

基于 EDEM - RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验

胡建平¹ 潘杰² 陈凡^{2,3} 岳仁才¹ 姚梦娇¹ 李静¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 华中科技大学无锡研究院, 无锡 214174; 3. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了实现自动移栽机高效、高质量取苗, 提出整排取苗、同时投苗的工作方式。以指夹式取苗爪为研究对象, 阐述了取苗爪的结构组成及工作原理。建立了取苗爪的运动数学模型, 结合钵体力学特性及根系分布特点, 对组成取苗爪的各构件进行尺寸参数优选, 并在 RecurDyn 中建立其虚拟样机模型。通过试验进行钵体力学性能测量, 对试验所得数据进行处理, 得出钵体物理特性参数, 进而在 EDEM 中建立钵体颗粒模型。通过 EDEM - RecurDyn 耦合仿真取苗爪插入、夹取、提离过程。分析取苗爪插入钵体苗深度、开始夹苗深度对取苗时钵体的影响, 仿真优化得到当取苗爪插入钵体深度 $I_d = 34\text{ mm}$, 插入钵体平均速度 $I_v = 280\text{ mm/s}$, 开始夹苗深度 $C_i = 4\text{ mm}$, 夹苗平均速度 $C_v = 250\text{ mm/s}$ 时, 可以获得较好的钵体完整性。在 16、20、24 次/min 的取苗速率下进行取苗爪取投苗试验, 结果表明, 所设计的指夹式取苗爪取苗成功率均在 96% 以上, 钵体破碎率小于 1%, 具有良好的取苗、投苗效果, 在取苗作业中可以保持良好的钵体完整性。

关键词: 自动移栽机; 取苗爪; RecurDyn; EDEM; 联合仿真; 参数优化

中图分类号: S223

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)05-0075-11

OSID:



Simulation Optimization and Experiment of Finger-clamping Seedling Picking Claw Based on EDEM - RecurDyn

HU Jianping¹ PAN Jie² CHEN Fan^{2,3} YUE Rencai¹ YAO Mengjiao¹ LI Jing¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi 214174, China

3. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to achieve efficient and high-quality seedling picking by the automatic transplanter, one working method of picking seedlings in a row and throwing them at the same time was proposed. Taking the finger-clamping seedling picking claw as the research object, the structure and working principle of seedling picking claw were expounded. A mathematical model of the seeding picking claw movement was established, combined with the mechanical characteristics of the pot and the root distribution characteristics, the size parameters of the various structural parts that made up the claws were optimized, and the virtual prototype model was established in RecurDyn. The mechanical properties of the bowl were tested through experiments, the data obtained from the experiment were processed, and the physical characteristic parameters of the particles were obtained, and then the bowl particle model was established in EDEM. Through EDEM - RecurDyn coupling to simulate the process of inserting, clamping and lifting the seedling picking claws. The influence of claws insertion depth and initial clamping depth on the effect of bowl while picking was analyzed. Simulation optimization showed that when the insertion depth of the seedling claw $I_d = 34\text{ mm}$, the average insertion velocity $I_v = 280\text{ mm/s}$, the initial clamping depth $C_i = 4\text{ mm}$, and the average clamping velocity $C_v = 250\text{ mm/s}$, a better pot body integrity can be obtained. At 16 times/min, 20 times/min, 24 times/min, the claw picking test was carried out. The test showed that the finger-clamp claw picking success rate was above 96%, the pot body fragmentation rate was less than 1%, which had a good effect of picking and putting seedlings, which can maintain a good pot body integrity during seedling picking operations.

Key words: automatic transplanter; seeding picking claw; RecurDyn; EDEM; co-simulation; parameter optimization

收稿日期: 2021 - 06 - 04 修回日期: 2021 - 09 - 10

基金项目: 江苏省现代农业装备与技术示范推广项目 (NJ2021 - 08) 和国家重点研发计划项目 (2018YFB1308703)

作者简介: 胡建平 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: hujp@ujs.edu.cn

0 引言

取苗爪是自动移栽机的关键部件,其结构和参数是影响取苗效果的主要因素^[1-2]。韩国的 CHOI 等^[3]设计了一种夹取针式取苗爪,该机构由连接到导向板的两个夹取针和在导向板之间往复运动的柱塞组成。当柱塞向前移动时,带动导向板绕轴转动,使得夹取针被打开,当柱塞向后移动时使得夹取针关闭。并且为了从插针完全移除幼苗,夹取针周围的推环连接到柱塞,使得当柱塞向前移动时,推环将幼苗从夹取针中推出。童俊华等^[4]设计了一种由气缸驱动的四针插拔式取苗爪,通过气缸驱动 4 个对称倾斜的指针在对应的针管内滑动,指针向下伸出时以一定角度插入并夹紧钵,指针向上收缩时推出钵体。基于 Visual Basic 编写可视化程序,并根据穴盘规格和钵体根系纵向分布情况,确定指针尖点的轨迹要求,优化了末端执行器的关键结构尺寸。但未结合钵体力学性能对取苗爪进行设计及研究。徐静云^[5]设计了一种由气缸驱动的边插入钵体苗、边夹紧的两指四针夹取式取苗爪,通过气缸带动推苗环的直线移动,实现夹紧钵体苗、释放钵体苗的动作。并综合考虑取苗爪的结构特点、穴盘苗的根系空间分布特点、钵体苗拉拔力与钵体夹持变形量的关系,对取苗爪的结构参数进行优化。但该取苗爪的设计基于整排间隔取苗的取苗方式,效率较低,且取苗爪在取苗时对茎叶较高的钵体苗损伤较大。

针对整排取苗的作业方式,本文在前期研究基础上,以指夹式取苗爪为研究对象,建立取苗爪的运动数学模型。结合穴盘苗钵体物理特性和根系分布特点,对组成取苗爪的各结构组件进行尺寸参数优选^[6-7]。自动移栽机取苗爪夹取苗动作复杂,作用对象钵体由颗粒组成,容易变形与破碎,单一的离散元仿真或多体动力学仿真难以准确描述取苗爪和苗钵颗粒之间的作用关系。因此本文在 RecurDyn 中建立虚拟样机模型,通过试验进行钵体力学性能测量,对试验所得数据进行处理,得出颗粒物理特性参数,并在 EDEM 中建立钵体颗粒模型^[8-10]。通过 EDEM-RecurDyn 耦合仿真取苗爪插入、夹取、提离的过程,分析取苗爪插入钵体苗深度、开始夹苗深度在取苗时对钵体的影响,并优化出取苗爪最佳的插入夹取苗动作时序配合,为实际取苗作业提高取苗成功率和取苗质量提供理论基础。

1 指夹式取苗爪结构与工作原理

取苗爪的主要功能是当放置在输送机构上的穴盘中的一排苗到达取苗点,即一排苗位于取苗爪下

方时,取苗机构带动取苗爪垂直插入并夹紧穴盘中的钵体苗,将钵体苗从穴盘中提取出,再将钵体苗平稳运送至投苗点,将钵体苗投至分苗机构或者栽植器中。整个取苗过程包括夹苗、带苗、投苗等环节,要求取苗爪能准确地取出钵体苗,不能损坏、夹碎钵体,在带苗移动至下一环节的过程中有足够的夹持力保证不掉苗,在投苗过程中保证钵体苗与取苗爪完全脱离并垂直投入分苗机构或者栽植器中^[11]。

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。如图 1 所示,主要由气缸、安装板、夹取针摆杆、夹取针、气缸推杆、推苗环支架、推苗环等组成,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的移动,达到夹紧苗钵、释放苗钵的动作,保证夹取力的同时,减小对钵体苗的损伤。

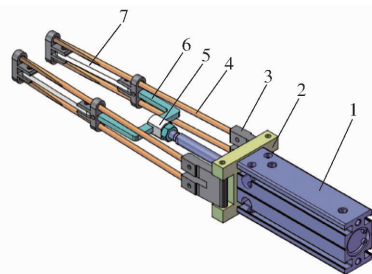


图 1 指夹式取苗爪结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of finger-clamping picking mechanism

