doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.021

基于EDEM-RecurDyn的移栽机取苗爪取苗仿真与试验

赵翔烽[1,2] 颜 华[1,3] 别 琼[1,2] 安 海[4] 王英锋[4] 谢关福[5] 王芳莉[6]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 现代农装科技股份有限公司，北京 100083；
3. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083；4. 中科滕森(山东)智能装备有限公司，安丘 262100；
5. 贵州省现代种业集团有限公司，贵阳 550002；6. 贵州省山地农业机械研究所，贵阳 550002)

摘要：为了提高蔬菜移栽机的取苗效果，设计了弹性扎入式取苗爪。通过试验对钵体进行了力学特性测量，选用EDEM中的Hertz-Mindlin with JKR模型，以65 Mn钢材料搭建斜面平台和仿真模型，以滚动距离为响应值对钵体颗粒与材料间的接触参数进行了标定。在RecurDyn软件中完成了取苗爪的动力学建模，以标定试验所获得的接触参数在EDEM中完成了颗粒的离散元建模，通过EDEM-RecurDyn对取苗爪的取苗过程进行联合仿真，研究取苗爪扎深和扎入速度对钵体颗粒的影响，经过分析可得当取苗爪扎深为33 mm、扎入速度为150 mm/s时具有较好的取苗完整性。搭建取苗试验台架，以扎深33 mm和扎入速度150 mm/s开展取苗试验，试验结果与仿真结果一致，取苗成功率均为100%，钵体基质损失率低于5%，具有较好的取苗效果。

关键词：蔬菜移栽机；弹性取苗爪；参数标定；EDEM-RecurDyn；取苗试验

中图分类号：S223.92 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S1-0197-10

Calibration of Seedling Pot Particle Parameters and Simulation and Experimentation of Seedling Picking Claw Based on EDEM-RecurDyn

ZHAO Xiangfeng[1,2] YAN Hua[1,3] BIE Qiong[1,2] AN Hai[4] WANG Yingfeng[4] XIE Guanfu[5] WANG Fangli[6]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.,Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Modern Agricultural Equipment Co.,Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*
4. *Tesun(Shandong) Intelligent Equipment Co.,Ltd.*, *Anqiu* 262100, *China*
5. *Guizhou Advanced Seed Industry Group Co.,Ltd.*, *Guiyang* 550002, *China*
6. *Guizhou Mountain Agricultural Machinery Research Institute*, *Guiyang* 550002, *China*)

Abstract: To improve seedling pickup performance, an elastic penetration-type seedling claw was designed. The mechanical properties of seedling pots were experimentally measured, and the Hertz-Mindlin with JKR model in EDEM, using 65 Mn material, was selected for the simulation. The rolling distance served as the response value to calibrate contact parameters between seedling pot particles and the material. Dynamic modeling of the seedling claw was completed in RecurDyn, and coupled EDEM-RecurDyn simulations were conducted to investigate the effects of penetration depth and speed on seedling pickup. The analysis indicated that a penetration depth of 33 mm and a speed of 150 mm/s resulted in optimal pickup performance. A test bench was then constructed to validate these findings, confirming the simulation results with a 100% success rate in seedling pickup and less than 5% damage to the seedling pot matrix, demonstrating excellent effectiveness.

Key words: vegetbale transplanting machine; flexible seedling picker; calibration of parameters; EDEM-RecurDyn; seedling extraction test

0 引言

辣椒含有多种营养物质，是我国仅次于大白菜的第二大蔬菜作物[1-3]。穴盘育苗移栽技术是先在穴盘中培育幼苗，待生长到适栽苗龄后以人工或机械的方式移栽

收稿日期：2024-11-05 修回日期：2024-12-03

基金项目：山东省重点研发计划项目(2023CXGC010715)、国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)和河南省重大科技支撑计划项目(242N7203Z)

作者简介：赵翔烽(2000—)，男，硕士生，主要从事移栽机械装备研究，E-mail: 2405644071@qq.com

通信作者：颜华(1973—)，女，研究员，主要从事农业机械装备及关键技术研究，E-mail: 939980218@qq.com

到大田或设施内[4-6]。取苗爪是移栽机的关键部件，其结构和工作参数会影响移栽机的作业效果[7-9]。张妮等[10]设计了四指张合式取苗机械手，其采用单作用针形气缸驱动，气缸杆带动与其固连的中间移动块上下平移，中间连杆可以驱动苗爪张合。鲁丁等[11]设计了一种由电机驱动的夹钵式取苗装置，在移栽机工作时，通过精确控制电机，驱动丝杠转动，进而驱动丝杆螺母座上下移动。在连接杆的动作下带着连杆张开闭合，最终实现苗爪的开合。计东等[12]设计的移栽机械手采用两爪针式结构，抓苗时，气缸杆伸出，苗针进入钵体，推杆越低，苗针角度越大，越夹紧钵体，当推杆下降到最低处时，苗针对钵体的夹持力达到最大；CHOI等[13]设计了一种针型夹取式取苗爪，该机构由导向板之间往复运动的柱塞带动取苗爪前后运动，同时带动取苗针张开和关闭。ISLAM等[14]设计了一种扎取角度可调的针式取苗爪，其采用凸轮机构实现苗爪的开合，采用连杆机构实现苗爪的下扎。胡建平等[15]针对整排取苗机构，设计了一种由气缸驱动的边插入钵体苗、边夹紧的指夹式取苗爪，利用气缸带动推苗环支架的直线移动，驱动夹取针转动和推苗环移动，完成夹紧苗钵、释放苗钵动作。

本文利用EDEM软件进行辣椒钵体颗粒与65 Mn钢材料间离散元参数标定和建模[16]，并利用RecurDyn建立弹性插入式取苗爪的刚柔耦合模型。以取苗爪扎深和扎取速度为试验因素，基于EDEM-RecurDyn开展弹性插入式取苗爪联合仿真取苗试验，研究二者对取苗效果的影响，确定最优参数组合，并开展台架试验验证最优参数组合的合理性。

1 取苗爪结构与工作原理

弹性插入式取苗爪结构如图1所示。该取苗爪主要由取苗气缸、气缸安装座、苗爪安装座、取苗爪、限位板、苗爪座、升降气缸和升降气缸连接板组成。其中取苗爪使用65 Mn钢材料，其在承受压力或拉力时，表现出较好的弹性变形能力，能够满足取苗爪要求。苗爪座上固定有取苗气缸安装座和升降气缸安装板。其上分别安装有取苗气缸和升降气缸。取苗气缸通过苗爪安装座与一对取苗爪连接，限位板固定在苗爪座上，取苗爪穿过限位板上的滑槽。

