取苗爪单位面积受到的应力,N/mm²

A_0——取苗爪与钵体基质的接触面积,mm²

结合图 6 与图 7 分析影响取苗作业时钵体损伤与取苗效果的因素主要为:入钵深度 L、取苗爪转角 γ、穴孔侧壁与取苗爪插入方向的夹角 θ。

取苗装置针对 128 孔穴盘(540 mm × 280 mm)设计,其中单个穴孔尺寸为:上边长 30 mm、下边长 14 mm、穴孔高 40 mm,则入钵深度取值范围为 0~40 mm,但入钵深度过浅会导致取苗失败,因此将入钵深度初步设定为 20~40 mm,由图 6 可知,点 B' 转动后不能越过钵体的中轴线,由图中几何关系可以

得到取苗爪转角 γ 的边界条件不等式为

$$\sqrt{\frac{1-\cos\gamma}{2}}\cos\gamma \leqslant \frac{W_U - 2L\tan\theta}{4l_{QB}} \tag{24}$$

式中　W_U——钵体上边宽，mm

结合式(17)、(24)和图 6 可得取苗爪转角 γ 的取值范围为 0°～10°，初步设定 γ 取值范围为 3°～5°。图中 θ 经实际测量为 10°，优化后的取苗装置取苗时取苗爪是水平的，设置在 XOZ 面中取苗爪与钵苗茎秆的夹角 θ' 即取苗角度取值范围为 －10°～10°。

4　EDEM－RecurDyn 仿真分析

在取苗过程中，不同结构参数的取苗爪可能会对钵体造成不同程度的损伤，如果损伤过大，则会影响后续的栽植作业以及钵苗的生长发育。因此为探究取苗过程中取苗爪对钵体的损伤情况，基于离散元(Discrete element method，DEM)－多体动力学(Multi-body dynamics，MBD)方法，通过 EDEM 与 RecurDyn 对取苗过程进行耦合仿真，探讨不同结构参数下钵体的受力以及损伤情况，为后续结构优化提供参考。

4.1　钵苗离散元建模

试验材料为辣椒钵苗，苗龄为 25 d，泥炭、珍珠岩、蛭石基质配比为 3∶1∶1。为减少计算时间，将钵体颗粒模型统一简化为球形，设置颗粒半径为 1 mm，颗粒接触半径为 1.2 mm。

由于在取苗时钵苗基质含有较高的含水率，为了准确反映钵体基质颗粒之间的接触关系，在 EDEM 中选用 Hertz－Mindlin with JKR V2 模型，该模型能够精确模拟因静电作用、含水率、表面能等因素引起的颗粒间粘附力，适用于药粉、含湿物料(如泥土、矿石)的粘结行为。相比早期版本，JKR V2 通过算法改进提升了大规模颗粒系统的计算效率，减少仿真耗时。EDEM 中内置的 Bonding V2 模型可模拟粘结颗粒的弯曲、扭转、剪切等复杂力学行为，适用于草炭、碳纤维复合材料等非刚性材料的粘结特性研究；粘结键在颗粒接触时动态生成，断裂后颗粒恢复自由运动，能够直观反映物料破碎后的形状和运动轨迹；因此采用 Bonding V2 模型模拟茎叶与钵体之间的接触特性。由于不同钵苗样本根系发育情况各不相同，无法建立具有代表性的幼苗根系模型，因此本研究建立了简化的钵体离散元模型，通过 JKR V2 与 Bonding V2 模型共同描述钵苗根系与基质之间的作用[8]。

通过使用数显游标卡尺对钵苗的基本物理参数进行测量(钵体高度、钵体上边宽、钵体下边宽、茎粗、茎秆高、叶长、叶宽)，在 EDEM 中建立钵苗的元颗粒模型，基质颗粒采用“降雨法”生成使其位置随机分布并将生成后颗粒坐标导入至元颗粒模型中，钵苗模型如图 8 所示。根据文献[21,24－27]，设置钵苗的材料参数、接触模型参数，具体数值见表 1。