1. 气缸 2. 安装板 3. 夹取针摆杆 4. 夹取针 5. 气缸推杆
6. 推苗环支架 7. 推苗环

指夹式取苗爪工作过程如图 2 所示,取苗爪位于穴盘苗上方时,气缸推杆处于伸出状态。取苗爪在可以实现纵向移动的取苗机构的作用下插入并夹紧钵体,当取苗爪完全插入并夹紧钵体,取苗爪短暂停留。接着取苗爪在取苗机构的作用下取出苗钵至穴盘上方,并带苗钵移动到投苗点,取苗爪气缸推杆伸出,通过气缸推杆带动推苗环支架向下移动,夹取针摆杆随着推苗环支架一起向下移动,并向外转动夹取针,达到张开松苗的目的,同时,推苗环一起向下移动,将钵体苗从夹取针上推落。在一个运动周期内完成夹苗、带苗、投苗动作^[5]。

2 指夹式取苗爪虚拟样机模型

2.1 运动数学模型

根据指夹式取苗爪的组成及工作原理,建立其机构运动数学模型。如图 3 所示,图中 L_1 为两夹取针安装板转动中心之间的距离, L_2 为两个夹取针摆杆之间的距离, L_3 为夹取针的长度, L_4 为夹取针完全张开时夹取针针尖到夹取针摆杆的距离, L'_4 为夹取针完全夹紧时夹取针针尖到夹取针摆杆的距离, L_5

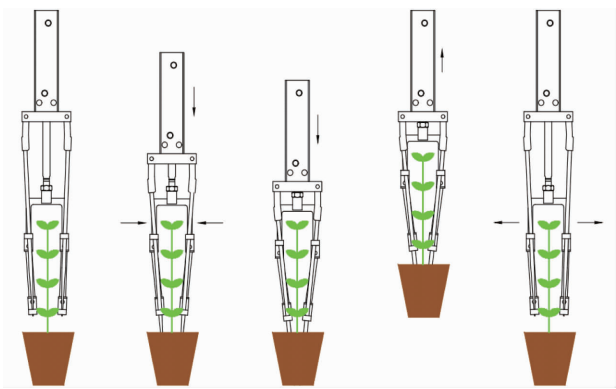


图 2 指夹式取苗爪工作过程

Fig. 2 Finger-clamping picking mechanism working process

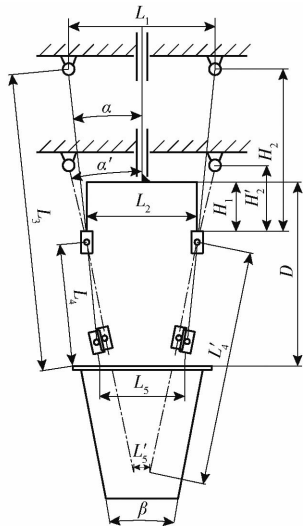


图 3 指夹式取苗爪机构运动数学模型

Fig. 3 Motion mathematical model of finger-clamping picking mechanism

为夹取针完全张开时夹取针两端点间的距离, L'_5 为夹取针完全夹紧时夹取针两端点间的距离, H_1 为推苗环支架高度, H_2 为夹取针完全张开时夹取针安装板转动中心与夹取针摆杆上端的垂直距离, H'_2 为夹取针夹紧时夹取针安装板转动中心与推苗环上端的垂直距离, α 为夹取针张开最大时与竖直方向的夹角, α' 为夹取针夹紧时与竖直方向的夹角, β 为穴盘两侧面之间的夹角。

各运动件之间的几何关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} 2(L_3 - L_4) \sin \alpha + L_2 = L_1 \\ 2(L_3 - L'_4) \sin \alpha' + L_2 = L_1 \\ L'_4 \cos \alpha' = L_4 \cos \alpha + H_2 - H'_2 \\ \tan \alpha = \frac{L_1 - L_2}{2H_2} \\ \tan \alpha' = \frac{L_1 - L_2}{2H'_2} \\ D = L_3 \cos \alpha - H_2 + H_1 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 D ——推苗环支架与穴盘上表面的距离, mm
设穴孔的上边长为 a_1 , 下边长为 b_1 , 为实现整

排无间隔取苗, 两夹取针安装板外侧距离应小于 a_1 , 但随着两夹取针安装板外侧距离变小, L_5 变小。由于种子发芽点的不确定性, L_5 应尽可能大来避免夹取针插入钵体时损伤到未长在穴孔中心位置的根系。除去夹取针安装板自身厚度, 结合穴孔尺寸, L_1 取 34 mm。

根据课题组已有的对穴盘苗根系在钵体中垂直方向和水平方向上的分布规律的研究, 对其根系易断裂区域汇总^[5], 如图 4 所示, 以 72 孔穴盘苗为例, 将钵体在垂直方向分成 5 等份, 从顶部向下, 分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 , 每个分层的高度为 9 mm; 将模型在水平方向分成 6 等份, 从左到右依次为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 , 长度均为 7 mm。其中, 在水平方向上根体积和根密度较低的为 B_2 、 B_5 , 在垂直方向上根体积和根密度最低的为 A_3 , 其次为 A_2 、 A_4 , 取苗爪工作时, 夹取针轨迹应尽可能从 B_2A_3 、 B_5A_3 、 B_2A_2 、 B_2A_4 、 B_5A_2 、 B_5A_4 区域经过, 减少对钵体根系的损伤, 提高取苗效果。因此, 夹紧钵体时, L'_5 的取值范围为 14 ~ 28 mm, 取苗爪插入深度范围为 28 ~ 35 mm。72 孔穴孔两壁面的夹角为 25° 左右, 夹取钵体时, 夹取的初始角不应大于穴孔壁面的夹角。根据课题组对苗钵进行的夹取试验及破损检测, 在夹针直径为 2.5 mm, 夹取角为 11° 时, 钵体破碎率最小^[5]。

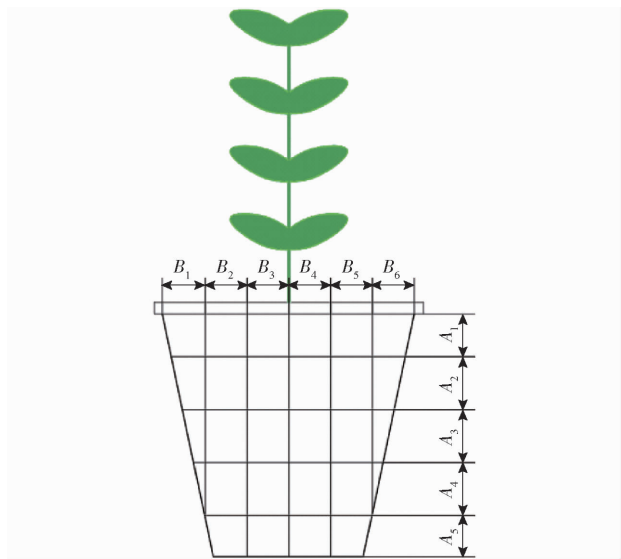


图 4 钵体分割示意图

Fig. 4 Diagram of carcass segmentation

夹取针施加于钵体的夹持力在能夹持钵体脱离穴盘的基础上, 尽量减少对钵体及根系的损伤。根据课题组先前的取苗拉拔试验, 最大拉拔力为 2.443 N, 因此取苗爪对苗钵的拉拔作用力应大于 2.443 N, 穴盘苗拉拔力 F 与钵体夹持变形量的关系为^[5, 12]

$$F = 2F_1A_1(\mu \cos \alpha' + \sin \alpha')/A_2 \quad (2)$$

$$F_1 = 0.06502x^3 - 0.6742x^2 + 3.602x - 0.7548$$

$$(3)$$

式中 F_1 ——钵体抗压力,N
 A_1 ——夹取针夹持钵体的面积,mm²
 μ ——夹取针与钵体的摩擦因数
 A_2 ——钵体抗压面积,mm²
 x ——钵体夹持变形量,mm