取苗前，取苗气缸缩回，升降气缸伸出，取苗爪完全缩进限位板内并被限位板压迫产生弹性变形后与限位板滑槽平行，取苗爪爪尖刚好位于钵体正上方。工作时，取苗气缸驱动苗爪安装座带动取苗爪向下运动，取苗爪伸出限位板并向内聚拢。取苗爪扎入钵体中，待苗爪伸出完毕后升降气缸驱动取苗爪上行，带动钵体脱离穴盘完成取苗动作。取苗爪取苗过程示意图如图2所示。

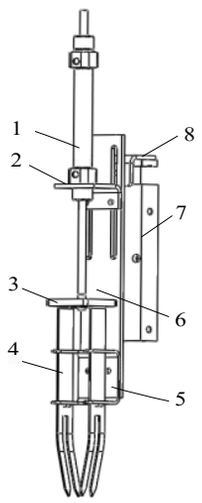


图1 取苗爪结构示意图

Fig1 Structural schematic of seedling claw

1.取苗气缸 2.取苗气缸安装座 3.苗爪安装座 4.取苗爪 5.限位板 6.苗爪座 7.升降气缸 8.升降气缸连接板

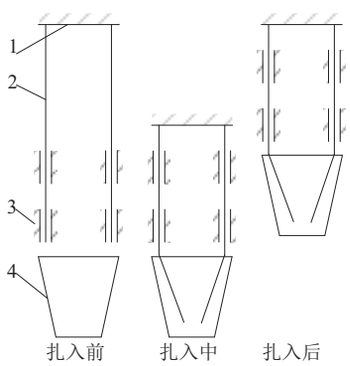


图2 取苗爪取苗过程示意图

Fig.2 Illustration of seedling pickup process by seedling claw

1.取苗气缸安装座 2.苗爪 3.限位板滑槽 4.钵体

2 基于EDEM的离散元仿真参数标定

在进行EDEM仿真前需要进行离散元参数标定[17-18]。试验材料选用辣椒钵苗，测定基质含水率为65%，基质体积配比为泥炭∶珍珠岩∶蛭石为3∶1∶1。参考文献[19-20]可得泥炭基本结构包括块状颗粒、核状颗粒和柱状颗粒；珍珠岩基本结构为球状颗粒；蛭石基本结构为片状颗粒。在EDEM中上述5种颗粒的模型如图3所示。其中泥炭颗粒半径为0.5~1 mm，珍珠岩颗粒半径为0~0.5 mm，蛭石颗粒半径为1~2 mm。

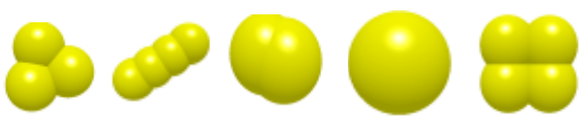


图3 EDEM中5种颗粒模型

Fig.3 Models of five types of particles in EDEM

2.1 接触模型选取

为了准确表示钵体基质颗粒间的接触关系，在EDEM中选用Hertz-Mindlin with JKR模型，其引入了法

向和切向粘性力，能够很好地模拟颗粒间由于粘性而产生的团聚和粘结现象[21-22]。

2.2　钵体本征参数测定

为了建立钵体的离散元模型，需要对钵体本征参数进行测量。辣椒钵体本征参数包括密度、泊松比和弹性模量。选用72穴塑料苗盘培育的辣椒钵体，其单个穴格的上口宽度为38 mm × 38 mm，底宽为20 mm × 20 mm，高42 mm，计算得体积为0.036 m^3。取用20组钵体，使用天平多次测量求平均值得平均质量为15.311 5 g。通过质量体积法可以测得钵体密度为425 kg/m^3。

对于各向同性材料，弹性模量E和泊松比μ为两个基本材料常数，泊松比μ是指材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的比值，其计算公式为

$$\mu = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{|Z_1 - Z_2|}{|L_1 - L_2|} \tag{1}$$

式中　δ_1、δ_2——样本横向和轴向变形量，mm

Z_1、Z_2——样本压缩前和压缩后横向尺寸，mm

L_1、L_2——样本压缩前和压缩后轴向尺寸，mm

弹性模量是反映材料抵抗弹性变形能力的常数，其计算公式为

$$E = \frac{FL}{S\Delta L} \tag{2}$$

式中　F——材料弹性变形阶段所能承受的最大力，N

L——样本初始长度，mm

S——样本横截面积，mm^2

ΔL——样本经压缩前后的长度差，mm

选择如图4的英国SMS公司TA.XT PlusC质构仪测定上述两个参数，压缩头选择平板探头，设置下压速度为1 mm/s，下压位移为15 mm，重复试验10组。利用测得的数据可得如图5所示力-压缩距离曲线，通过计算可得钵体泊松比为0.364，弹性模量为0.044 MPa。

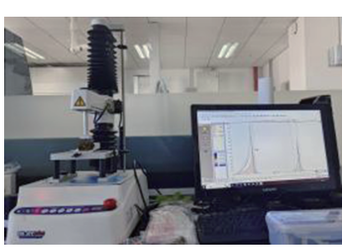


图4　英国SMS公司TA.XT PlusC质构仪

Fig.4　SMS TA.XT PlusC texture analyzer (UK)

2.3　钵体颗粒与苗爪材料接触参数标定

通过查阅文献[23-24]完成钵体颗粒间接触参数的设置，所以只需要对钵体颗粒与苗爪材料的接触参数完成标定。苗爪材料为65Mn钢，其本征参数如表1所示。钵体颗粒与苗爪材料接触参数包括静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复系数，需要开展静摩擦试验和滚动摩擦试验进行标定。

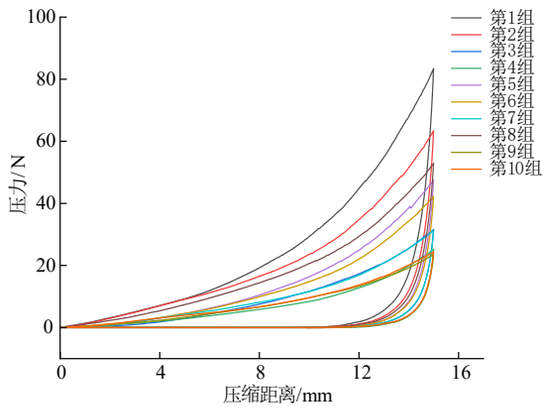


图5　钵体力-压缩距离曲线

Fig.5　Force-compression distance curve of seedling pot

表1　65 Mn钢材料参数

Tab.1　65 Mn steel material parameters

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	7 865
泊松比	0.3
剪切模量/MPa	7.9×10^4

