

蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验

张学东^{1,2} 刘立晶^{1,2} 宁义超^{1,2} 孔德航^{1,2} 刘云强^{1,2} 吴海华^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决顶夹式取苗出现的顶苗失败、钵体被夹持时受压变形、破损等问题,以顶夹式取苗末端执行部件为研究对象,建立顶苗和夹苗过程力学分析模型,得出影响取苗效果的主要因素包括顶针直径、顶针长度、顶苗速度和夹苗加载距离。通过试验测定钵体相关物理性能参数,在 EDEM 软件中选用 EEPA 接触模型建立钵体颗粒模型。利用 EDEM 仿真模拟顶苗与夹苗过程,采用 Box – Behnken 设计法和单变量控制法分别进行顶苗和夹苗仿真试验设计,利用 Design-Expert 软件分析得到优化参数组合为:顶针直径 1.9 mm、顶针长度 18 mm、顶苗速度 0.3 m/s 和夹苗加载距离 4 mm。在频率 100 株/min 下进行取投苗性能验证试验,经过优化的取苗末端执行部件取投苗成功率 93.25%,钵体完整度良好,满足叶菜类蔬菜穴盘苗自动旱地移栽取苗要求。

关键词: 蔬菜; 自动移栽机; 顶夹式取苗; 末端执行部件; EDEM; 参数优化

中图分类号: S223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0115-10

Design and Experiment of End Effector of Seedling Taking by Jacking and Clamping of Vegetable Transplanter

ZHANG Xuedong^{1,2} LIU Lijing^{1,2} NING Yichao^{1,2} KONG Dehang^{1,2} LIU Yunqiang^{1,2} WU Haihua^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of jacking seedling failure, compression deformation and damage when the lump of mud is clamped, taking jacking and clamping components as the research object. Mechanical analysis models of jacking and clamping the lump of mud were established. Needle diameter, needle length, velocity, and compression distance were the main factors affecting the effect of seedling taking extraction by mechanical analysis. The related physical properties of the lump of mud were measured by experiments. The EEPA contact model used in the EDEM software was used as the contact model between particles, between particles and tray, and between particles and seedling taking parts. And the particle model was established to simulate the real lump of mud. EDEM software was used to simulate the process of jacking and clamping seedlings. Box – Behnken design method and univariate control method were used to design the simulation experiment of jacking and clamping seedlings. The optimized parameter combination that was obtained by using Design-Expert software were needle diameter of 1.9 mm, needle length of 18 mm, jacking velocity of 0.3 m/s and compression distance of 4 mm. The seedling taking performance verification tests was carried out, and the seedling taking frequency was 100 plants/min. The seedling taking success rate of the optimized end-effector was 93.25%, and the lump of mud of the bowl was good. The results of this experiment met the requirement of automatic dry land transplanting of leaf vegetable pothole seedlings.

Key words: vegetable; automatic transplanter; seedling taking by jacking and clamping; end-effector; EDEM; parameter optimization

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022CXG010612)

作者简介: 张学东(1996—),男,硕士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: 906892956@qq.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: xylilj@sina.com

0 引言

我国大部分蔬菜种植采用育苗移栽模式,以人工移栽和半自动移栽机作业为主,劳动强度大,工作效率低^[1-5]。目前市场上全自动移栽机应用推广少,其自动取苗装置对育苗要求高,适应性差,自动取苗末端执行部件和取苗技术研究存在瓶颈,致使取苗效果差,制约移栽作业机械化、自动化发展^[6-9]。

顶夹结合式取苗装置,其取苗末端执行部件主要包含顶苗和夹苗两部分,因取苗过程直接作用于形状规整的钵体,具有取苗适应性强、取苗效率高的特点,国外应用与研究较多。如意大利 Ferrari 公司研制的 FUTURA 全自动移栽机取苗装置,顶苗部件穿过钵穴底孔将穴盘苗成排顶出,由中间带圆杆的长条状夹苗部件夹持完成取苗。ISAO^[10]设计了一种取苗装置,顶苗部件穿过钵穴底孔将穴盘苗顶出,取苗针同步插入钵体夹取苗,随后持苗移动至投苗位置,取苗针缩回完成投苗。胡建平等^[3]提出一种顶夹拨组合式取苗技术,顶苗部件穿过育苗盘底孔顶松钵体,克服钵体与钵穴内壁间的粘附力,通过研制的两指四针气动取苗爪,实现向下取苗爪张开插入钵体,向上取苗爪夹紧拔出钵体。