取苗爪采用两指四针结构,夹持钵体面积 A_1 与夹取针插入钵体的深度 I_d 有关,取夹取针插入深度 I_d 为 27、28、29、30、31、32、33、34、35、36 mm,对应的 A_1 分别为 135、140、145、150、155、160、165、170、175、180 mm²。静摩擦因数取 0.52^[5],钵体抗压面积 A_2 取钵体最大值,为 1 260 mm²。利用式(2)和式(3)按最大拉拔力 $F=2.443$ N 计算,得到不同插入深度 I_d 下的夹持抗压力 F_1 及相对应的夹持变形量 x ,如表 1 所示。

表 1 不同插入深度时夹持抗压力及夹持变形量
Tab.1 Correspondence between insertion depth and clamping resistance and deformation

插入深度 I_d /mm	夹持抗压力 F_1 /N	夹持变形量 x /mm
27	26.12	9.222
28	25.18	9.099
29	24.31	8.980
30	23.51	8.868
31	22.74	8.756
32	22.03	8.647
33	21.37	8.546
34	20.74	8.444
35	20.15	8.347
36	19.59	8.251

根据课题组已有的关于苗钵力学特性试验数据和结论,在取苗爪针不同的插入深度下,穴盘苗钵体夹持变形量 x 范围为 8.251~9.222 mm^[5],因此要求夹取时钵体的最大变形量 $x_{\max}$ 大于对应深度下的夹持变形量 x 。在设计的取苗爪机构中,由于夹取针是边插入边夹紧的工作形式,其取苗爪针针尖在钵体中的轨迹可近似为图 5 中的红色直线。以推苗环中心连线为 x 轴,向右为正,以推苗环连线中点为坐标原点,垂直推苗环方向为 y 轴,向下为正建立坐标系。根据根系在钵体中的分布规律和钵体力学特性试验的结论,取苗爪夹取苗钵时夹取针针尖位置 x_{A1} 、 x_{A2} 和变形量 Δx 约束方程为

$$\begin{cases} -14 < x_{A1} = \frac{L_2}{2} - (L_3 \cos \alpha' - H'_1 - h) \tan \alpha < -7 \\ 7 < x_{A2} = \frac{L_2}{2} - (L_3 \cos \alpha' - H'_1) \tan \alpha' < 14 \\ \Delta x = \frac{L_1 - 2L_3 \cos \alpha - (L_1 - 2L_3 \cos \alpha')}{2} > x \end{cases}$$

(4)

根据式(1)、(4),代入已知参数 L_1 及 α ,对线性

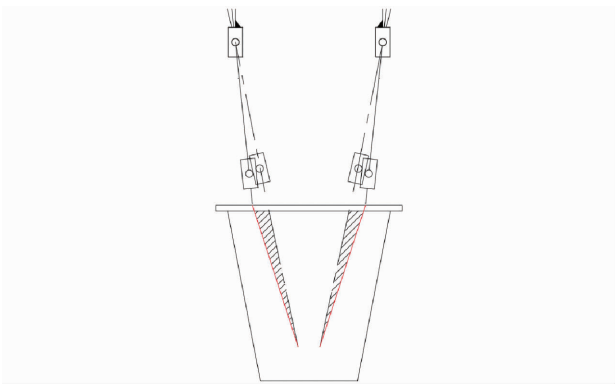


图 5 夹取针针尖轨迹示意图

Fig.5 Diagram of clip pin tip trajectory

方程进行规划求解,结果保留一位小数后,取苗爪结构参数如表 2 所示。

表 2 取苗爪结构参数
Tab.2 Structural parameters of finger-clip picking mechanism

参数	L_1 / mm	L_2 / mm	L_3 / mm	L_4 / mm	H_1 / mm	H_2 / mm	H'_2 / mm	α' / (°)
数值	34	30	158.5	55.5	25.5	92.5	42.5	11

2.2 基于 RecurDyn 的虚拟样机模型及运动分析

根据上述分析获得的取苗爪参数,利用 SolidWorks 建立零件三维模型并对取苗爪进行装配和干涉检查。将装配完成后的取苗机构虚拟样机模型导入 RecurDyn 中,利用 RecurDyn 对机构添加质量属性、约束、载荷等仿真参数^[13],指夹式取苗爪虚拟样机模型如图 6 所示。

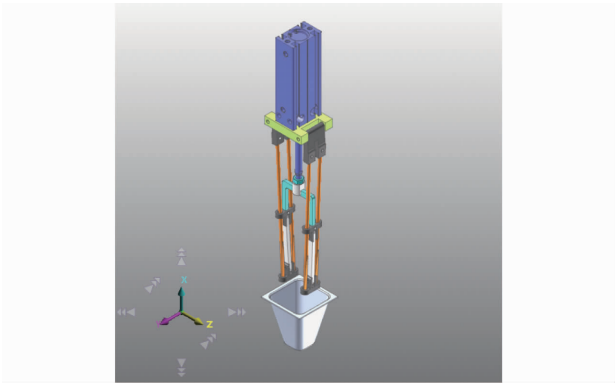


图 6 指夹式取苗爪虚拟样机模型

Fig.6 Virtual prototype model of finger-clamping picking mechanism

根据 RecurDyn 中运动副分类及取苗爪实际运动情况,对相应的运动副进行抽象处理,然后定义各构件之间转动副和移动副。根据取苗爪的实际工作情况,在推苗环支架和夹取针安装板之间添加 solid to solid 接触,各夹取针与夹取针摆杆和推苗环之间施加 extended surface to surface 接触,在气缸缸体和大地之间的移动副上添加驱动,在气缸活塞杆和气

缸缸体之间的移动副上添加驱动^[14]。根据实际测量取苗机构带动取苗爪做纵向移动 100 次所用的时间,计算出取苗爪插入钵体的平均速度 I_e 为 280 mm/s。定义驱动类型为 Displacement (time),假设取苗爪插入钵体苗的深度为 27 mm,取苗爪初始位置位于钵体苗上方 20 mm,创建表达式为 STEP(time,0.00,0,0.168,-47)+STEP(time,T,-47,T+0.168,0)^[15],T 为夹苗完成时刻,完成取苗爪插入钵体苗深度关于时间的表达式的建立。通过不断改变取苗爪插入时间,使插入深度在 27 ~

36 mm 之间变化。根据实际测量夹苗气缸动作 100 次所用的时间,计算出气缸推杆平均速度为 250 mm/s。假设开始夹苗插入深度为 0 mm,即开始夹苗时刻为取苗爪纵向移动 0.071 s 后,定义驱动类型为 Displacement (time),创建表达式为 STEP(time,0.071,0,0.27,50),完成夹苗气缸位移关于时间的表达式的建立,通过不断改变开始夹苗时刻,在 0 ~ 9 mm 范围内改变夹苗气缸开始夹苗时,取苗爪的插入深度。取苗爪纵向移动与夹苗气缸动作表达式如表 3 所示。

表 3 指夹式取苗爪纵向运动与夹苗气缸动作表达式
Tab.3 Motion pairs for model of finger-clip picking mechanism

纵向移动 气缸行 程/mm	取苗爪插 入深度/ mm	纵向移动运动表达式	开始夹苗 时刻/s	夹苗气缸运动表达式
47	27	STEP(time,0.00,0,0.168,-47)+STEP(time,T,-47,T+0.168,0)	0.071	STEP(time,0.0710,0,0.270,50)
48	28	STEP(time,0.00,0,0.171,-48)+STEP(time,T,-48,T+0.171,0)	0.075	STEP(time,0.075,0,0.275,50)
49	29	STEP(time,0.00,0,0.175,-49)+STEP(time,T,-49,T+0.175,0)	0.079	STEP(time,0.079,0,0.279,50)
50	30	STEP(time,0.00,0,0.179,-50)+STEP(time,T,-50,T+0.179,0)	0.082	STEP(time,0.082,0,0.282,50)
51	31	STEP(time,0.00,0,0.182,-51)+STEP(time,T,-51,T+0.182,0)	0.086	STEP(time,0.086,0,0.286,50)
52	32	STEP(time,0.00,0,0.186,-52)+STEP(time,T,-52,T+0.186,0)	0.089	STEP(time,0.089,0,0.289,50)
53	33	STEP(time,0.00,0,0.189,-53)+STEP(time,T,-53,T+0.189,0)	0.093	STEP(time,0.093,0,0.293,50)
54	34	STEP(time,0.00,0,0.193,-54)+STEP(time,T,-54,T+0.193,0)	0.096	STEP(time,0.096,0,0.296,50)
55	35	STEP(time,0.00,0,0.196,-55)+STEP(time,T,-55,T+0.196,0)	0.100	STEP(time,0.100,0,0.300,50)
56	36	STEP(time,0.00,0,0.200,-56)+STEP(time,T,-56,T+0.200,0)	0.104	STEP(time,0.104,0,0.304,50)