2.3.1　静摩擦试验

钵体对材料的静摩擦因数是钵体与材料间的特有属性，不会因为钵体的形状而发生改变。选择65 Mn钢板搭建如图6所示的试验台，将钵体放置于斜面上，缓慢增大斜面与地面的夹角，待钵体开始滑落时测量此时斜面的倾角。钵体在斜面上的受力平衡分析如图7所示。



图6　静摩擦试验装置

Fig.6　Static friction test apparatus

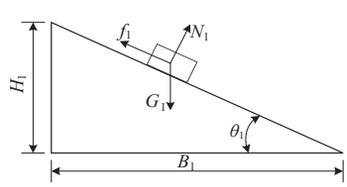


图7　静摩擦试验中钵体在斜面的受力分析

Fig.7　Force analysis of pot body on inclined plane in static friction test

只需要测量钵体开始滑落时斜面的倾角就可以计算得到静摩擦因数。选择3个钵体样本，每个样本做5次重复试验，最后可得静摩擦因数范围为0.3~0.6。

2.3.2　滚动摩擦试验

通过斜面滚动试验可以测定钵体颗粒与65 Mn钢之间的滚动摩擦因数。选择两块宽100 mm的65Mn钢平板搭建成如图8的斜面滚动试验台。用球体模具将钵体颗粒制成直径10 mm的土球，将土球从斜面上同一位

置静止放下，土球向下滚动并在平面上某一点停止。其试验原理如图9所示。



图8 滚动摩擦试验装置

Fig.8 Rolling friction test apparatus

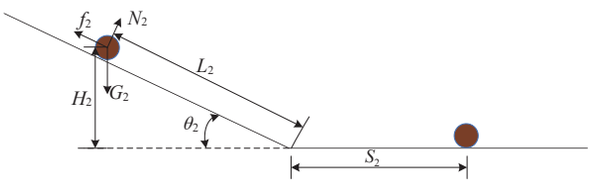


图9 滚动摩擦试验原理图

Fig.9 Principle of rolling friction test

对斜面上的土球进行受力分析，并应用能量守恒定律对滚动前和停止后的土球进行分析，得到方程

$$G_2H_2 = \mu_2 G_2(L_2\cos\theta_2 + S_2) \tag{3}$$

则

$$\mu_2 = \frac{G_2H_2}{G_2(L_2\cos\theta_2 + S_2)} = \frac{H_2}{L_2\cos\theta_2 + S_2} \tag{4}$$

式中 G_2——土球重力，N

H_2——土球在斜面上静止释放的初始高度，mm

μ_2——土球与斜面的动摩擦因数

L_2——土球在斜面上自由滚动的距离，mm

θ_2——斜面与水平面夹角，(°)

S_2——土球在平面上滚动到停止的滚动距离，mm

重复试验10次并测量土球在平面上滚动的最终距离S_2，代入式(4)可得钵体颗粒与65 Mn钢之间的滚动摩擦因数范围为0.12~0.2，土球在平面上滚动的最终距离均值$\bar{s}$ = 267 mm。

2.3.3 离散元仿真参数标定

(1)试验设计

如图10所示，将斜面模型导入EDEM中，并生成直径10 mm的颗粒，颗粒的生成位置与滚动摩擦试验中土球开始自由滚动的位置相同。

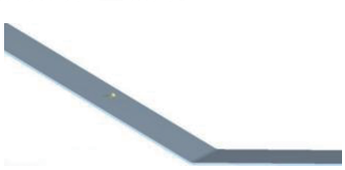


图10 EDEM中的斜面模型

Fig.10 Inclined plane model in EDEM

使用Design-Expert软件中的Box-Behnken法开展四因素三水平的EDEM斜面仿真试验，取颗粒在平面上滚动的距离作为最终检验值。根据静摩擦试验和滚动摩擦试验测定的摩擦因数，查阅文献[25-26]，可以获得JKR表面能和恢复系数范围。设定钵体颗粒与65Mn钢板斜面仿真试验的试验因素编码如表2所示。

表2 斜面仿真试验因素编码表

Tab.2 Inclined plane simulation factors coding

编码	因素			
	JKR表面能x_5/(J·m^{-2})	恢复系数x_6	静摩擦因数x_7	滚动摩擦因数x_8
−1	2.0	0.4	0.30	0.12
0	4.5	0.6	0.45	0.16
1	7.0	0.8	0.60	0.20

(2)数据分析与结论

斜面仿真试验设计与结果如表3所示。

表3 斜面仿真试验结果统计表

Tab.3 Inclined plane simulation test results

序号	因素				滚动距离/mm
	JKR表面能x_5/(J·m^{-2})	恢复系数x_6	静摩擦因数x_7	滚动摩擦因数x_8	
1	4.5	0.6	0.6	0.20	68.16
2	4.5	0.4	0.45	0.12	270.97
3	7.0	0.6	0.45	0.12	270.17
4	4.5	0.6	0.45	0.16	168.24
5	2.0	0.6	0.60	0.16	290.06
6	4.5	0.8	0.60	0.16	180.06
7	4.5	0.4	0.30	0.16	206.16
8	2.0	0.6	0.45	0.12	467.21
9	2.0	0.6	0.30	0.16	283.47
10	4.5	0.6	0.45	0.16	180.11
11	2.0	0.8	0.45	0.16	269.63
12	2.0	0.6	0.45	0.20	205.58
13	7.0	0.6	0.45	0.20	84.73
14	7.0	0.6	0.60	0.16	158.29
15	7.0	0.4	0.45	0.16	139.11
16	4.5	0.8	0.45	0.20	110.21
17	4.5	0.4	0.60	0.16	200.22
18	7.0	0.6	0.30	0.16	149.26
19	2.0	0.4	0.45	0.16	247.96
20	4.5	0.6	0.45	0.16	176.09
21	4.5	0.6	0.60	0.12	324.46
22	7.0	0.8	0.45	0.16	122.45
23	4.5	0.6	0.45	0.16	181.94
24	4.5	0.6	0.30	0.12	296.35
25	4.5	0.6	0.45	0.16	179.58
26	4.5	0.6	0.30	0.20	111.32
27	4.5	0.8	0.30	0.16	186.91
28	4.5	0.4	0.45	0.20	122.47
29	4.5	0.8	0.45	0.12	362.65