一般顶夹结合式取苗装置结构相对复杂,取苗末端执行部件易造成顶苗失败、钵体受压变形严重、基质块破损等问题,受取苗末端执行部件的安装空间限制,常采用间隔取苗的方式,取苗效率显著降低。针对上述问题,本文基于顶夹结合取苗原理设计一种顶夹取苗装置,对顶夹取苗过程进行力学分析,并针对其取苗末端执行部件进行设计。为直观研究不同结构和参数条件下取苗效果,基于 EDEM 仿真软件,采用离散元法进行研究^[11-14],通过实际试验测定钵体相关物理性能参数,在 EDEM 中建立钵体颗粒模型。通过 EDEM 软件分别仿真顶苗和夹苗过程,分析不同结构参数的末端执行部件取苗时对钵体的影响,得到最优的参数组合,并进行实际试验验证,为取苗装置后续研究提供参考。

1 末端执行部件结构与工作原理

取苗末端执行部件包含顶苗杆和取苗爪两部分,如图 1 所示。顶苗杆由顶针和顶杆组成,顶针用于固定钵体,保持其竖直姿态,顶杆用于打破钵体与钵穴之间的粘附力,将钵体顶出,相邻顶苗杆等距布置在底座上,顶杆长度相差一个钵体高度。取苗爪由对称的两个夹片组成,两夹片呈 V 形布置在气动水口夹上,通过两夹片的开合实现对钵体的夹持和

松放。

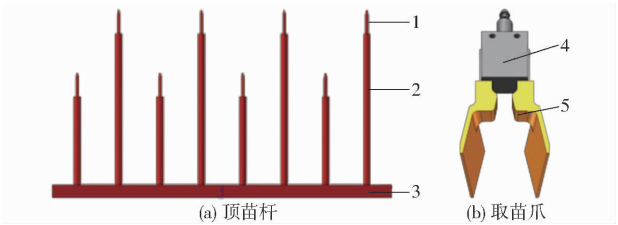


图 1 末端执行部件结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of seedling taking unit

1. 顶针 2. 顶杆 3. 底座 4. 气动水口夹 5. 夹片

取苗过程如图 2 所示,具体步骤为:①顶苗杆穿过穴盘底部透水孔,利用顶杆将穴盘苗整排顶出,并由端部顶针固定钵体保持不动,相邻顶杆长度不同,使得顶出的钵体等距错位布置,为取苗末端执行部件提供安装空间。②取苗爪从侧面靠近。③夹持钵体。④顶苗杆收缩与钵体完全分离。⑤取苗爪将苗运移至投苗位。⑥完成投放。整个取苗过程包含顶苗、夹苗、送苗、投苗 4 个环节,要求应能够将苗从穴盘中成功顶起,并准确夹取,不能损坏钵体,在取苗爪夹持钵体过程中需要有一定夹持力确保不掉苗,投苗时应保证钵体能够与取苗爪完全脱离,顺利投放。

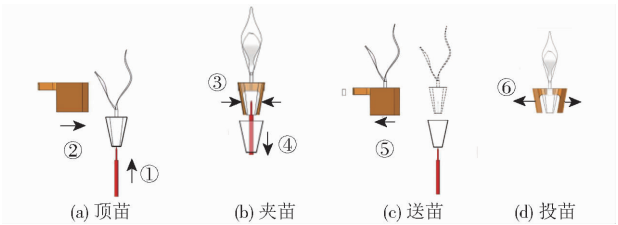


图 2 工作流程图

Fig. 2 Working flowchart

该装置相比一般顶夹式取苗装置,增加顶针结构,等距错位固定钵体,为取苗爪提供更大的安装空间,实现整排取苗,提高取苗效率;V 形取苗爪相比平行取苗爪,所需钵体夹持力更小,钵体变形量更小。

取苗过程中,顶苗杆和取苗爪直接作用于钵体,其结构形式、安装方式和工作参数直接影响取苗效果和取苗成功率。

2 取苗过程的穴盘苗力学模型

为研究取苗过程中钵体所受影响,降低钵体损坏程度,提高取苗成功率,对取苗过程钵体力学模型进行分析。128 穴(8×16)穴盘苗密度较高、育苗成本低、种植便捷,适合多种叶菜类蔬菜作物育苗,应用广泛,故本文以 128 穴蔬菜穴盘苗为研究对象。

2.1 顶苗过程力学分析

为使端部顶针更好固定钵体姿态,保持位置一

致性较好,设置顶苗杆轴线和钵体中轴线重合。以钵体为对象,底部与顶苗杆接触中心点为原点,中轴线为纵坐标轴方向,建立直角坐标系 xoy ,根据顶苗过程中钵体的运动状态进行力学分析。