将取苗爪插入钵体深度关于时间的表达式和夹苗气缸位移关于时间的表达式输入到 RecurDyn 中对应的表达式列表,并运行仿真,测量不同运动表达式下夹取针针尖纵向位移及两个夹取针针尖之间的距离与时间的关系。选择取苗末端执行插入深度为 33 mm,开始夹苗插入深度为 4 mm,即取苗爪纵向移动运动表达式为 STEP(time,0.00,0,0.189,-53)+STEP(time,0.286,-53,0.475,0),夹苗气缸动作表达式为 STEP(time,0.086,0,0.286,50),进行仿真,得到夹取针针尖纵向位移随时间变化的曲线如图 7 所示,夹取针针尖之间距离随时间变化的曲线如图 8 所示。根据取苗爪纵向位移曲线和夹取针针尖距离变化曲线,可以看出取苗爪完成了插入-边插入边夹取-夹取保持-提离的运动过程。取苗爪夹取针完全张开时,针尖距离为 23.91 mm,完全夹紧时,针尖距离为 7.15 mm。

3 基于 EDEM 的钵体苗离散元模型

3.1 带根完整钵体性能参数测定

苗钵的物理性能参数是建立钵体离散元模型的基础,本文选用种植在 72 孔穴盘中的黄瓜苗带根完

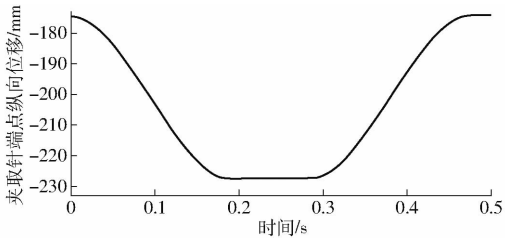


图 7 指夹式取苗爪夹取针针尖纵向位移曲线
Fig.7 Longitudinal displacement of needle tip of finger-clip picking mechanism

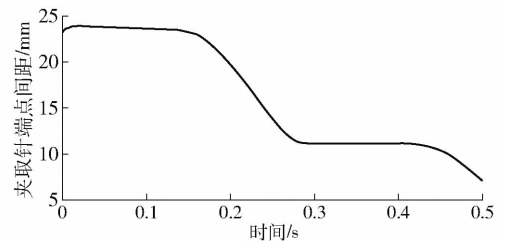


图 8 指夹式取苗爪夹取针针尖距离变化曲线
Fig.8 Distance change of needle tip of finger-clip picking mechanism

整钵体作为试验对象,苗龄为 28 d,含水率 60%,基质配比(泥炭:蛭石:珍珠岩)3:1:1^[16-17]。

(1)外形参数测定

手动将钵体苗从 72 孔穴盘中取出,测量其外形

参数。钵体底边宽 J_1 为 18.16 ~ 18.92 mm, 上边宽 J_2 为 41.89 ~ 42.14 mm, 穴苗基质高度 M 为 43.27 ~ 44.65 mm, 穴苗茎叶的高度 $N = 60.58$ mm。

(2) 密度测定

按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法》要求, 采用环刀法测量带根钵体的密度, 进行两次平行测定, 平行差值小于 0.03 g/cm^3 时, 取两次测量的平均值作为密度值^[18], 试验结果如表 4 所示。

表 4 带根钵体密度测定结果

Tab. 4 Density measurement results of root carcass							
试验 编号	环刀 质量/ g	环刀加 钵体质 量/g	钵体 质量/ g	环刀 容积/ cm ³	密度/ (g·cm ⁻³)	平行密度 差值/ (g·cm ⁻³)	平均密度/ (g·cm ⁻³)
1	43.07	90.87	47.41	60	0.790 2	0.007 3	0.793 85
2		90.92	47.85		0.797 5		

(3) 抗剪强度测定

直接剪切试验是测定土壤抗剪强度的一种通用方法, 用不同的法向力施加在竖直方向, 在水平方向得到土壤剪切破坏不同时的剪应力^[19], 不同纵向载荷下的抗剪强度如表 5 所示。

表 5 不同纵向载荷下的抗剪强度

Tab. 5 Shear strength under different longitudinal loads				
纵向载荷/kPa	50	100	150	200
抗剪强度/kPa	34.4	52.9	68.1	78.7

如图 9 所示, 以纵向载荷 σ 为纵轴, 抗剪强度 τ 为横轴, 用最小二乘法作强度线, 强度线在纵坐标上的截距为内聚力 C , 与水平线的夹角为内摩擦角 ϕ 。

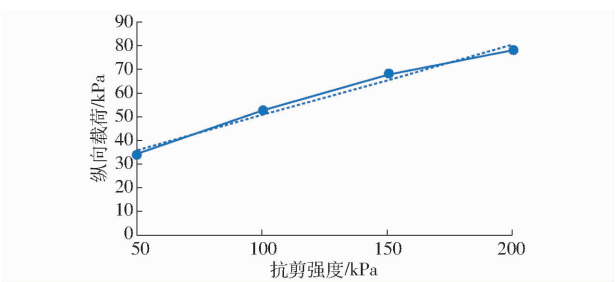


图 9 钵体抗剪强度曲线

Fig. 9 Shear strength curve of carcass

根据曲线进行数据回归, 得出钵体抗剪强度与纵向载荷的关系表达式为

$$\tau = 0.345\sigma + 21.7 \tag{5}$$

由式(5)得到钵体的内聚力 C 为 21.7 kPa, 摩擦因数为 0.345, 内摩擦角 ϕ 为 19.03° ^[19]。在此基础上, 计算泊松比

$$\mu = \frac{k_0}{1 + k_0} \tag{6}$$

其中 $k_0 = 1 - \sin\phi$

式中 μ ——泊松比
 k_0 ——钵体静止测压系数

将内摩擦角代入式(6)可得泊松比为 0.246。

(4) 弹性模量测定

土壤的弹性模量指土壤受到的应力与弹性应变之比。通过进行三轴压缩试验, 在某一载荷的作用下多次加载和卸载来分离钵体的弹性应变与塑性应变^[20]。

根据弹性模量计算公式

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta h_0}{h_0}} \tag{7}$$

式中 $\Delta\sigma$ ——纵向载荷变化量, kPa
 Δh_0 ——钵体弹性变形量, mm
 h_0 ——钵体固结后的高度, mm

将试验结果代入式(7), 得到钵体的弹性模量 $E = 3.98$ MPa。

根据剪切模量计算公式

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{8}$$

将泊松比和弹性模量代入式(8)可得剪切模量 $G = 1.597$ MPa。

3.2 基于 EDEM 的钵体离散元模型建立

实际取苗作业中, 钵体的破碎、断层、滑落均会影响取苗效果, 进而影响钵体苗的移栽以及后期作物成长^[21]。由于基质颗粒众多, 结构种类复杂繁多, 传统解析法很难精准分析取苗爪参数对钵体的影响。本文借助 EDEM 软件对钵体颗粒进行离散元仿真建模, 为优化取苗爪取苗效果提供基础。