利用Design-Expert的分析模块，对表3试验结果进行回归方差分析可得回归模型方程为

$$\begin{aligned} y_2 = {} & 177.19 - 66.99X_5 + 3.75X_6 - 1.02X_7 - \\ & 107.45X_8 - 9.58X_5X_6 + 0.61X_5X_7 + 19.05X_5X_8 - \\ & 0.227\,5X_6X_7 - 25.98X_6X_8 - 17.82X_7X_8 + \\ & 33.73X_5^2 + 0.093\,2X_6^2 + 4.58X_7^2 + 34.53X_8^2 \end{aligned} \tag{5}$$

式中 y_2——滚动距离，mm

X_5~X_8——因素编码值

利用 Design-Expert 中的优化模块，以滚动距离 267 mm 为优化目标对回归模型进行寻优，可得一组最优化解：颗粒与 65Mn 钢之间的 JKR 表面能为 5.58 J/m^2，恢复系数为 0.78，静摩擦因数为 0.52，动摩擦因数为 0.13。

3　基于 EDEM-RecurDyn 的取苗爪取苗仿真

为了优化取苗爪的结构参数，提高取苗效果，对柔性取苗爪的取苗过程开展基于 EDEM 和 RecurDyn 的联合仿真。

3.1　基于 RecurDyn 的取苗爪动力学建模

RecurDyn 刚柔耦合仿真中，刚性体被视为不可变形的物体，而柔性体则可以在外部载荷作用下产生弹性变形。由于取苗爪采用的 65 Mn 钢在受一定力后会发生弹性变形，因此利用 RecurDyn 的刚柔耦合来模拟取苗爪取苗过程的弹性变形。

为了后续仿真，将 72 穴苗盘的单个苗盘穴模型加入到取苗爪装配体中并导入 RecurDyn，根据装配关系完成模型约束，并对驱动添加运动表达式。由于苗爪取苗过程会产生较大的弹性变形，需要对其进行柔性化处理。如图 11 所示，利用软件的 mesh 模块对苗爪进行网格划分，并设置苗爪柔性体的材料为 65Mn，最后完成苗爪与限位板的接触参数设置。取苗爪虚拟样机模型如图 12 所示。



图 11　RecurDyn 中苗爪柔性化网格

Fig.11　Flexible mesh for seedling claw in RecurDyn



图 12　RecurDyn 中苗爪装置虚拟样机

Fig.12　Virtual prototype of seedling claw device in RecurDyn

在软件中进行仿真参数设置，设定仿真时间为 1.7 s，最大时间步为 0.000 1 s，开始仿真。以取苗爪运动表达式“STEP(time, 0, 0, 0.6, 0.06) - STEP(time, 1.1, 0, 1.7, 0.045)”为例，苗爪提升到最高点时示意图如图 13 所示。

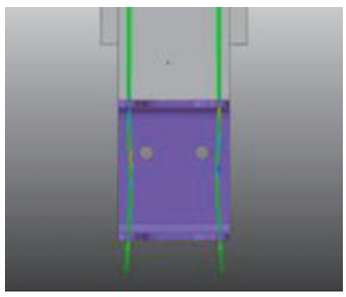


图 13　苗爪在最高点示意图图

Fig.13　Force contour map of seedling claw at the highest point

3.2　EDEM 离散元建模

在 RecurDyn 刚柔耦合的基础上选择 External SPI 选项卡中的 Wall 模块创建 Wall 文件并导出，在 EDEM 中将建立的 Wall 文件导入。查阅文献[23-24]并根据前文的参数标定可得各接触参数和材料参数，如表 4 所示，在 EDEM 中完成各仿真前的设置。在穴盘开口上方建立虚拟面，根据前文的基质颗粒配比和颗粒模型在虚拟面上设置颗粒工厂，生成的颗粒全部置于穴盘中，颗粒生成结果如图 14 所示。

表 4　EDEM 中所需参数

Tab.4　Parameters required in EDEM

项目	参数	数值
钵体颗粒	泊松比	0.364
	密度/(kg·m^{-3})	425
	弹性模量/MPa	0.044
苗爪	泊松比	0.288
	密度/(kg·m^{-3})	7 810
	弹性模量/MPa	2.1×10^{11}
穴盘	泊松比	0.35
	密度/(kg·m^{-3})	1 050
	剪切模量/MPa	1.25×10^3
颗粒-颗粒	JKR 表面能/(J·m^{-2})	9.10
	恢复系数	0.12
	静摩擦因数	0.345
	动摩擦因数	0.65
颗粒-苗爪	JKR 表面能/(J·m^{-2})	5.58
	恢复系数	0.78
	静摩擦因数	0.52
	动摩擦因数	0.31
颗粒-穴孔	JKR 表面能/(J·m^{-2})	1.51
	恢复系数	0.40
	静摩擦因数	0.20
	动摩擦因数	0.02

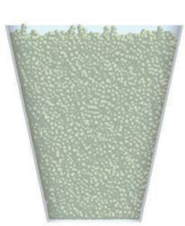


图 14　EDEM 中钵体模型

Fig.14　Seedling pot model in EDEM

3.3 EDEM-RecurDy联合仿真设置

在EDEM中开启coupling server选项，并在simulator选项卡中设置仿真时间类型为Euler时间，时间步长设置为0.000 5 s。因为RecurDyn中的仿真时间步长需为EDEM中时间步长的整数倍，所以在RecurDyn中Dyn/Kin选项卡设置时间步长为0.001 s，仿真时间为1.8 s并开始仿真。仿真过程中取苗爪将作用力施加于EDEM中的颗粒上，而颗粒对取苗爪的反作用力数据将返回到RecurDyn中。

3.4 取苗爪工作参数对取苗效果的影响

对取苗过程进行EDEM和RecurDyn联合仿真，可以查看颗粒的受力、变形和运动情况，其直接反映了取苗过程中钵体的受力和变形情况，这对于分析各参数对取苗效果的影响具有重要意义。在RecurDyn中改变驱动的运动表达式可以改变取苗爪的工作参数，从而研究取苗爪扎深和扎苗速度对取苗效果的影响。