2.1.1 钵体静止状态

顶针以速度 v_0 插入钵体内部,直至顶杆端面刚刚接触钵体底部,该过程钵体未与钵穴分离,即钵体加速度为 0,速度为 0,受力分析如图 3 所示,有平衡方程

$$F_{ni} + f_{dz} - f_{ni} = G + F_{nj} \quad (1)$$

式中 F_{ni} ——穴钵内壁对钵体支持力的合力, N

f_{dz} ——顶针对钵体的摩擦力, N

G ——钵体重力, N

f_{ni} ——穴钵内壁对钵体摩擦力的合力, N

F_{nj} ——穴钵内壁对钵体粘结力的合力, N

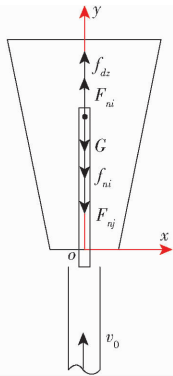


图 3 钵体静止状态受力分析

Fig. 3 Force analysis of lump of mud at rest

静止状态下,顶针插入钵体内部,钵体受压缩,内部压力增大, F_{ni} 、 f_{dz} 、 f_{ni} 均增大, G 、 F_{nj} 不变,由方程(1)可得,当增量关系 $\Delta F_{ni} + \Delta f_{dz} - \Delta f_{ni} \neq 0$ 时,会打破平衡状态,即顶杆端面接触钵体底部前,钵体就脱离穴钵,顶针无法有效固定钵体,顶苗失败。

2.1.2 钵体加速及匀速状态

顶杆推顶钵体底部,克服钵体与穴钵内壁的粘结力、摩擦力,直至钵体与穴钵脱离,此时钵体加速直线运动,加速度 $a_1 > 0$,过程中速度恒大于 0,质量 m 的钵体所受惯性力 $F_{ni} = -ma_1$,随后钵体与顶苗杆一同匀速运动至待夹持高度,整个过程钵体经过加速和匀速两个状态,受力分析如图 4、5 所示,由达朗贝尔原理,有加速状态和匀速状态方程

$$F_{dg1} - F_{n1} = G + f_{ni} + F_{nj} - F_{ni} \quad (2)$$

$$F_{dg2} - G = 0 \quad (3)$$

式中 F_{dg1} ——加速时顶杆对钵体的作用力, N

F_{dg2} ——匀速时顶杆对钵体的作用力, N

加速状态下, a_1 非定值,实际情况下钵体为非刚体,在顶杆端面与钵体底部接触的位置,钵体易发生形变,具体表现为钵体底部受压缩,形成坑洞,严重

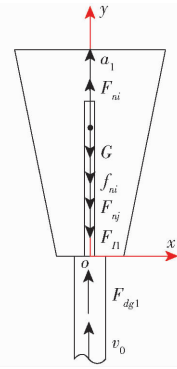


图 4 钵体加速状态受力分析

Fig. 4 Force analysis of acceleration state of lump of mud

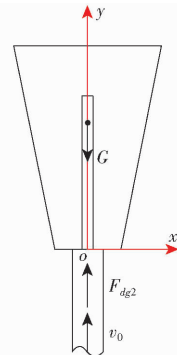


图 5 钵体匀速状态受力分析

Fig. 5 Force analysis of uniform velocity state of lump of mud

时顶杆直接贯穿钵体,造成顶苗失败。受压缩形变量等于加速状态下纵坐标方向钵体与顶杆位移差,顶杆以速度 v_0 匀速直线运动,顶苗速度 v_0 越大,位移差越大。

匀速状态下,当速度 v_0 不变时, F_{n1} 越大,位移差越小,对钵体的损伤越小。分析可知,该状态可视 G 、 f_{ni} 、 F_{nj} 、 F_{ni} 不变,由方程(2)可知,可通过提高 F_{dg1} ,保证较大 F_{n1} ,实现方程等式成立。

2.1.3 钵体减速状态

顶苗杆突然减速停止,钵体在自身重力和顶针摩擦力双重作用下,减速直至停止,即钵体加速度 $a_2 < 0$,速度大于 0,并很快趋于 0,钵体所受惯性力 $F_{n2} = -ma_2$,受力分析如图 6 所示,由达朗贝尔原理,有减速状态方程

$$F_{dg3} + F_{n2} - G - f_{dz} = 0 \quad (4)$$

式中 F_{dg3} ——减速时顶杆对钵体的作用力, N

减速状态下,钵体内部压力视为不变, f_{dz} 近似定值, F_{n2} 越大,在纵坐标方向钵体位移越小,越不容易冲出、脱离顶苗杆,由方程(4)可知,可通过提高 f_{dz} ,保证较大 F_{n2} ,实现方程等式成立。