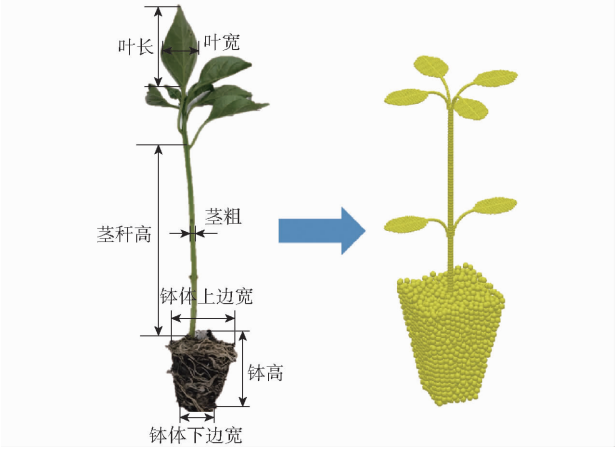


图 8　钵苗离散元模型建立

Fig. 8　Discrete elemental modeling of pot seedling

表 1　EDEM 材料及接触参数设置

Tab. 1　EDEM material and contact parameter settings

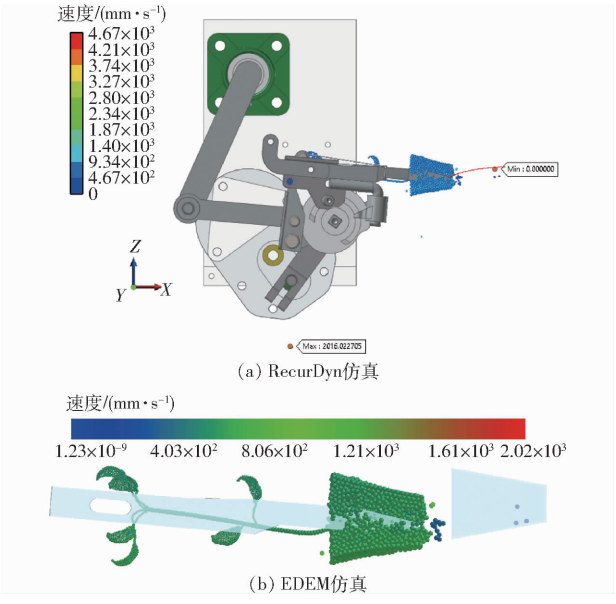
项目	参数	数值
基质	密度/(kg·m^{-3})	1 238
	泊松比	0.489
	剪切模量/Pa	2.21×10^{6}
钢	密度/(kg·m^{-3})	7 850
	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
穴盘	密度/(kg·m^{-3})	1 400
	泊松比	0.38
	剪切模量/Pa	8.66×10^{8}
基质-基质	碰撞恢复系数	0.165
	动摩擦因数	0.265
	静摩擦因数	0.575
	单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2.40×10^{7}
	单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1.70×10^{7}
	法向强度/Pa	2.35×10^{5}
	切向强度/Pa	1.86×10^{5}
	粘结键半径比例	1
	JKR 表面能/(J·m^{-2})	0.35
基质-钢	碰撞恢复系数	0.4
	动摩擦因数	0.4
	静摩擦因数	0.15
基质-穴盘	碰撞恢复系数	0.4
	动摩擦因数	0.02
	静摩擦因数	0.2

4.2　EDEM－RecurDyn 联合仿真

在 RecurDyn 中导入取苗装置模型并设置好 Joint、Force、Contact 与驱动函数后，启动仿真并将取

苗爪在即将插入穴盘的仿真时刻萃取出来，作为取苗仿真的初始状态以节省算力，在 RecurDyn 的动力学仿真模型中选择 External SPI 选项卡中的 Wall 选项将取苗爪创建为 Wall 文件并导出，在 EDEM 中将建立的取苗爪 Wall 文件导入。在 EDEM 中导入 128 孔规格穴盘（540 mm × 280 mm）穴孔模型并在穴孔周围设置圆柱形颗粒工厂将穴孔模型包含在颗粒工厂中，在颗粒工厂中设置钵苗元颗粒生成时的位置和方向，使其生成后落入到穴孔中。