(1) 颗粒模型建立

建立准确的钵体颗粒模型是保证仿真结果有效性的基础, 钵体主要用泥炭、珍珠岩、蛭石按 3:1:1 的比例组成, 现有研究及相关文献表明, 泥炭颗粒的基本结构主要包括块状颗粒、核状颗粒、柱状颗粒, 珍珠岩的主要结构为球状, 蛭石的主要结构为片状^[22-23]。如图 10 所示, 基于实际的颗粒形状在 EDEM 中建立相应的颗粒模型。其中, 块状模型、柱状模型、核状模型的半径按 0.2 ~ 0.5 mm 随机分布, 球状模型半径按 1.5 ~ 3 mm 随机分布, 片状模型半径按 0.4 ~ 1 mm 随机分布, 每种颗粒生成 5 000 个。如表 6 所示, 结合前期带根完整钵体物理性能测定结果, 对颗粒属性进行设定。取苗爪夹取针材料选用 45 号钢, 穴盘材料则为聚苯乙烯, 查阅相关材料性能参数, 并在 EDEM 中完成材料属性的设置。

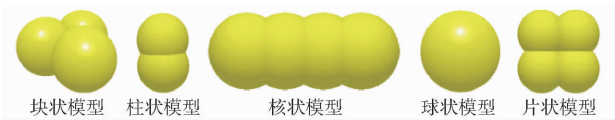


图 10 EDEM 颗粒模型示意图

Fig. 10 EDEM particle model schematic

表 6 EDEM 材料属性设置

Tab.6 EDEM material property settings

对象	参数	数值
颗粒	泊松比	0. 246
	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0. 793 85
	剪切模量/MPa	1. 597
夹取针	泊松比	0. 269
	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7. 89
	剪切模量/MPa	7.9×10^4
穴孔	泊松比	0. 35
	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1. 05
	剪切模量/MPa	1.25×10^3
颗粒-颗粒	恢复系数	0. 2
	静摩擦因数	0. 65
	动摩擦因数	0. 345
颗粒-夹取针	恢复系数	0. 6
	静摩擦因数	0. 397
	动摩擦因数	0. 261
颗粒-穴孔	恢复系数	0. 4
	静摩擦因数	0. 441
	动摩擦因数	0. 272

(2)边界模型建立

为优化取苗爪动作配合,本文利用 SolidWorks 2016 软件对穴盘的单个穴孔按照实物尺寸进行建模,并以 STP 文件格式导入 EDEM 软件,得到边界模型。在穴孔上端建立虚拟平面,通过 EDEM 中的颗粒工厂(Factory)进行基质颗粒的生成。颗粒工厂设置如图 11 所示,总共生成 25 000 个颗粒,生成速度为 30 000 个/s,并全部放置在穴孔中,生成结果如图 12 所示。

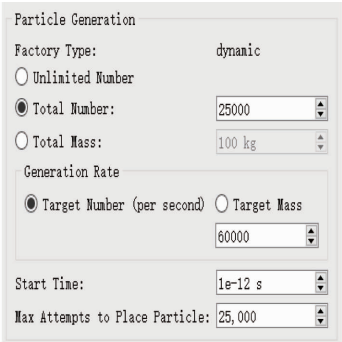


图 11 颗粒工厂设置

Fig. 11 Particle factory setting

(3)接触模型建立

为了准确描述钵体基质颗粒之间的接触关系,本文选择 EEPA(Edinburgh elasto plastic adhesion)模

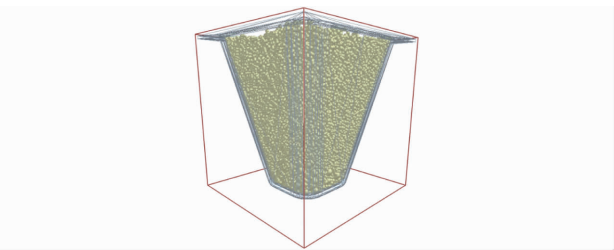


图 12 颗粒生成结果

Fig. 12 Particle generation result

型作为钵体颗粒之间以及钵体和边界模型之间的接触模型。EEPA 模型在 EDEM 软件应用中主要由 5 个参数描述:粘性力分离常量 f_0 、接触表面能 $\Delta\gamma$ 、接触塑性比 λ_p 、重叠指数 n 、粘性分离指数 X 、切向刚度 ζ_{tm} ^[24-26]。结合前期的试验结果及文献资料,得到 $f_0 = -0.002\text{ N}$, $\Delta\gamma = 3.5\text{ J/m}^2$, $\lambda_p = 0.6$, $n = 1.5$, $X = 1$, $\zeta_{tm} = 0.4$ 。

为优化取苗爪动作时序配合,提高取苗效果,本文借助 RecurDyn 和 EDEM 软件对取苗爪插入、夹取、提离钵体的过程进行机械-离散元联合仿真分析。在 RecurDyn 的 External SPI 模块中创建 Wall,选择需要与颗粒接触的几何体,此模型分别选择 4 根夹取针,并导出至 EDEM 钵体模型目录下,导入结果如图 13 所示。在 EDEM 中开启 RecurDyn Coupling 选项,建立与 RecurDyn 联合仿真的接口。RecurDyn 将力施加于 Wall 附着的夹取针上,当夹取针与钵体颗粒接触时,夹取针将力施加于钵体颗粒,同时钵体颗粒对取苗爪针施加反作用力,并返回到 RecurDyn 中^[27-28]。

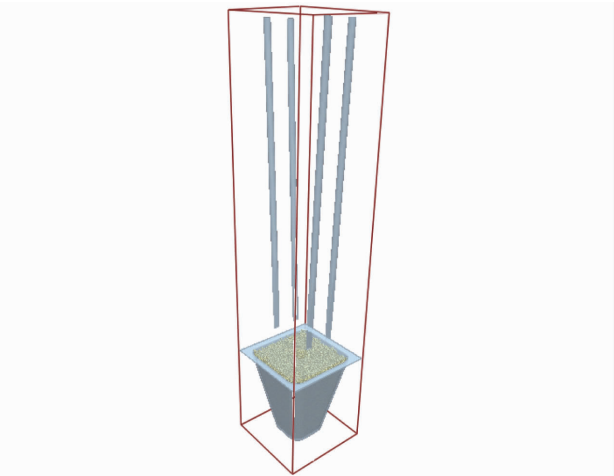


图 13 RecurDyn 导入 EDEM 结果

Fig. 13 Results of RecurDyn importing EDEM

如图 14 所示,在 EDEM 中开启耦合服务器,在 Simulator 界面进行仿真参数设置,将总的仿真时间设置为 1.5 s,颗粒会在 0.83 s 内全部落完,共给与 1 s 时间使其下落并稳定。在 RecurDyn 中将原先取苗爪纵向运动和夹苗气缸动作的初始时刻设置为第

1 秒,如图 15 所示,将总的仿真时间设定为 1.5 s,进行 Dyn/Kin 仿真,此时 EDEM 自动开启计算,并将颗粒信息导入 RecurDyn 中^[29]。