3.4.1 取苗爪扎深对取苗效果的影响

取苗爪扎深决定取苗爪与钵体的受力面积和对钵体的破坏程度。设定取苗爪扎苗速度为100 mm/s保持不变，设定取苗爪扎深分别为31、33、35 mm，通过改变运动表达式可以改变取苗爪的扎深，如表5所示。设置仿真时间为1.8 s并开始仿真。结束仿真后在EDEM中发现都能将钵体取出，因此比较其扎苗过程的颗粒压力和变形量。

表5 不同扎深下取苗爪的运动表达式

Tab.5 Motion expressions of seedling claw under different penetration depths

驱动	扎深/mm	运动表达式
升降气缸	31、33、35	STEP(time, 1.5, 0, 1.8, 0.1)
取苗气缸	31、33、35	STEP(time, 0, 0, 0.2, 0.06)-STEP(time, 0.5, 0, 1.0, 0.05)
钵体	31	STEP(time, 0.2, 0, 0.5, 0.043)
	33	STEP(time, 0.2, 0, 0.5, 0.045)
	35	STEP(time, 0.2, 0, 0.5, 0.047)

分析仿真结果得：如图15所示，当取苗爪扎深为31 mm时，颗粒受压力范围为3.05×10^{-5}~1.94×10^{-2} N，颗粒变形量范围为2.17×10^{-5}~4.32×10^{-1} mm；如图16所示，当取苗爪扎深为33 mm时，颗粒的受力范围为4.42×10^{-6}~1.43×10^{-2} N，颗粒变形量范围为1.55×10^{-4}~4.30×10^{-1} mm；如图17所示，当取苗爪扎深为35 mm时，颗粒的受力范围为1.92×10^{-5}~1.63×10^{-2} N，颗粒变形量范围为2.50×10^{-4}~4.07×10^{-1} mm。随着取苗爪最终扎深的不断增大，钵体颗粒所受到的压力是先减小后增大，钵体颗粒的变形量不断减小。从EDEM中提取取苗爪扎入钵体过程中颗粒所受到的平均压力随时间变化的数据并绘制折线图如图18所示，通过分析可得当苗爪扎入钵体中后，短时间内钵体颗粒所受压力迅速增加，此时苗爪由于回弹聚拢具有较大的弹性变形，钵体颗粒不断受到苗爪聚拢所带来的冲击，钵体所受到的压力较大；在苗爪不断扎入钵体的过程中，钵体颗粒所受到的压力处于相对较大的水平并有一定波动；当苗爪完成弹性变形后，此时苗爪已经完全聚拢，苗爪与钵体颗粒间没有明显相对运动，颗粒所受压力出现趋势较大的下降并趋于平稳；当取苗爪带动钵体逐渐脱离穴盘，钵体颗粒所受到的压力进一步下降后并趋于平稳。通过比较3种扎深取苗过程中的钵体颗粒所受到的最大平均压力，其变化趋势与上述分析相同。因此考虑到钵体颗粒所受压力较小且颗粒变形量较小，优选扎深33 mm。