在 EDEM 中开启 Coupling server 选项，并在 Simulator 选项卡中设置仿真类型为 Euler 时间，时间步长设置为 20% 的固定时间步长。在 RecurDyn 中的 External SPI 选项卡下开启 Connect 选项，在 RecurDyn 中进行仿真参数设置，设置取苗装置转速为 60 r/min，设定仿真时间为 0.3 s，仿真时间步长设置为 EDEM 中仿真步长的 2 倍，并开始仿真。仿真过程中取苗爪将作用力施加到 EDEM 中的钵体基质颗粒上，颗粒对取苗爪的反作用力数据返回到 RecurDyn 中，耦合仿真效果如图 9 所示。



(a) RecurDyn仿真

(b) EDEM仿真

图 9 EDEM－RecurDyn 耦合仿真

Fig. 9 EDEM－RecurDyn coupling simulation

4.3 仿真试验结果与分析

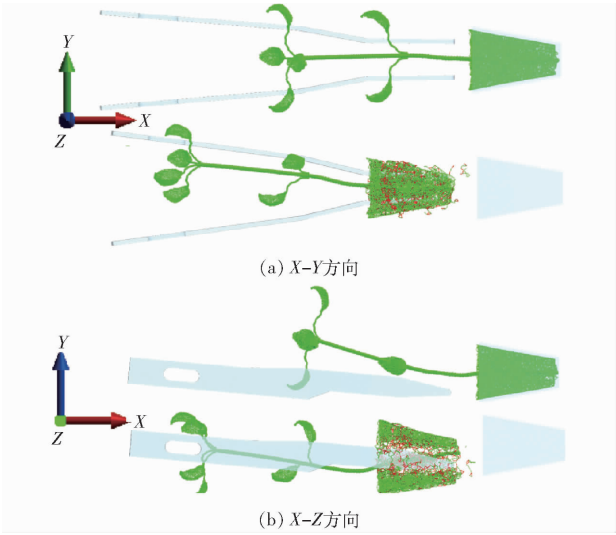
为探求取苗爪作业时的最优结构参数以及最佳取苗姿态，以入钵深度、取苗爪转角、取苗角度（取苗时钵体中轴线与水平线的夹角）为试验因素，以取苗过程中钵体受到的夹持力与钵苗被取出后基质间 Bond 键断裂数量为试验指标进行仿真单因素试验。

单因素试验水平设置如表 2 所示，根据表 2 搭建相应的 EDEM－RecurDyn 仿真模型并进行仿真，仿真试验结果如图 10、11 所示，不同试验因素水平下压缩力与 Bond 键数量变化如图 12 所示。