综上分析可知,合理设定与顶苗杆相关的 v_0 、 f_{dz} 和 F_{dg1} 可以实现好的顶苗效果。有

$$f_{dz} = \mu_{dz} F_{Ndz} \quad (5)$$

式中 μ_{dz} ——顶针与钵体内部的摩擦因数

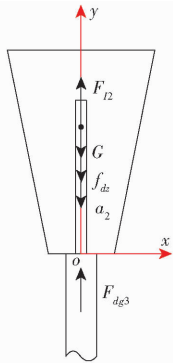


图 6 钵体减速状态受力分析

Fig. 6 Force analysis of deceleration state of lump of mud

F_{Ndz} ——顶针对钵体内部的正压力,N

F_{Ndz} 与插入钵体顶针的体积相关,所以影响 f_{dz} 的主要因素为顶针直径、长度和表面粗糙度。

顶苗杆匀速直线运动,根据

$$F_{dg1} = p_{dg} S_{dg} \quad (6)$$

式中 p_{dg} ——顶杆端面对钵体的压强,Pa

S_{dg} ——顶杆对钵体沿顶出方向有效作用面积, m^2

可知影响 F_{dg1} 的主要因素为顶杆直径和端面型式。

2.2 夹苗过程力学分析

通过顶苗过程力学分析可知,钵体沿中轴线方向存在压缩变形。一般夹苗过程,钵体沿夹持力方向发生压缩变形。前后两次形变方向不一致,钵体内部基质颗粒与根系位置重新排列,原有基质颗粒间粘聚力、颗粒与根系之间附着力受到破坏,与处在穴钵内状态相比,钵体内部稳定性降低,外形发生变化,部分基质颗粒脱落,结构松散,易碎。

采用 V 形取苗爪从两侧将钵体夹起,以钵体为对象,钵体质心为原点,中轴线方向为纵坐标方向,取苗爪两侧中心连线方向为横坐标方向,建立直角坐标系 xoy 进行力学分析,如图 7 所示。

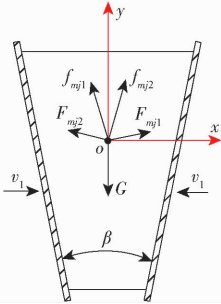


图 7 夹持钵体受力分析

Fig. 7 Force analysis of clamping lump of mud

在 y 轴方向上,有平衡方程

$$F_{mj1} \sin \frac{\beta}{2} + F_{mj2} \sin \frac{\beta}{2} + f_{mj1} \cos \frac{\beta}{2} + f_{mj2} \cos \frac{\beta}{2} - G = 0 \quad (7)$$

式中 F_{mj1} 、 F_{mj2} ——取苗爪对钵体的正压力,N

f_{mj1} 、 f_{mj2} ——取苗爪对钵体的摩擦力,N

β ——取苗爪左右两侧的夹持角, $(^\circ)$

假设钵体材料符合材料力学的连续性、均匀性、各向同性, $F_{mj1} = F_{mj2} = F_{mj}$, $f_{mj1} = f_{mj2} = f_{mj}$,则有

$$2 \left(F_{mj} \sin \frac{\beta}{2} + f_{mj} \cos \frac{\beta}{2} \right) - G = 0 \quad (8)$$

临界条件:钵体即将脱落,有最大值

$$f_{mj} = \mu_{mj} F_{mj} \quad (9)$$

式中 μ_{mj} ——取苗爪与钵体两侧的摩擦因数

将式(9)代入式(8)得

$$F_{mj} = \frac{G}{2 \left(\sin \frac{\beta}{2} + \mu_{mj} \cos \frac{\beta}{2} \right)} \quad (10)$$

设置取苗爪夹持角 β 与钵体两侧面夹角相同,为保证钵体不掉落,应有

$$F_{mj} \geq \frac{G}{2 \left(\sin \frac{\beta}{2} + \mu_{mj} \cos \frac{\beta}{2} \right)} \quad (11)$$

相关研究表明,穴盘苗钵体具有黏弹性,韩绿化等^[15-16]利用流变学方法研究钵体压缩力-松弛特性曲线(图 8)。由图 8 可知,取苗爪对钵体施加的正压力 F_{mj} 与加载距离正相关。钵体属于黏弹性体,达到所需加载距离后,保持变形到一定时间,正压力随时间发生变化(即松弛曲线),松弛时间越长,表现出弹性应变能力越强,松弛时间越短,表现出黏性越显著,基质颗粒因受压而滑移,钵体抗压能力弱,易变形。综上分析可知:对于同一生长状态的穴盘苗,取苗爪两侧的加载距离是影响夹苗效果的重要因素。

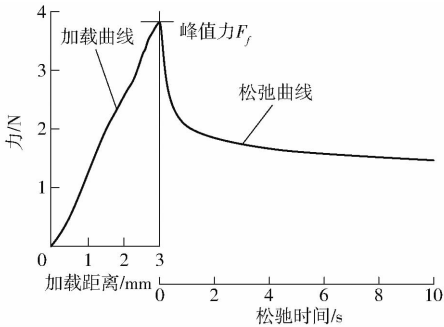


图 8 钵体典型压缩力-松弛特性曲线^[15]