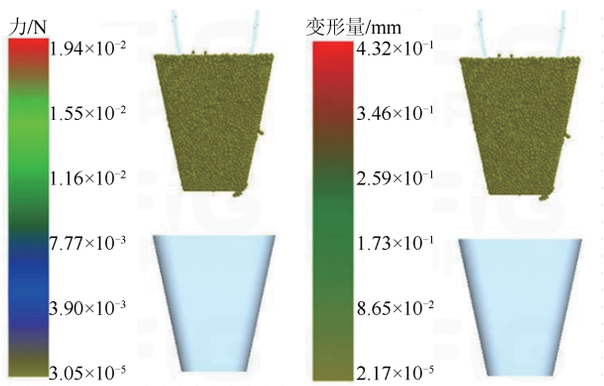


图15 扎深31 mm颗粒受力和变形量

Fig.15 Forces and deformation on particles at 31 mm penetration depth

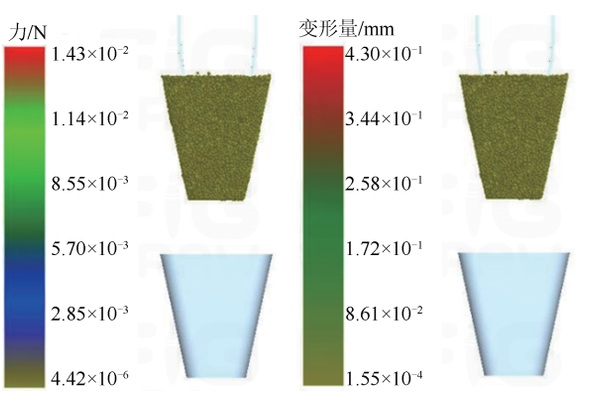


图16 扎深33 mm颗粒受力和变形量

Fig.16 Forces and deformation on particles at 33 mm penetration depth

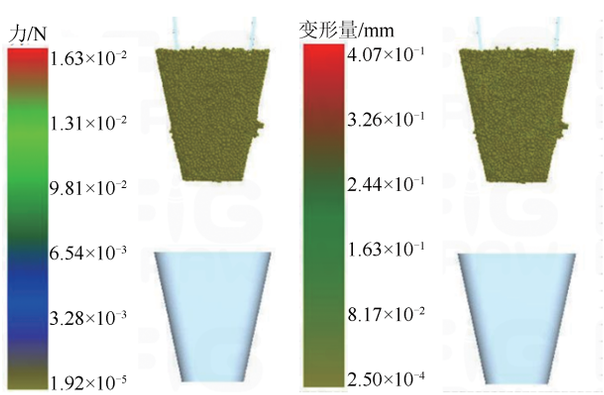


图17 扎深35 mm颗粒受力和变形量

Fig.17 Forces and deformation on particles at 35 mm penetration depth

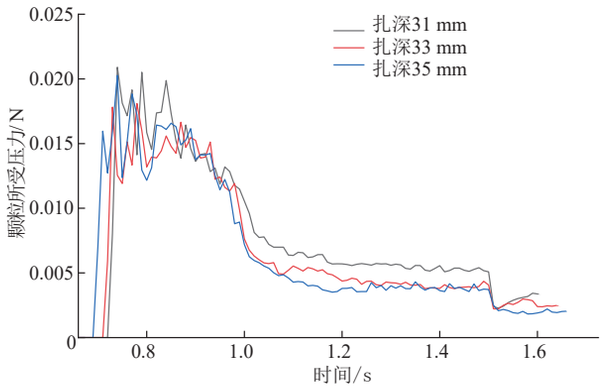


图18　不同扎深下颗粒所受压力-时间变化曲线

Fig.18　Pressure-time curves for particles at different penetration depths

3.4.2　取苗爪扎苗速度对取苗效果的影响

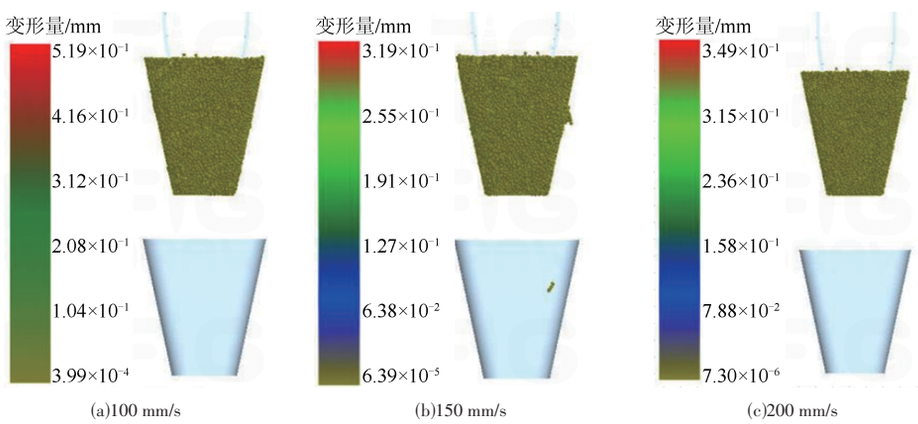
取苗爪扎取速度为从开始扎入钵体到完全扎入过程平均速度。保持取苗爪扎深33 mm不变，选取扎苗速度分别为100、150、200 mm/s，通过改变取苗爪扎入钵体的时间参数可以改变取苗爪扎苗速度。确定各驱动运动关系式如表6所示。设置仿真时间为1.8 s后开始仿真，在EDEM中查看取苗效果、颗粒速度和变形情况。

表6　不同扎苗速度下取苗爪运动表达式

Tab.6　Motion expressions of seedling claw at different seedling penetration speeds

驱动	扎苗速度/(mm·s^{-1})	运动表达式
升降气缸	100、150、200	STEP(time, 1.5, 0, 1.8, 0.1)
钵体	100、150、200	STEP(time, 0.2, 0, 0.5, 0.045)
取苗气缸	100	STEP(time, 0, 0, 0.2, 0.06)-STEP(time, 0.5, 0, 1.0, 0.05)
	150	STEP(time, 0, 0, 0.2, 0.06)-STEP(time, 0.5, 0, 0.83, 0.05)
	200	STEP(time, 0, 0, 0.2, 0.06)-STEP(time, 0.5, 0, 0.75, 0.05)

选取钵体被取出后距离穴盘同一高度的结果进行分析，如图19a所示，当扎苗速度为100 mm/s，颗粒变形量范围为3.99×10^{-4}~5.19×10^{-1} mm；如图19b所示，当扎苗速度为150 mm/s，颗粒变形量范围为6.39×10^{-5}~3.19×10^{-1} mm；如图19c所示，当扎苗速度为200 mm/s，颗粒变形量范围为7.3×10^{-6}~3.94×10^{-1} mm。3种扎苗速度下钵体颗粒的最大变形量呈先下降后上升趋势，当扎苗速度为150 mm/s时，颗粒最大变形量最小。三者总体相差不大，说明扎苗速度对颗粒变形量影响较小。



(a)100 mm/s　(b)150 mm/s　(c)200 mm/s

图19　不同扎苗速度下的颗粒变形量

Fig.19　Particle deformation at different penetration speed

在EDEM中提取出颗粒y方向(即垂直于取苗方向)的速度和对应的颗粒数量，绘制如图20所示不同扎苗速度下颗粒速度-数量分布直方图。选取垂直于取苗方向的颗粒速度数据可以观察由于取苗爪与颗粒碰撞造成的颗粒扰动，它直接影响实际取苗过程中钵体的完整性。比较直方图中各项数据发现，钵体颗粒的速度绝大多数分布于-0.02 mm/s和0 mm/s附近。比较速度为0 mm/s颗粒的数量，扎苗速度为150 mm/s的数量最多，其次是扎苗速度为200 mm/s，数量最少的是100 mm/s。速度为零的数量最多说明由于取苗爪扎苗未造成扰动的颗粒数量最多，实际取苗过程中钵体的完整性较好。比较速度为-0.02 m/s颗粒数量，扎苗速度为100 mm/s数量最多，数量最少的是150 mm/s。若速度为-0.02 m/s颗粒数量较多，说明在该扎苗速度下钵体颗粒受到的扰动最多，在实际取苗过程中可能造成钵体的破碎，从而影响取苗的完整性。

图21为扎苗-静止-提苗过程中不同扎取速度下颗粒y方向上的平均速度随时间的变化曲线，该曲线可以反映钵体颗粒扰动随时间的变化。通过分析可得：在取苗爪扎入钵体初期，由于苗爪具有向下的速度且处于聚拢阶段，对钵体颗粒的碰撞较大，且钵体颗粒需要克服苗爪弹性变形的力也较大，所以所受到的扰动较大且不稳定，因此钵体颗粒具有y方向上的分速度且具有较大的变化，曲线基于平均速度0 mm/s有较大波动。当苗爪逐渐聚拢，钵体颗粒需要克服苗爪弹性变形的力也逐渐变小，钵体颗粒虽也受到扰动，但y方向上的分速度和速度波动均有减少。当苗爪带动钵体脱离穴盘后，钵体颗粒受到苗爪的压力和摩擦力，也会有较小的速度分量和