表 2 单因素仿真试验因素水平

Tab. 2 Level of single-factor simulation test factors

水平	因素		
	入钵深度/mm	取苗爪转角/(°)	取苗角度/(°)
1	20	3	－10
2	30	4	0
3	40	5	－10



(a) X–Y方向

(b) X–Z方向

图 10 取苗前后 Bond 键状态变化

Fig. 10 Bondstatus change before and after seedling picking

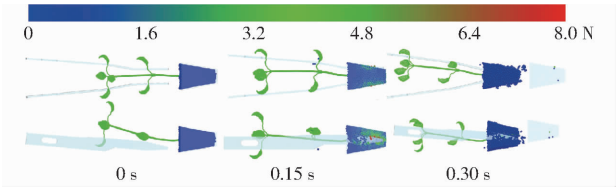


图 11 不同时刻钵体基质受到的压缩力

Fig. 11 Compression force on mantle matrix at different moments

从图 11 中可以看出，从取苗爪开始插入穴孔到夹住钵体到最后退出穴孔的过程中，取苗爪对钵体施加的压缩力均为先增大后减小，在仿真 0.15 s 时即取苗爪插入最深时压缩力达到最大值，根据图 11 可知，在 0.15 s 时压缩力最大的区域在取苗爪的尖端附近，说明对钵体造成的压缩量越大则钵体受到的压缩力越大；从图 12 中可以明显看到，在 0.10 ~ 0.15 s 之间压缩力与 Bond 键断裂数的增速明显下降，通过在 EDEM 后处理中回看仿真动画发现在 0.10 s 时取苗爪插入到最深位置，0.10 ~ 0.15 s 取苗爪不断夹紧直到 0.15 s 取苗爪开始退出穴孔；该段曲线表明穿刺相比压缩对钵体造成的损伤更大。图 12 中 Bond 键数量随着取苗爪的动作不断降低直到钵苗被取出后达到一个稳定值，图 10 展示了不同

方向取苗前后 Bond 键存在情况对比，图中钵体绿色部分表示基质颗粒间的 Bond 键仍在生效，红色部分表示取苗爪对基质颗粒施加的力超过了 Bond 键强度阈值而发生了断裂。通过对比图 12 可以发现，改变入钵深度对压缩力和 Bond 键数量的影响较大，而改变取苗爪转角和取苗角度对压缩力和 Bond 键数量的影响较小，说明取苗爪入钵深度比取苗爪转角与取苗角度对钵体造成损伤的影响更大。

4.3.1　入钵深度对取苗效果的影响

根据图 12a 可知，压缩力峰值随着取苗爪入钵深度的增加而增加，由于调整了取苗爪的安装位置，导致 Bond 键开始产生断裂的时间不同，当仿真稳定后入钵深度 20、30 mm 的压缩力基本相同，40 mm 的稳态压缩力明显高于其他。稳定后的 Bond 键数量随着入钵深度的增加而显著降低，仿真结果表明入钵深度对钵体损伤有较大的影响。

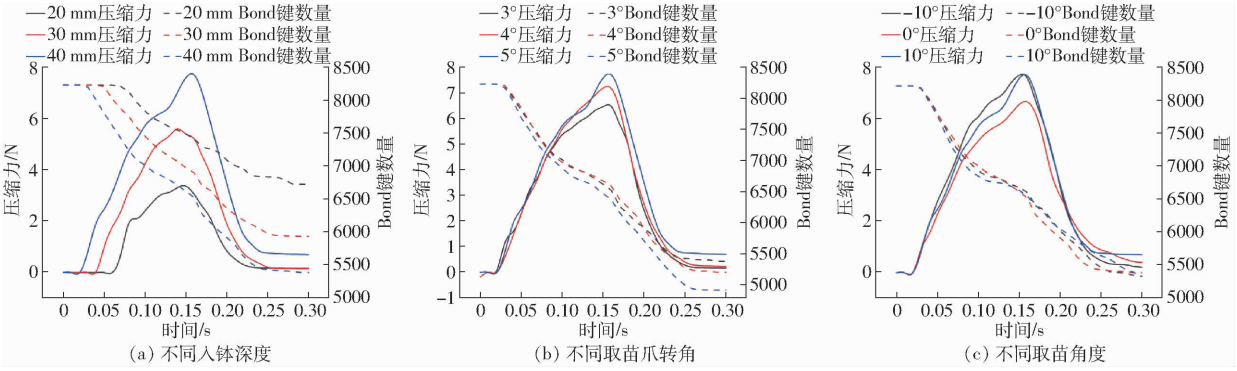


图 12　单因素仿真试验结果

Fig. 12　Results of one-factor simulation test

4.3.2　取苗爪转角对取苗效果的影响

根据图 12b 可知，随着取苗爪转角的增加钵体受到的压缩力峰值也随之增加，Bond 键数量变化曲线趋势基本相同，压缩力稳定值与 Bond 键断裂数量随着取苗爪转角的增加而增加。根据前文分析，穿刺相比压缩对钵体造成的损伤更大，并且因为取苗爪转角的增量较小，导致不同转角的压缩力与 Bond 键数量变化没有不同入钵深度时明显。图 12b 表明取苗爪转角对钵体损伤有较明显的影响。