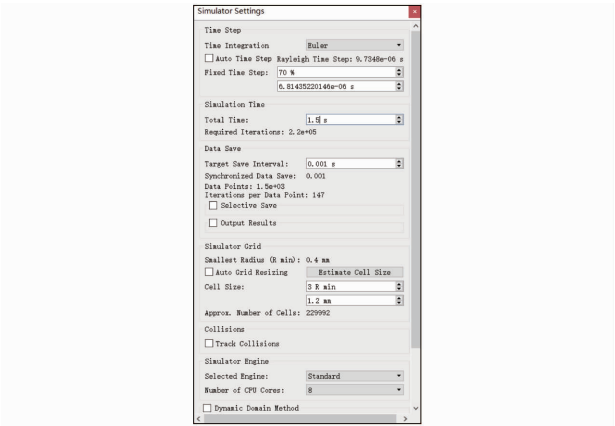


图 14 Simulator 仿真参数设置

Fig. 14 Simulator simulation parameter

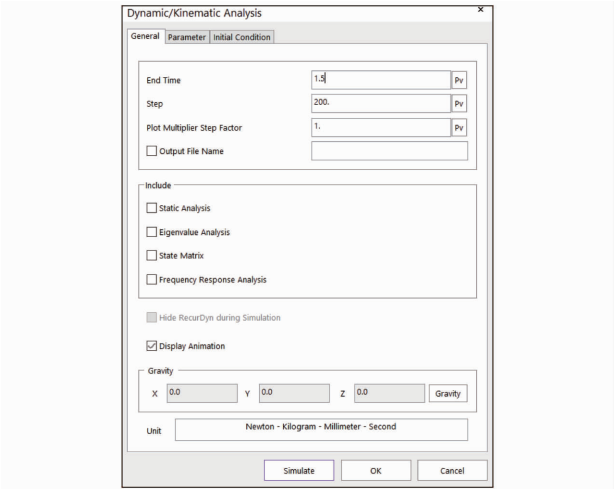


图 15 Dyn/Kin 仿真参数设置

Fig. 15 Dyn/Kin simulation parameter

3.3 取苗爪工作参数对取苗效果的影响

对取苗爪进行 RecurDyn – EDEM 联合仿真,通过单变量控制法来具体分析取苗爪插入深度及取苗爪开始夹苗深度对取苗效果的影响。在 RecurDyn 中改变要分析参数的运动表达式,保证另一个参数的值不变,对取苗效果进行对比分析,得出其对取苗效果的影响规律。

(1)取苗爪插入深度对取苗效果的影响

取苗爪的插入深度决定了夹取针与钵体的作用面积,夹取针针尖运动轨迹以及对钵体根部的扰动。设定插入 4 mm 后夹苗气缸动作,夹取针开始夹苗,分别将插入深度设定为 32、34、36 mm,研究插入深度对取苗效果的影响。根据试验时插入深度要求,对取苗爪移动方程进行替换,并完成钢针插入及提取过程。如图 16 所示,插入深度为 32 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $1.31 \times 10^{-2} \sim 2.31 \times 10^{-2}$ N

之间,颗粒变形量主要分布于 $5.32 \times 10^{-3} \sim 1.16 \times 10^{-2}$ mm 之间。如图 17 所示,插入深度为 34 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $5.19 \times 10^{-3} \sim 1.30 \times 10^{-2}$ N 之间,颗粒变形量主要分布于 $4.44 \times 10^{-3} \sim 1.02 \times 10^{-2}$ mm 之间,如图 18 所示,插入深度为 36 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $9.71 \times 10^{-3} \sim 2.61 \times 10^{-2}$ N 之间,颗粒变形量主要分布于 $5.19 \times 10^{-3} \sim 1.20 \times 10^{-2}$ mm 之间。随着插入深度的增大,夹取针与钵体接触面积增大,钵体的受力面积增大,钵体完整度越高。随着插入深度的增大,夹取针夹紧钵体时,颗粒所受的挤压力先变小后变大,颗粒的形变也随着插入深度的增加而先变小后变大,且钵体苗受夹取针挤压而往上滑动,夹取针穿透钵体,在实际作业中容易使钵体苗根部断裂而破坏钵体原有的稳定状态,影响移栽效果及钵体苗后期生长情况,因此优选插入深度为 34 mm。

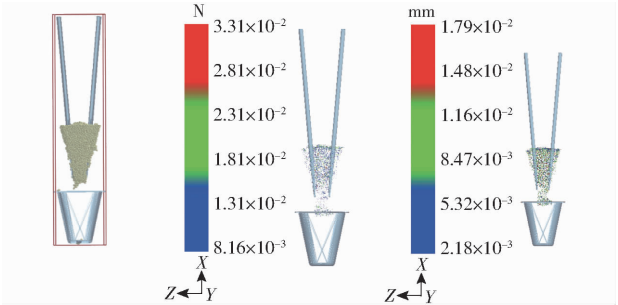


图 16 插入深度 32 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态

Fig. 16 Picking effect, particle force and deformation state of insertion depth of 32 mm

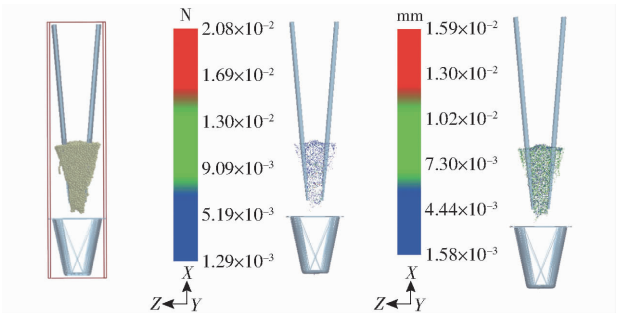


图 17 插入深度 34 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态

Fig. 17 Picking effect, particle force and deformation state of insertion depth of 34 mm

(2)取苗爪开始夹苗深度对取苗效果的影响

取苗爪的开始夹苗深度决定了夹取针针尖的运动轨迹,进而影响对钵体内根系的损伤。设定取苗爪插入深度为 34 mm,将开始夹苗深度分别设定为 2、4、6 mm,研究开始夹苗深度对取苗效果的影响。根据试验时开始夹苗深度的要求,对取苗爪夹苗气缸位移方程进行替换,并完成钢针插入及提取过程。如图 19 所示,开始夹苗深度为 2 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $1.59 \times 10^{-3} \sim 1.38 \times 10^{-2}$ N 之间,颗

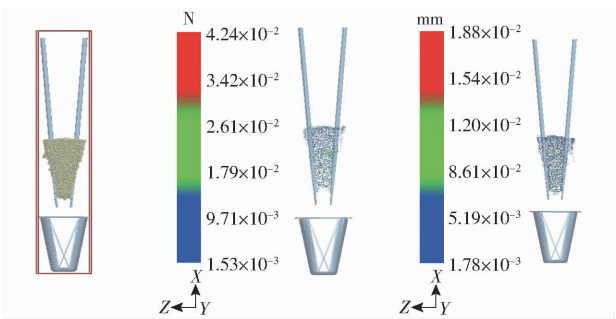


图 18 插入深度 36 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态
Fig. 18 Picking effect, particle force and deformation state of insertion depth of 36 mm

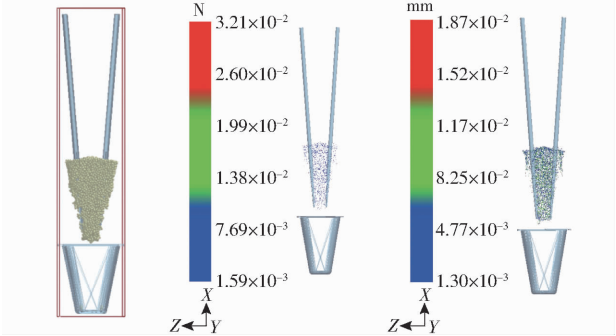


图 19 开始夹苗深度为 2 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态
Fig. 19 Picking effect, particle force and deformation state of initial picking depth of 2 mm

粒变形量主要分布于 $4.77 \times 10^{-3} \sim 1.17 \times 10^{-2}$ mm 之间。如图 20 所示,开始夹苗深度为 4 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $1.29 \times 10^{-3} \sim 1.19 \times 10^{-2}$ N 之间,颗粒变形量主要分布于 $4.25 \times 10^{-3} \sim 1.04 \times 10^{-2}$ mm 之间,如图 21 所示,开始夹苗深度为 6 mm 时,颗粒间所受力主要分布于 $1.74 \times 10^{-3} \sim 1.42 \times 10^{-2}$ N 之间,颗粒变形量主要分布于 $5.12 \times 10^{-3} \sim 1.24 \times 10^{-2}$ mm 之间。随着开始夹苗深度的增加,颗粒所受的挤压力先变小后变大,颗粒的形变也随着初始插入深度的增加而先变小后变大。取苗爪完全插入钵体后,夹苗气缸仍未完全收缩,此时,夹取针针尖仅做夹紧钵体的运动,且随着开始夹苗深度的增加,这一过程对根部的扰动越大。在实际作业中容易改变钵体原有的稳定状态,甚至夹碎钵体,影响移栽效果及钵体苗后期生长情况。所以开始夹苗深度选择为 4 mm,夹取针针尖轨迹较优,钵体形状保持的较好。