波动。因此取苗爪扎苗阶段是钵体颗粒受到较大扰动的阶段，钵体有较大的破碎风险，减少扎苗阶段钵体颗粒受到的扰动能有效提高取苗成功率和取苗完整性。

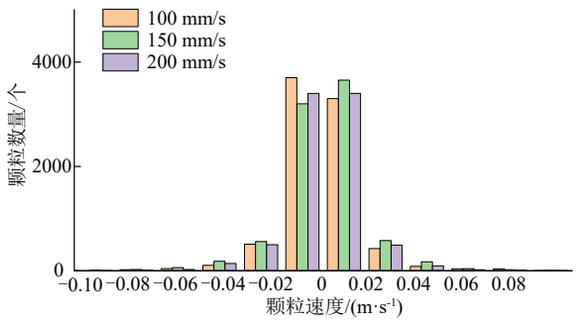


图20 不同扎苗速度下颗粒速度-数量分布直方图

Fig.20 Histogram of particle velocity-quantity at different penetration speeds

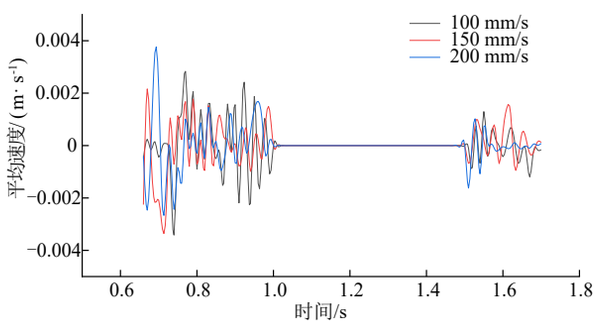


图21 不同扎苗速度下颗粒平均速度-时间曲线

Fig.21 Average particle velocity-time curves at different penetration speeds

结合上述分析，优选扎苗速度为150 mm/s，在此速度下，钵体颗粒未扰动数量最多，且受到较小扰动颗粒数量也最少。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件

为了验证仿真结果的可行性和取苗爪工作性能，于2024年4月在贵州省山地农业机械研究所开展取苗试验。试验用苗为贵州省现代种业集团有限公司的“博陇37-94”穴盘苗和“贵辣17”穴盘苗，如图22所示，育苗情况良好，钵体基质含水率为65%，穴盘规格选用72穴塑料盘。根据设计结果加工取苗爪装置并搭建试验台如图23所示，气源由空压机提供。

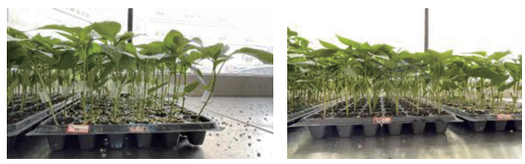
4.2 评价指标

选择取苗成功率和基质破碎率作为取苗性能的评价指标[27-28]。

(1)取苗成功率

开展取苗试验，若苗钵主体能够大部分取出且不主动脱落，则视为取苗成功，统计总取苗次数N_2和取苗成功次数N_1，取苗成功率W_1计算公式为

$$W_1 = \frac{N_1}{N_2} \times 100\% \tag{6}$$



(a)“博陇37-94”苗盘 (b)“贵辣17”苗盘

图22 试验用辣椒苗盘

Fig.22 Pepper seedling tray for tests

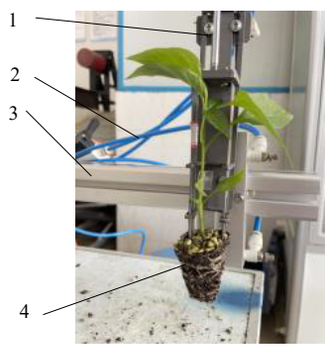


图23 取苗试验台架

Fig.23 Seedling pickup test stand

1.取苗爪 2.气管 3.型材 4.苗钵

(2)基质损失率

在能够成功取苗的情况下，对取出的苗钵剪掉基质以上的枝叶，收集遗留在穴盘中的苗钵基质，将二者分别进行装袋编号密封并测量质量。基质破碎率计算公式为

$$W_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \times 100\% \tag{7}$$

式中 W_2——基质损失率，%

M_1——取出基质质量，g

M_2——遗留在穴盘中基质质量，g

4.3 试验结果及分析

利用取苗爪试验台，设定取苗爪爪尖初始位置位于钵体上方12 mm，苗爪纵向位移45 mm，可以保证扎苗深度为33 mm。用摄影机拍摄取苗爪一次扎苗过程可得到一次扎苗的时间，经过计算可得取苗爪扎苗速度，逐步调节节流阀进气量可改变扎苗速度至150 mm/s。保持上述条件不变，两种辣椒品种都分别取100株。统计取苗成功率，发现两种辣椒苗的取苗成功率均为100%。随机选取20株测量并计算基质损失率，结果如表7和表8所示。

分析表7和表8可知：以扎深33 mm、扎苗速度150 mm/s的取苗爪试验中，“博陇37-94”基质平均损失率为4.51%，“贵辣17”基质平均损失率为1.99%，均符合要求。

表7 “博陇37-94”取苗基质损失率

Tab.7 “Bolong 37-94” seedling pickup damage statistics

序号	取出基质质量/g	遗留基质质量/g	基质总质量/g	损失率/%
1	8.83	0.56	9.39	5.96
2	9.61	0.32	9.93	3.22
3	10.23	0.42	11.25	3.73
4	10.01	0.26	11.27	2.31
5	16.16	0.86	17.02	5.05
6	15.76	1.43	17.19	8.32
7	15.46	0.83	17.31	4.79
8	14.61	0.49	16.10	3.04
9	9.56	0.31	10.87	2.85
10	11.89	0.59	12.48	4.73
11	9.96	0.29	11.01	2.63
12	15.42	1.19	16.61	7.16
13	16.31	0.69	18.00	3.83
14	14.11	0.52	15.63	3.33
15	12.93	0.73	13.66	5.34
16	13.60	0.47	14.86	3.16
17	14.20	1.06	15.26	6.95
18	9.75	0.63	10.38	6.07
19	10.22	0.41	11.05	3.71
20	12.20	0.51	12.91	3.95

表8 “贵辣17”取苗基质损失率统计

Tab.8 “Guila 17” seedling pickup damage statistics

序号	取出基质质量/g	遗留基质质量/g	基质总质量/g	损失率/%
1	10.67	0.28	10.95	2.56
2	10.18	0.35	10.53	3.32
3	11.24	0.39	11.93	3.27
4	12.37	0.16	13.19	1.21
5	14.21	0.21	14.82	1.42
6	10.91	0.51	11.89	4.29
7	12.79	0.24	13.03	1.84
8	16.46	0.45	16.95	2.65
9	14.73	0.16	15.76	1.02
10	15.87	0.27	17.14	1.58
11	16.90	0.34	18.26	1.86
12	18.91	0.51	20.44	2.50
13	18.31	0.41	19.51	2.10
14	18.38	0.25	20.07	1.25
15	15.66	0.39	16.91	2.31
16	17.30	0.26	18.36	1.42
17	16.01	0.23	17.24	1.33
18	17.25	0.27	18.21	1.48
19	15.04	0.08	16.08	0.50
20	14.19	0.28	15.17	1.85