4.3.3　取苗角度对取苗效果的影响

根据图 12c 可知，在取苗角度为 −10°和 10°时钵体受到的压缩力峰值基本相等，而在 0°取苗时钵体受到的压缩力峰值要低于在 −10°和 10°时，这是因为在入钵深度相同时，取苗爪相对钵体倾斜一个角度后，插入钵体中的取苗爪长度更长，取苗爪与钵体基质的接触面积相比在 −10°和 10°取苗时更大，因此取苗爪对钵体施加的夹持力更大。在 0°取苗时 Bond 键数量基本稳定，而 −10°和 10°仍有下降趋势，仿真最后，0°取苗时 Bond 键数量略高于倾斜取苗时，表明取苗角度对钵体损伤有一定影响。

5　样机取苗试验

5.1　材料与设备

2025 年 4 月，在洛阳市优特威车业有限公司开展样机取苗试验，所研制的取投苗装置如图 13 所示。

试验材料选用洛阳市诚研辣椒研究所培育的苗龄为 25 d 的“中椒 1209”辣椒钵苗，对其基本参数进行测量，试验样品苗高平均值为 115.27 mm，茎粗平均值为 3.12 mm，总质量平均值为 15.35 g，钵体含水率控制在 60%[27]。

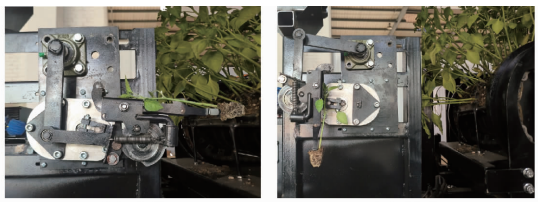


图 13　取投苗装置样机试验

Fig. 13　Prototype test of seedling-picking device

本次试验所采用的试验设备包括绿林电子游标卡尺（量程为 0～150 mm，精度为 0.01 mm）、电子秤（精度为 0.01 g）、含水率测量仪（型号 XC7231B，量程为 0～100%，精度为 ±3% FSD）、剪刀。

5.2　试验方法

本次样机试验选取入钵深度、取苗爪转角、取苗角度为试验因素，以取苗成功率和钵体质量损失率为试验指标，进行三因素三水平正交试验。其中，通过调整取苗装置在机架上的横向位置实现入钵深度的调整；通过调整球头紧定螺钉与凸轮之间的螺纹长度实现取苗爪转角调整；本试验取苗装置配合的送苗装置如图 13b 所示，送苗装置为链式输送，在送苗装置弧形底板上安装有行程开关，当苗盘压动行程开关时触发取苗动作，通过更改行程开关在弧形底板上的安装位置实现取苗角度的调整。试验指标取苗成功率和钵体质量损失率定义如下：

(1)取苗成功率

在取苗试验中,若取苗爪夹紧钵苗离开穴孔时钵体完整度在 60% 以上,则视为本次取苗成功,统计每次试验时的取苗总次数 N 和取苗成功次数 n,取苗成功率 S_r 计算公式为

$$S_r = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{25}$$

(2)钵体质量损失率

对成功取出的钵苗,剪去钵体以上的幼苗部分,并收集残留在穴孔中及掉落的基质,分别对两部分进行现场称量。钵体质量损失率 W 计算公式为

$$W = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \times 100\% \tag{26}$$

式中 M_1——取出的钵体质量,g

M_2——残留在穴孔中及掉落的基质质量,g

基于取苗成功率越高越好以及钵体质量损失率越低越好的原则,在单因素仿真试验结果的基础上确定了正交试验各试验因素的取值范围,为避免在取苗时取苗爪将穴盘捅破,将入钵深度高水平调整为 35 mm;在样机预试验中发现当入钵深度为 20 mm 时取苗成功率较低,将入钵深度低水平调整为 25 mm。试验设计如表 3 所示,采用 $L_9(3^4)$ 正交表,第 4 列作为空白。每组试验取一盘苗,并统计每次试验的取苗成功率和钵体质量损失率。