Fig. 8 Typical compression-relaxation curves of lump of mud

3 基于 EDEM 的仿真设计

离散单元法 (DEM) 是一种研究非连续介质问题的数值模拟方法,可以有效模拟穴盘苗钵体可塑性,钵体与穴盘之间的粘连性。通过基于 EDEM 的仿真试验设计,分析各影响因素对末端执行部件取

苗效果的影响,优选出最优参数组合。

3.1 钵体物理性能参数测定

钵体是取苗末端执行部件直接作用对象,其物理性能参数是建立钵体离散元模型的基础,是影响取苗效果重要因素。以苗龄 25 d,育苗基质配比草炭、蛭石、珍珠岩为 4:1:1,钵体平均含水率 80%,128 穴(8×16)穴盘培育的生菜苗为对象,进行参数测定。

3.1.1 密度测定与计算

随机选取 30 株生菜苗,测定单株钵体平均质量 9.80 g,单株钵体平均体积 13.89 cm³,计算得钵体密度 0.705 5 g/cm³。

3.1.2 抗剪强度测定

通过直接剪切试验进行不同载荷条件下钵体抗剪强度测定,如表 1 所示。

表 1 不同载荷条件下的抗剪强度

Tab.1 Shear strength under different longitudinal loads

纵向载荷 σ /kPa	50	100	150	200
抗剪强度 τ /kPa	38.0	54.9	78.2	89.4

根据试验数据,以抗剪强度 τ 为纵坐标,纵向载荷 σ 为横坐标,采用数值分析的方法,利用最小二乘法进行曲线拟合,绘制直接剪切试验强度曲线,如图 9 所示。

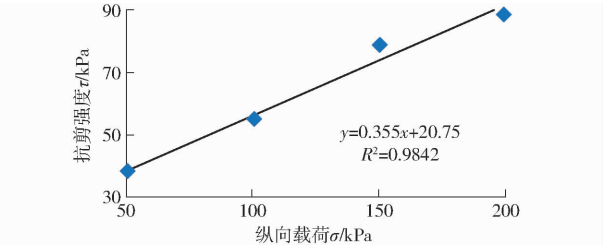


图 9 钵体抗剪强度曲线

Fig.9 Shear strength curve of lump of mud

得钵体抗剪强度 τ 与纵向载荷 σ 的关系式为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \tag{12}$$

即钵体粘聚力 C 为 20.75 kPa,摩擦因数为 0.355,内摩擦角 φ 为 19.55°,基于此计算泊松比

$$\mu = \frac{k_0}{1 + k_0} \tag{13}$$

其中 $k_0 = 1 - \sin \varphi$

式中 μ ——泊松比

k_0 ——静止侧压系数

将内摩擦角 φ 代入得泊松比为 0.4。

3.1.3 弹性模量测定

钵体具有黏弹性,通过三轴压缩试验区分弹性应变与塑性应变,并根据弹性模量计算公式

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\frac{\Delta h}{h}} \tag{14}$$

式中 $\Delta \sigma$ ——纵向载荷变化量,kPa

Δh ——钵体弹性变形量,mm

h ——钵体固结后的高度,mm

计算得弹性模量 E 为 4.47×10^3 kPa。

由剪切模量计算公式

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{15}$$

计算得剪切模量 G 为 1.596×10^3 kPa。

3.2 基于 EDEM 钵体离散元模型建立

实际顶、夹取苗过程,钵体内部基质颗粒变形、破损、滑移等情况无法直接观测,本文基于 EDEM 软件,可视化仿真分析取苗末端执行部件对钵体的影响。

3.2.1 颗粒模型

本文研究钵体基质主要由草炭、蛭石、珍珠岩按 4:1:1 配比而成,参考实际基质颗粒形状来建立颗粒模型有助于提高仿真结果有效性、真实性,现有研究表明,草炭颗粒包含块状、核状、柱状,蛭石颗粒主要为片状,珍珠岩颗粒主要为类球状。基于基质颗粒实际形状、成分配比和相关研究结果建立 EDEM 颗粒模型,如图 10 所示,并设置草炭 3 种颗粒模型半径呈正态分布,平均值 0.3 mm,标准差 0.1 mm,蛭石颗粒模型半径 0.4~1 mm 随机分布,珍珠岩颗粒模型半径 1.5~3 mm 随机分布,颗粒块状、核状、柱状、片状、类球状质量分数为 22%、22%、22%、17%、17%。顶苗杆组和取苗爪材料为 45 号钢、穴盘材料为聚苯乙烯,查阅文献[17-18],在 EDEM 中设定材料和颗粒属性,如表 2 所示。