4 试验与结果分析

根据仿真分析结果,通过调整气缸两端机械限位,设定取苗爪初始位置位于钵体上方 16 mm,取苗爪纵向位移为 50 mm,即取苗爪插入钵体深度为 34 mm。使用高速摄像机记录取苗机构运动轨迹,根

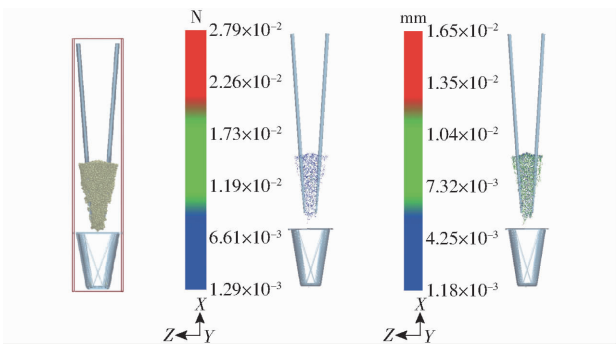


图 20 开始夹苗深度为 4 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态
Fig. 20 Picking effect, particle force and deformation state of initial picking depth of 4 mm

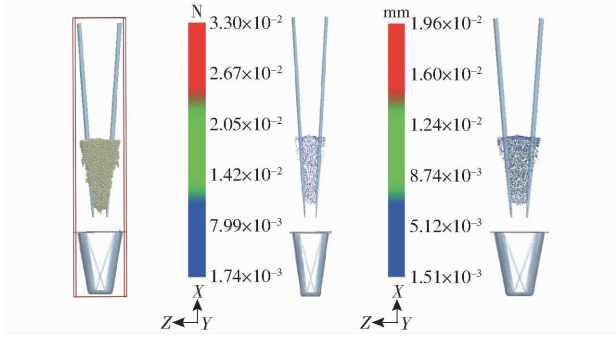


图 21 开始夹苗深度为 6 mm 时取苗效果、颗粒受力及变形状态
Fig. 21 Picking effect, particle force and deformation state of initial picking depth of 6 mm

据录像结果逐步调整取苗爪开始夹苗时刻,使开始夹苗插入深度为 4 mm。如图 22 所示,选用 2 盘 72 孔黄瓜苗(钵体高度为 42 mm)为一组,试验用取苗机构横向移动距离为 400 mm,取苗机构每侧 3 个取苗爪,取苗爪侧面安装有间隔块,取苗爪与取苗爪之间安装有弹簧。横向移动气缸伸出带动最外侧取苗



图 22 指夹式取苗爪取苗试验
Fig. 22 Picking seedling test of finger-clamping picking mechanism

爪移动至投苗点,取苗爪之间的弹簧使每个取苗爪分开,并与导苗桶对齐,取苗爪张开推苗,使苗投入分苗机构。横向移动气缸缩回,带动最外侧取苗爪移动至取苗点,最内侧取苗爪碰到位于取苗机构中心位置的限位挡块停止,横向移动气缸继续带动最外侧取苗爪移动至中间取苗爪与两侧取苗爪间隔块接触而停止,此时取苗爪与穴盘苗穴孔对齐,进行取苗。根据高速摄像结果逐步调整取苗机构横向移动气缸进气口节流阀,分别使一次取苗周期为 3.75、3、2.5 s,即取苗速率为 16、20、24 次/min,每次取 6 株,进行 3 组取苗效果试验。自动取苗试验时,评价指标为取苗成功率 S 。依据取苗工作循环动作流程,统计出夹取苗失败率 S_1 ,即取苗爪未能将钵体苗从穴孔中取出的概率;钵体破碎率 S_2 ,即钵体虽被取出,但钵体苗被夹碎的概率;投苗失败率 S_3 ,即钵体苗未能准确投入分苗杯的概率,以上各指标计算公式为

$$S_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\%$$

(9)

表 7 取苗爪夹取苗试验结果

Tab.7 Test result of finger-clamping picking mechanism

穴孔数/ 个	待取苗数/ 个	夹取苗失 败数/个	钵体破碎 数/个	投苗失败 数/个	夹取苗失 败率/%	钵体破碎 率/%	投苗失败 率/%	取投苗成 功率/%	取苗速率/ (次·min ⁻¹)
144	138	0	1	0	0	0.72	0	99.28	16
144	140	1	0	2	0.71	0	1.43	97.86	20
144	141	1	0	4	0.71	0	2.84	96.45	24

5 结束语

根据取苗爪的作用及边插边夹的作业方式,本文阐述了取苗爪的结构组成及工作过程。建立取苗爪的运动数学模型,以钵体苗被完整的取出,同时减少取苗爪对苗钵根系的损伤为目标,对组成取苗爪的各构件进行尺寸参数优选。由于取苗爪夹取苗动作复杂,作用对象钵体易变形,单一的离散元仿真或多体动力学仿真难以准确描述取苗爪和钵体之间的作用关系,因此根据几何参数在 RecurDyn 中建立了虚拟样机模型,并添加仿真参数,根据不同取苗爪夹取、提离过程的时序配合,确定不同的取苗爪运动方程,并在 RecurDyn 中仿真取苗爪夹取针针尖纵向位

$$S_2 = \frac{N_2}{N} \times 100\%$$

(10)

$$S_3 = \frac{N_3}{N} \times 100\%$$

(11)

$$S = 1 - S_1 - S_2 - S_3$$

(12)

式中 N ——取苗总数
 N_1 ——夹取苗失败个数
 N_2 ——钵体虽被取出,但发生破碎的个数,即钵体被取苗爪夹散并脱落
 N_3 ——投苗失败个数^[28-30]
试验结果如表 7 所示,可以看出,随着取苗速率的增加,夹苗失败率、钵体破碎率并没有明显变化,部分失败的钵体苗主要是因为苗钵本身生长情况不佳,钵体盘根性较差导致。但随着取苗速率的加快,投苗失败数增加。其主要原因是随着取苗速率的加快,取苗爪到达投苗点时产生的震动冲击较大,钵体苗产生晃动,使相邻两棵钵体苗的叶子交错在一起,在投苗时产生落苗姿态不佳的问题,导致投苗失败。

移和距离变化情况。根据对带根完整钵体物理参数测定得到的数据,在 EDEM 中建立颗粒模型并设定材料属性,同时建立边界模型并设定接触模型仿真参数。将 RecurDyn 中与颗粒接触的夹取针导入到 EDEM 中,对取苗爪进行 RecurDyn-EDEM 联合仿真,从钵体完整性、钵体受力情况、钵体变形情况,分析取苗爪插入深度、取苗爪开始夹苗深度对取苗效果的影响。优选出最佳的插入深度为 34 mm,最佳的开始夹苗深度 4 mm,可以获得较好的钵体完整性。并在 16、20、24 次/min 的取苗速率下进行取苗爪取投苗试验,试验表明,所设计的指夹式取苗爪取苗成功率均在 96% 以上,钵体破碎率小于 1%,具有良好的取苗、投苗效果,在取苗作业中可以保持良好的钵体完整性。

参 考 文 献

[1] 金鑫. 蔬菜穴盘苗自动移栽技术与装置的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
JIN Xin. Research on automatic transplanting technology and device for vegetable plug seedlings [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[2] 崔巍. 旱地钵体苗自动移栽机理理论与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
CUI Wei. Research on dry land automatic transplanter for plug seedlings[D]. Beijing:China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[3] 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.