5　结论

（1）针对移栽机取苗工作要求设计了一种基于65Mn钢弹性取苗爪，并对其结构、工作原理进行了分析。

（2）针对一定含水率的辣椒苗钵，测定了苗钵本征参数，并基于EDEM离散元软件，采用Box-Behnken方法开展了钵体颗粒与材料间的接触参数标定，为后续联合仿真提供数据。

（3）根据柔性取苗爪的连接和运动关系在RecurDyn中建立了刚柔耦合动力学模型，根据参数标定结果在EDEM中建立了钵体颗粒模型，为了研究取苗爪工作参数对取苗效果的影响，开展了基于EDEM和RecurDyn的取苗爪取苗过程联合仿真。仿真试验结果表明，取苗爪扎深会影响钵体颗粒所受到的压力和颗粒的变形，扎苗速度会影响钵体颗粒所受到的扰动。分析优选出取苗爪工作参数为扎深33 mm和扎苗速度150 mm/s。

（4）选取“博陇37-94”苗和“贵辣17”两种辣椒苗，以扎深33 mm和扎苗速度150 mm/s开展取苗验证台架试验，统计了取苗成功率和破损率。试验表明，所设计的取苗爪在该工作条件下对“博陇37-94”苗取苗成功率为100%，平均损失率为4.51%；对“贵辣17”苗取苗成功率为100%，平均损失率为1.99%。该取苗爪具有良好的取苗效果，可以较好地保证钵体完整性。

参　考　文　献

[1] 吴越莉，梁燕平，李曼，等. 曲沃露地辣椒栽培技术[J]. 上海蔬菜，2024(3)：48－50.

[2] 胡双燕，胡敏娟，王佳. 辣椒穴盘苗机械化移栽研究进展[J]. 中国农机化学报，2021，42(8)：24－31.
HU Shuangyan，HU Minjuan，WANG Jia.Research progress on mechanized transplanting of pepper plug seedlings[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(8)：24－31.(in Chinese)

[3] 王怡雯，曹斌. 推进辣椒产业高质量发展的经验、问题和建议[J]. 蔬菜，2024(7)：11－17.

[4] IQBAL M Z，ISLAM M N，ALI M，et al. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2021，35(6)：2605－2614.

[5] 崔志超，管春松，徐陶，等. 基质块育苗移栽技术与装备发展现状[J]. 中国农机化学报，2022，43(5)：29－34.
CUI Zhichao，GUAN Chunsong，XU Tao，et al. Development status of technology and equipment of substrate block seedling cultivation and transplanting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，43(5)：29－34.(in Chinese)

[6] 何亚凯，颜华，崔巍，等. 蔬菜自动移栽技术研究现状与分析[J]. 农业工程，2018，8(3)：1－7.
HE Yakai，YAN Hua，CUI Wei，et al. Research situation and analysis on automatic transplanting technology for vegetable seedling[J]. Agricultural Engineering，2018，8(3)：1－7.(in Chinese)

[7] HABINEZA E，REZA M N，EMMANVEL B，et al. Pepper transplanting mechanisms and kinematic simulation analysis：a review[J]. Precision Agriculture，2024，6(1)：18.

[8] 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)

[9] 邱硕，于博，计东，等. 辣椒苗夹茎式双排自动取投苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(3)：115－121，152.

QIU Shuo, YU Bo, JI Dong, et al. Design and experiment of double row stem clipping type automatic picking and throwing device for pepper seedlings[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 115 - 121, 152.(in Chinese)

[10] 张妮,张国忠,付建伟,等. 顶钵-夹茎组合式取苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(3):50 - 61.
ZHANG Ni, ZHANG Guozhong, FU Jianwei, et al. Design and experiment of the seedling pick-up device with ejecting pot-clamping stem combination[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 50 - 61.(in Chinese)

[11] 鲁丁,王卫兵,韩帅. 移栽机取苗机构设计及参数优化[J]. 机械设计与制造,2024(5):290 - 295.
LU Ding, WANG Weibing, HAN Shuai, Design and parameter optimization of transplanter seedling picking mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(5): 290 - 295.(in Chinese)

[12] 计东,胡熙,哲旋瑞,等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):126 - 133,146.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126 - 133, 146.(in Chinese)

[13] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13 - 19.

[14] ISLAM M N, IQBAL M Z, ALI M, et al. Kinematic analysis of a clamp-type picking device for an automatic pepper transplanter[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 627.

[15] 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)

[16] LI Yudao, XING Shulun, LI Shasha, et al. Seeding perfbrmance simulations and experiments for a spoon-wheel type precision cottonseed-metering device based on EDEM[J]. Mechanical Engineering Science, 2020, 2(1): 2615 - 2875.

[17] 王国强,郝万军. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

[18] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真——离散元素法的工业应用与EDEM软件简介[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.

[19] 陈英才. 水产养殖用精准投饵系统关键技术研究[D]. 上海:上海海洋大学,2018.
CHEN Yingcai. Research on the key technology of accurate feeding system for aquaculture[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.(in Chinese)

[20] 汪昌固. 网箱智能投喂系统开发及关键技术研究[D]. 太原:太原科技大学,2014.
WANG Changgu. Development of intelligent feeding system and key technologies for nets[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[21] 宋占华,李浩,闫银发,等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(6):21 - 33.
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21 - 33.(in Chinese)

[22] 卢琦,刘芳建,刘立晶,等. 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证[J]. 农业机械学报,2023,54(10):46 - 57.
LU Qi, LIU Fangjian, LIU Lijing, et al. Establishment and verification of discrete element model for seed furrow soil-seed-covering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 46 - 57.(in Chinese)

[23] 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)

[24] 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.
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.(in Chinese)

[25] 向伟,吴明亮,吕江南,等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(12):116 - 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 - 123.(in Chinese)

[26] 冯超. 基于黄黏土的辣椒鸭嘴式栽植器减粘脱附研究[D]. 贵阳:贵州大学,2022.
FENG Chao. Study on reducing adhesinn and desorption of pepper plantation Iiased on yellow clay [D]. Guiyang: Guizhou Universit, 2022.(in Chinese)

[27] 郭林强. 穴盘苗全自动移栽机气动取苗装置的设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2016.
GUO Linqiang. Design and test on the pneumatic taking seedling mechanism of auto-transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.(in Chinese)

[28] 王秀,刘蒙滋,翟长远,等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):122 - 132.
WANG Xiu, LIU Mengzi, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 122 - 132.(in Chinese)