表 3 正交试验因素编码

Tab. 3 Orthogonal test factors codes

编码	因素		
	入钵深度/mm	取苗爪转角/(°)	取苗角度/(°)
-1	25	3	-10
0	30	4	0
1	35	5	10

5.3 结果与分析

样机取苗试验方案与结果如表 4 所示,表中 A、B、C 表示因素编码值。通过方差分析对各因素影响取苗成功率和钵体质量损失率进行显著性检验,方差分析结果如表 5 所示。

表 4 正交试验方案与结果

Tab. 4 Orthogonal experiment program and results

试验号	因素				取苗成功率/%	钵体质量损失率/%
	A	B	C	D		
1	-1	-1	-1	-1	89.6	2.4
2	-1	0	0	0	92.0	1.3
3	-1	1	1	1	89.5	2.1
4	0	-1	0	1	94.8	3.2
5	0	0	1	-1	95.2	2.4
6	0	1	-1	0	93.0	3.0
7	1	-1	1	0	92.0	3.3
8	1	0	-1	1	93.2	2.6
9	1	1	0	-1	93.0	2.9

表 5 正交试验方差分析

Tab. 5 ANOVA of orthogonal experiment

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
取苗成功率	A	23.9	2	11.95	219.45	0.004 5	**
	B	4.54	2	2.27	41.65	0.023 4	*
	C	2.94	2	1.47	26.96	0.035 8	*
	误差	0.108 9	2	0.054 4			
	总和	31.48	8				
钵体质量损失率	A	1.88	2	0.937 8	120.57	0.008 2	**
	B	1.16	2	0.581 1	74.71	0.013 2	*
	C	0.062 2	2	0.031 1	4	0.2	-
	误差	0.015 6	2	0.007 8			
	总和	3.12	8				

注:** 表示极显著,* 表示显著,- 表示不显著。

正交试验极差分析结果如表 6 所示,分析可知影响取苗成功率与钵体质量损失率的因素主次顺序为:入钵深度、取苗爪转角、取苗角度,取苗成功率的最优水平组合为 $A_2B_2C_2$,钵体质量损失率的最优水平组合为 $A_1B_2C_2$。结合正交试验与仿真试验结果,仿真试验发现随着入钵深度的增加,钵体的损伤程度也随之增加,为尽量减小取苗时钵体的损伤程度,选择 A_1 作为最优水平。因此,取苗装置的最优作业参数组合为:$A_1B_2C_2$,即入钵深度为 25 mm、取苗爪转角为 4°、取苗角度为 0°。

表 6 正交试验结果极差分析

Tab. 6 Range analysis of experiment results

试验指标	分析指标	因素		
		A	B	C
取苗成功率	K_1	271.1	276.4	275.8
	K_2	283.0	280.4	279.8
	K_3	278.2	275.5	276.7
	k_1	90.37	92.13	91.93
	k_2	94.33	93.47	93.27
	k_3	92.73	91.83	92.23
	R	3.96	1.63	1.33
	较优水平	A_2	B_2	C_2
	主次因素	$A > B > C$		
钵体质量损失率	K_1	5.8	8.9	8.0
	K_2	8.6	6.3	7.4
	K_3	8.8	8.0	7.8
	k_1	1.93	2.97	2.67
	k_2	2.87	2.10	2.47
	k_3	2.93	2.67	2.60
	R	1.00	0.87	0.20
	较优水平	A_1	B_2	C_2
	主次因素	$A > B > C$		

由表 5 可知，入钵深度对取苗成功率与钵体质量损失率影响极显著，取苗爪转角对取苗成功率与钵体质量损失率影响显著，取苗角度对取苗成功率影响显著而对钵体质量损失率影响不显著，这与极差分析的主次因素结论一致，和仿真结果基本吻合。