图 10 EDEM 颗粒模型

Fig.10 EDEM particle model schematic

3.2.2 边界模型

基于穴盘实际尺寸,利用 SolidWorks 软件绘制出单个钵穴模型,导入 EDEM 软件中作为生成钵体的边界模型使用。设定颗粒工厂参数,生成总质量 9 g,生成速率 30 g/s,待颗粒生成并静置一段时间,在 Geometries 中设置刮板,沿钵穴上口将多余的基质颗粒清除,最后处于钵穴内颗粒如图 11 所示。

3.2.3 接触模型

穴盘苗根系在基质中生长、盘结,钵体具有一定含水率。根系、水分与基质颗粒相互作用,使得钵体具备压缩特性和黏性。选用 EEPA 接触模型作为颗

表 2 EDEM 材料属性参数
Tab.2 Material properties of EDEM

项目	参数	数值
颗粒	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.705 5
	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.596×10^6
顶苗杆组、取苗爪	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7.85
	泊松比	0.269
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
穴盘	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.9
	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	1.06×10^9
颗粒-颗粒	恢复系数	0.2
	静摩擦因数	0.650
	动摩擦因数	0.345
颗粒-穴盘	恢复系数	0.4
	静摩擦因数	0.441
	动摩擦因数	0.272
颗粒-顶苗杆组、取苗爪	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.397
	动摩擦因数	0.261

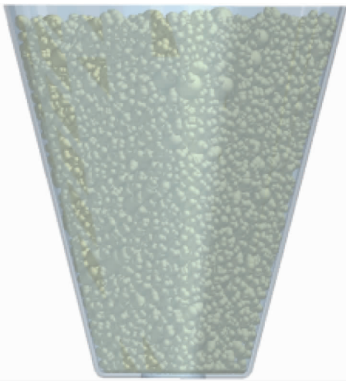


图 11 颗粒生成结果
Fig.11 Particle generation result

粒间接触模型,由于水环力和水膜张力存在,将该模型同时设置为颗粒与穴盘、颗粒与取苗末端执行部件之间的接触模型^[19-20]。查阅文献[17],在 EDEM 软件中设定参数,黏附强度 $f_0 = -0.002\text{ N}$,接触黏附能 $\Delta\gamma = 3.5\text{ J/m}^2$,接触塑性比 $\lambda_p = 0.6$,重叠指数 $n = 1.5$,黏性分离指数 $X = 1$,切向刚度系数 $\xi_{tm} = 0.4$ 。

3.3 仿真试验

通过穴盘苗钵体的力学分析,得出影响取苗效果的因素为:顶针直径、顶针长度、顶针表面粗糙度、顶杆直径、顶杆端面型式、加载距离以及顶苗速度。明确顶杆对钵体沿顶出方向有效作用面积越大,顶苗效果越好,为便于顶杆顺利插入标准 128 穴(8×16)穴盘底孔(直径 7 mm),设定顶杆直径为 5 mm,顶杆端面型式为平面。为保证试验条件相同,顶针表面粗糙度无特殊处理。

通过 Box - Behnken 仿真试验分析顶针直径、顶针长度和顶苗速度等因素对顶苗效果的影响,得出最优参数组合。基于顶苗试验的最优参数组合,通过单因素试验分析不同加载距离对于夹苗效果的影响。

3.3.1 顶苗仿真试验

以生成的 EDEM 钵体离散元模型为对象,以顶针直径、顶针长度和顶苗速度为影响因素进行 Box - Behnken 试验。通过前期多次预试验发现,顶针直径小于 1 mm 时易弯曲损坏,顶针直径大于 3 mm 时不易完全插入钵体,经验证设定顶针直径取值范围 1~3 mm;标准 128 穴(8×16)盘培育的钵体平均高度为 40 mm,顶针长度小于 10 mm 时,钵体不易稳固在顶针上,顶针长度大于 30 mm 时,顶针易穿透钵体,损伤钵体根系,经验证设定顶针长度取值范围 10~30 mm;顶苗速度过小,取苗效率低;顶苗速度过大,顶苗杆易穿透钵体,钵体底面形变明显,同时钵体容易从顶苗杆脱落,经验证设定顶苗速度取值范围 0.2~0.6 m/s。综合分析确定因素编码,如表 3 所示。

表 3 因素编码
Tab.3 Factors and codes

编码	因素		
	顶针直径 A/mm	顶针长度 B/mm	顶苗速度 $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	1	10	0.2
0	2	20	0.4
1	3	30	0.6

以钵体底面与顶杆端面在速度方向上坐标差 H 为评价指标,衡量顶针是否完全插入钵体以及钵体底部的形变程度。 H 为正值,表明顶针未完全插入钵体; H 为负值,表明顶针完全插入钵体,并造成钵体底部损伤变形, H 绝对值越大,钵体底部损伤变形越大。Box - Behnken 试验设计方案与结果如表 4 所示。