[4] 童俊华, 蒋焕煜, 蒋卓华, 等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 8 – 16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 8 – 16. (in Chinese)

[5] 徐静云. 基于苗钵-根系综合分析的取苗末端执行器设计及育苗工艺优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
XU Jingyun. Design of pick up end effector and optimization of seedling cultivation based on seedling bowl – root multiple properties[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[6] 胡静, 韩绿化, 温贻芳, 等. 与自动移栽相关的不同蔬菜穴盘苗力学特性[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 132 – 136.
HU Jing, HAN Lühua, WEN Yifang, et al. Mechanical properties of different vegetable plug seedlings as related to automatic transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 132 – 136. (in Chinese)

[7] 韩绿化. 蔬菜穴盘苗钵体力学分析与移栽机器人设计研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
HAN Lühua. Mechanical analysis of the root lumps and development of a robotic transplanter for vegetable plug seedlings[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 纪龙龙, 谢焕雄, 杨红光, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 耦合的马铃薯干式清土装置仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 109 – 115.
JI Longlong, XIE Huanxiong, YANG Hongguang, et al. Simulation analysis of potato dry soil cleaning device based on EDEM – RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 109 – 115. (in Chinese)

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

[11] 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)

[12] 王英, 陈建能, 吴加伟, 等. 用于机械化栽植的西兰花钵苗力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 1 – 10.
WANG Ying, CHEN Jianneng, WU Jiawei, et al. Mechanics property experiment of broccoli seedling oriented to mechanized planting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 1 – 10. (in Chinese)

[13] 陈小岗, 张登峰, 张军, 等. 基于 RecurDyn 的八连杆机构参数化设计及优化[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 128 – 131, 135.
CHEN Xiaogang, ZHANG Dengfeng, ZHANG Jun, et al. Parametric design and optimization of eight-bar linkage mechanism based on RecurDyn[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2021, 50(1): 128 – 131, 135. (in Chinese)

[14] ZHAN Ziqian, SI Guomao, ZHI Jingjing, et al. Dynamic analysis of garlic seeder using RecurDyn[C] // Proceedings of the KSMPE Conference, 2019.

[15] 吴鸿欣, 闫楚良, 杨小刚, 等. 基于 RecurDyn 的玉米秸秆调质装置设计与仿真[J]. 农业工程, 2017, 7(1): 75 – 80, 83.
WU Hongxin, YAN Chuliang, YANG Xiaogang, et al. Design and simulation of corn stalk quenching and tempering device based on RecurDyn[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(1): 75 – 80, 83. (in Chinese)

[16] 王志娣. 不同生物炭配方对番茄和黄瓜穴盘苗秧苗质量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
WANG Zhidi. Effect of different biochar formulas on the quality of tomato and cucumber plug seedlings[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[17] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24 – 29.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24 – 29. (in Chinese)

[18] 宋琦, 喻俊志, 王卫兵, 等. 番茄穴盘苗钵体的力学特性分析与优化[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(6): 529 – 536.
SONG Qi, YU Junzhi, WANG Weibing, et al. Analysis and optimization of mechanical properties of tomato seedling pot[J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2019, 33(6): 529 – 536. (in Chinese)

[19] 马一凡, 王卫兵, 冯静安, 等. 移栽番茄穴盘苗钵体夹持压缩特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 70 – 77.
MA Yifan, WANG Weibing, FENG Jing'an, et al. Experimental study on compression properties transplanted tomato plug seedlings pot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 70 – 77. (in Chinese)

[20] 玄冠涛, 韩军伟, 邵园园, 等. 我国机械化移栽自动分苗取苗技术研究现状[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 10 – 15.
XUAN Guantao, HAN Junwei, SHAO Yuanyuan, et al. Current development of automatic seedling separation and pick-up techniques for mechanical transplantation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 10 – 15. (in Chinese)

[21] 徐诚, 杨建超, 杨鸿基, 等. 不同基质配比对黄瓜穴盘育苗的影响[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(6): 38 – 41.
XU Cheng, YANG Jianchao, YANG Hongji, et al. Effects of different substrate proportions on cucumber plug seedlings[J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2021, 67(6): 38 – 41. (in Chinese)

[22] 谢彦如, 唐丹, 张蒲, 等. 不同基质配比对辣椒穴盘苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020(4): 7 – 14.
XIE Yanru, TANG Dan, ZHANG Pu, et al. Effects of different substrate ratios on growth of pepper seedlings[J]. Northern Horticulture, 2020(4): 7 – 14. (in Chinese)

Agricultural Machinery,2018,4(2):48–51. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 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)

[24] ZENG G, JIANG R, HUANG G, et al. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82(2): 250–259.

[25] 刘春景,唐敦兵,何华,等. 基于灰色关联和主成分分析的车削加工多目标优化[J]. 农业机械学报,2013,44(4):293–298,292.
LIU Chunjing, TANG Dunbing, HE Hua,et al. Multi-objective optimization of turning based on grey relational and principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):293–298,292. (in Chinese)

[26] MALEKPOOR H, CHALVATZIS K, MISHRA N, et al. Integrated grey relational analysis and multi objective grey linear programming for sustainable electricity generation planning[J]. Annals of Operations Research, 2018, 269(1): 475–503.

[27] VIADERO R C. Factors affecting fish growth and production[J]. Water Encyclopedia, 2005(3): 129–133.

[28] 李光,章晓峰,杨加超,等. 基于残差 BP 神经网络的 6 自由度机器人视觉标定[J]. 农业机械学报,2021,52(4):366–374.
LI Guang, ZHANG Xiaofeng, YANG Jiachao, et al. Vision calibration of six degree of freedom robot based on residual BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):366–374. (in Chinese)

[29] 刘天舒. BP 神经网络的改进研究及应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2011.
LIU Tianshu. Improvement of BP neural network and its application[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[30] XU B, DAN HC, LI L. Temperature prediction model of asphalt pavement in cold regions based on an improved BP neural network[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 568–580.

[31] 陈英义,程倩倩,成艳君,等. 基于 GA–BP 神经网络的池塘养殖水温短期预测系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 172–178.
CHEN Yingyi, CHENG Qianqian, CHENG Yanjun, et al. Short-term prediction system of water temperature in pond aquaculture based on GA–BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 172–178. (in Chinese)

[32] YANG J, HU Y, ZHANG K, et al. An improved evolution algorithm using population competition genetic algorithm and self-correction BP neural network based on fitness landscape[J]. Soft Computing, 2021, 25(3): 1751–1776.

(上接第 85 页)

[23] 杨佳敏,杨望,杨坚. 木薯种茎参数测量及 EDEM 仿真参数标定[J]. 农机化研究, 2022,44(1):197–202,207.
YANG Jiamin, YANG Wang, YANG Jian. Experimental research of millet grain at the impacting load[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 197–202,207. (in Chinese)

[24] 李衍军,刘瑞,刘春晓,等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):54–61,133.
LI Yanjun,LIU Rui,LIU Chunxiao,et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):54–61,133. (in Chinese)

[25] 冯天翔. 温室穴盘苗移栽手爪改进设计及试验研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.
FENG Tianxiang. Optimization design and test research of plug seedlings end-effector in greenhouse[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)

[26] 杨娜. 基于 DEM–MBD 耦合技术的马铃薯大垄双行垄体构建仿真研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
YANG Na. Simulation research on potato ridge and double row ridge construction based on DEM–MBD coupling technology [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese)

[27] 杨发展,牟家宏,李维华,等. 基于 Fluent/EDEM 的水稻精量排种盘参数化设计与仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2020,41(9):1–7.
YANG Fazhan, MOU Jiahong, LI Weihua, et al. Parametric simulation design of rice precision metering tray based on Fluent/EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(9): 1–7. (in Chinese)

[28] 张思伟. 穴盘苗自动移栽机顶夹拔组合取苗机构设计[D]. 镇江:江苏大学,2018.
ZHANG Siwei. Design of push-clip-pull picking seedling mechanism on automatic transplanting machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2018. (in Chinese)

[29] 廖庆喜,王洋,胡乔磊,等. 油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):93–102.
LIAO Qingxi, WANG Yang, HU Qiaolei, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):93–102. (in Chinese)

[30] 王超,刘彩玲,李永磊,等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5):35–43,51.
WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 35–43, 51. (in Chinese)