为了验证正交试验的参数优化结果，采用最优参数组合参数（入钵深度为 25 mm、取苗爪转角为 4°、取苗角度为 0°）进行 5 次重复试验并去掉最大和最小值后取平均值作为试验结果，进行验证试验得出：取苗成功率为 93.33%，钵体质量损失率为 1.56%，与正交试验其他结果相比性能较优，表明在该组参数下的取苗装置有较好的作业性能。

6　结论

（1）设计了一种基于Ⅱ型齿轮五杆机构的取苗装置，并开发了Ⅱ型齿轮五杆式取苗装置位姿优化 App 对取苗装置的取苗轨迹与作业位姿进行了优化，结合取苗爪力学分析、取苗几何边界条件对取苗装置末端执行器主要结构参数进行分析，得出入钵深度与取苗爪转角是造成钵体损伤的主要因素。

（2）建立了钵苗离散元模型，基于 EDEM 和 RecurDyn 搭建了仿真模型并以入钵深度、取苗爪转角、取苗角度为因素，以钵体受到的压缩力、钵体间 Bond 键数量为指标进行了仿真单因素试验，仿真结果表明，入钵深度与取苗爪转角对钵体压缩力与钵体 Bond 键数量有显著影响。

（3）搭建了取苗试验平台，结合仿真结果，以入钵深度、取苗爪转角、取苗角度为试验因素，以取苗成功率和钵体质量损失率为指标，采用 $L_9(3^4)$ 正交表对取苗装置进行了样机正交试验，通过极差分析得到影响取苗效果的因素主次顺序为：入钵深度、取苗爪转角、取苗角度，与仿真分析结果一致；得到最优参数组合为：入钵深度 25 mm，取苗爪转角 4°，取苗角度 0°，此时取苗成功率为 93.33%，钵体质量损失率为 1.56%。

参　考　文　献

[1] 刘娜，王彦，赵晨阳，等. 日光温室辣椒机械化移栽可行性研究[J]. 中国农业科技导报，2021，23(2)：96－104.
Liu Na, Wang Yan, Zhao Chenyang, et al. Feasibility study on mechanized transplanting of pepper in sunlight greenhouse[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(2): 96－104. (in Chinese)

[2] 冯世杰，吴明亮，颜波，等. 钵苗移栽机取苗装置研究现状及展望[J]. 农机化研究，2020，42(12)：1－9.
Feng Shijie, Wu Mingliang, Yan Bo, et al. Research status and prospect of seedling pick-up device of pot seedling transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(12): 1－9. (in Chinese)

[3] 黄鸣辉，汤庆，宋哲文，等. 旱地移栽机械取苗机构发展现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(4)：57－64.
Huang Minghui, Tang Qing, Song Zhewen, et al. Development status and trends of the development of seedling pick-up mechanism of transplanter in dry land[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(4): 57－64. (in Chinese)

[4] 陈林涛，牟向伟，彭柱菁. 离散元法在农业工程中的应用[J]. 农业工程，2021，11(8)：29－34.
Chen Lintao, Mou Xiangwei, Peng Zhujing. Application of discrete element method in agricultural engineering[J]. Agricultrual Engineering, 2021, 11(8): 29－34. (in Chinese)

[5] 贺一鸣，吴明亮，向伟，等. 离散元法在农业工程领域的应用进展[J]. 中国农学通报，2017，33(20)：133－137.
He Yiming, Wu Mingliang, Xiang Wei, et al. Application progress of discrete element method in agricultural engineering[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(20): 133－137. (in Chinese)

[6] 李博，陈军，黄玉祥，等. 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, et al. Research progress of discrete element simulation of soil-machine interaction[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 217－222. (in Chinese)

[7] 李磊. 离散元法在农业工程中的研究现状及展望[J]. 中国农机化学报，2015，36(5)：345－348.
Li Lei. Research progress and prospects of DEM in agricultural engineering application[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 345－348. (in Chinese)