对表 4 的试验模型进行方差分析,结果如表 5 所示,结果表明:模型显著水平 $P < 0.01$,模型极显著;失拟项显著水平 $P > 0.05$,模型不失拟。该模型中,各因素对于评价指标——坐标差的影响极显著,并且各因素彼此有显著的交互作用。

在试验水平范围内,各因素与坐标差关系曲线如图 12 所示(参考点为各因素零水平值):坐标差与顶针直径、顶针长度均为正相关,坐标差与顶苗速度为负相关;坐标差均有正负值,即顶针直径和长度过小,易造成钵体底部损伤形变,顶针直径和长度过大,顶针不易完全插入钵体,钵体稳固效果差。

表 4 顶苗试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and results of jacking seedling				
序号	因素			坐标差 H/mm
	顶针直径 A/mm	顶针长度 B/mm	顶苗速度 C/(m·s ⁻¹)	
1	1	10	0.4	-2.4
2	3	10	0.4	-2.6
3	1	30	0.4	0.6
4	3	30	0.4	12.6
5	1	20	0.2	-0.4
6	3	20	0.2	7.7
7	1	20	0.6	-3.7
8	3	20	0.6	-1.3
9	2	10	0.2	-1.4
10	2	30	0.2	10.4
11	2	10	0.6	-5.9
12	2	30	0.6	2.3
13	2	20	0.4	-0.3
14	2	20	0.4	-0.1
15	2	20	0.4	-0.6
16	2	20	0.4	-0.2
17	2	20	0.4	-0.4

表 5 坐标差回归模型方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression model of difference between coordinates					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	384.55	9	42.73	385.68	<0.000 1 **
A	62.16	1	62.16	561.09	<0.000 1 **
B	182.41	1	182.41	1 646.47	<0.000 1 **
C	77.50	1	77.50	699.56	<0.000 1 **
AB	37.21	1	37.21	335.87	<0.000 1 **
AC	8.12	1	8.12	73.32	<0.000 1 **
BC	3.24	1	3.24	29.25	0.001 0 **
A ²	2.68	1	2.68	24.17	0.001 7 **
B ²	10.41	1	10.41	93.98	<0.000 1 **
C ²	0.040	1	0.040	0.36	0.566 7
残差	0.78	7	0.11		
失拟项	0.63	3	0.21	5.65	0.063 8
误差	0.15	4	0.037		
合计	385.32	16			

注：**表示极显著(P<0.01)。

固定顶苗速度为 0.4 m/s,顶针直径、顶针长度与坐标差的响应曲面如图 13 所示:顶针直径较小时,坐标差随顶针长度增大而增大,增大速度较慢;顶针直径较大时,坐标差随顶针长度增大而增大,增大速度较快;顶针长度较小时,坐标差随顶针直径增大而增大,增大速度较慢;顶针长度较大时,坐标差随顶针直径增大而增大,增大速度较快。

固定顶针长度为 20 mm,顶针直径、顶苗速度与坐标差的响应曲面如图 14 所示:顶针直径较小时,

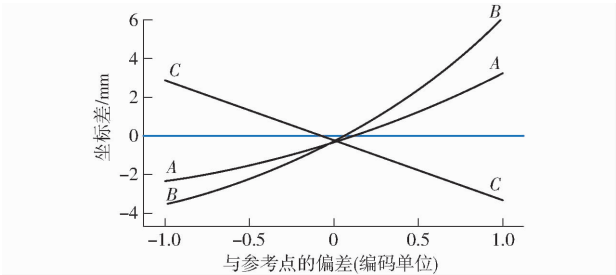


图 12 各因素与坐标差关系曲线

Fig. 12 Relationship between each factor and difference between coordinates

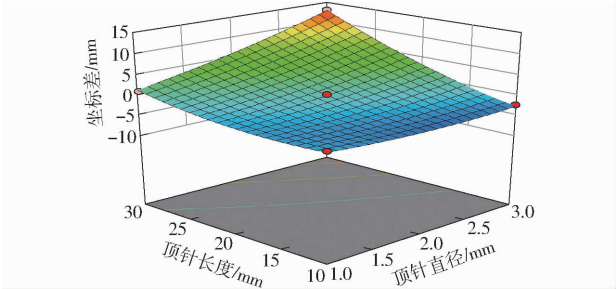


图 13 顶针直径、顶针长度与坐标差的响应曲面
(C=0.4 m/s)

Fig. 13 Response surface between needle diameter, needle length and difference between coordinates (C=0.4 m/s)