[8] 侯加林，张二鹏，张康博，等. 基于 DEM－MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：46－57，87.
Hou Jialin, Zhang Erpeng, Zhang Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM－MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 46－57, 87. (in Chinese)

[9] 赵翔烽，颜华，别琼，等. 基于 EDEM－RecurDyn 的移栽机取苗爪取苗仿真与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊 1)：197－206.
Zhao Xiangfeng, Yan Hua, Bie Qiong, et al. Calibration of seedling pot particle parameters and simulation and experimentation of seedling picking claw based on EDEM－RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 197－206. (in Chinese)

[10] 崔永杰, 卫咏哲, 丁辛亭, 等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 104 - 114, 122.
Cui Yongjie, Wei Yongzhe, Ding Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104 - 114, 122. (in Chinese)

[11] 胡建平, 潘杰, 陈凡, 等. 基于 EDEM - RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 75 - 85, 301.
Hu Jianping, Pan Jie, Chen Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM - RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75 - 85, 301. (in Chinese)

[12] 张学东, 刘立晶, 宁义超, 等. 蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 115 - 124, 134.
Zhang Xuedong, Liu Lijing, Ning Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clampling of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 115 - 124, 134. (in Chinese)

[13] 童俊华, 石虎峰, 武传宇, 等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107 - 116.
Tong Junhua, Shi Hufeng, Wu Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107 - 116. (in Chinese)

[14] 韩豹, 申大帅, 郭畅, 等. 可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 111 - 120.
Han Bao, Shen Dashuai, Guo Chang, et al. Design and experiment of adjustable end-effector of cabbage seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 111 - 120. (in Chinese)

[15] 高国华,王凯,孙晓娜. 嫁接机钢针顶起穴盘苗过程 EDEM 模拟验证及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 29 - 35.
Gao Guohua, Wang Kai, Sun Xiaona. Verification for EDEM simulation of process of jacking tray-seedling by steel needle in grafting machine and parameter optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 29 - 35. (in Chinese)

[16] 王磊. 基于多元函数极值理论的机构多位姿运动综合方法及试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
Wang Lei. Multi-pose motion synthesis method and experiment of mechanism based on multivariate function extreme value theory[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)

[17] 杨林辉. 甘蓝钵苗移栽精准取苗与高效栽插机构的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
Yang Linhui. Study on transplanting precise seedling and high efficiency transplanting mechanism of *Brassica Oleracea* seedlings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[18] 文永双,张俊雄,袁挺,等. 蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 128 - 142.
Wen Yongshuang, Zhang Junxiong, Yuan Ting, et al. Current situation and analysis of automatic pick-up technology for vegetable plug seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 128 - 142. (in Chinese)

[19] 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)

[20] 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)

[21] 袁挺,张宇,尹金亮,等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 116 - 125.
Yuan Ting, Zhang Yu, Yin Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined struture of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 116 - 125. (in Chinese)

[22] 姬江涛,杨林辉,金鑫,等. 行星轮系滑道式钵苗栽植机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 83 - 92.
Ji Jiangtao, Yang Linhui, Jin Xin, et al. Design and parameter optimization of planetary gear-train slip type pot seedling planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 83 - 92. (in Chinese)

[23] 李明勇. 全自动移栽机关键作业质量监测系统的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
Li Mingyong. Research on key operation quality monitoring system of automatic transplanter[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[24] Liu W, Wang Q, Jiang H. Design and optimisation of end effector for loose substrate grasping based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2024, 241: 43 - 55.

[25] Chen T, Yi S, Li Y, et al. Calibration and test of contact parameters for alfalfa stalk at primary florescence based on discrete element method[J]. PLOS One, 2024, 19(8): e0303064.

[26] Du X, Yun Z, Jin X, et al. Design and experiment of automatic adjustable transplanting end-effector based on double-cam[J]. Agriculture, 2023, 13(5): 987.

[27] Zeng F, Cui J, Li X, et al. Establishment of the interaction simulation model between plug seedlings and soil[J]. Agronomy, 2023, 14(1): 4.