坐标差随顶苗速度增大而减小,减小速度较慢;顶针直径较大时,坐标差随顶苗速度增大而减小,减小速度较快;顶苗速度较小时,坐标差随顶针直径增大而增大,增大速度较快;顶苗速度较大时,坐标差随顶针直径增大而增大,增大速度较慢。

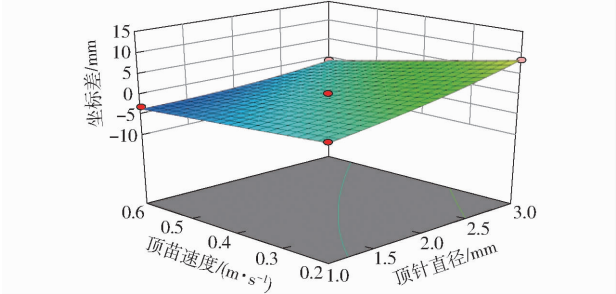


图 14 顶针直径、顶苗速度与坐标差的响应曲面
(B=20 mm)

Fig. 14 Response surface between needle diameter, jacking velocity and difference between coordinates (B=20 mm)

固定顶针直径为 2 mm,顶针长度、顶苗速度与坐标差的响应曲面如图 15 所示:顶针长度较小时,坐标差随顶苗速度增大而减小,减小速度较慢;顶针长度较大时,坐标差随顶苗速度增大而减小,减小速度较快;顶苗速度较小时,坐标差随顶针长度增大而增大,增大速度较快;顶苗速度较大时,坐标差随顶针长度增大而增大,增大速度较慢。

根据农艺要求,钵体底部损伤越小,移栽成活率越高,以坐标差 H=0 mm 为目标,通过 Design-

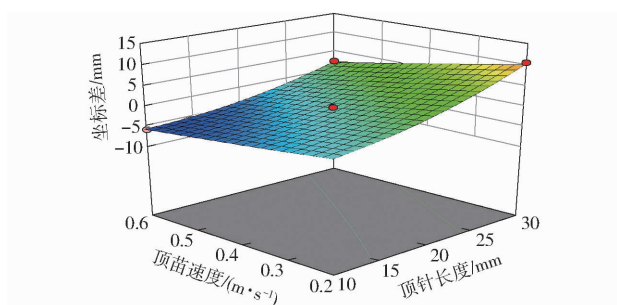


图 15 顶针长度、顶苗速度与坐标差的响应曲面

($A = 2 \text{ mm}$)

Fig. 15 Response surface between needle length, jacking velocity and difference between coordinates ($A = 2 \text{ mm}$)

Expert 软件优化仿真结果,得到一组最优解:顶针直径 1.9 mm,顶针长度 18 mm,顶苗速度为 0.3 m/s。

3.3.2 夹苗仿真试验

基于顶苗仿真试验所得顶苗最优参数组合,以顶出后稳定在顶苗杆组上的钵体为研究对象,采用单变量控制法,分别设定加载距离为 2、4、6、8 mm,研究加载距离对夹苗效果的影响。经由顶苗杆组顶出的钵体上端面为 28 mm × 28 mm 正方形。

如图 16 所示,加载距离为 2 mm 时,上端面为 26 mm × 28 mm 矩形,仅于加载方向发生压缩变形,颗粒间接触力在 $2.54 \times 10^{-9} \text{ N}$ 以上,力链^[21]紧凑,颗粒与取苗爪的接触着力点分布稀疏,未完全覆盖钵体侧面。

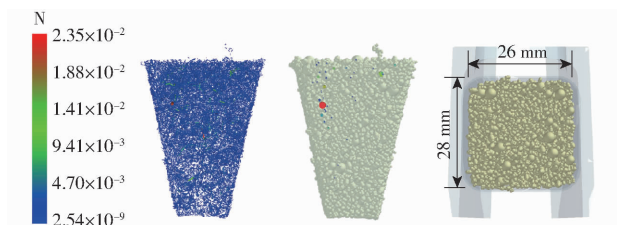


图 16 加载距离 2 mm 时法向力与压缩变形

Fig. 16 Normal force and compression deformation under compressing 2 mm

如图 17 所示,加载距离为 4 mm 时,上端面为 24 mm × 29.5 mm 矩形,加载方向发生压缩变形,同时垂直于加载方向上发生膨胀变形,变形量为 1.5 mm,颗粒间接触力在 $3.43 \times 10^{-8} \text{ N}$ 以上,力链紧凑,颗粒与取苗爪的接触着力点分布均匀,完全覆盖钵体侧面。

如图 18 所示,加载距离为 6 mm 时,上端面为 22 mm × 32 mm 矩形,加载方向发生压缩变形,同时垂直于加载方向上发生膨胀变形,变形量为 4 mm,颗粒间接触力在 $1.53 \times 10^{-8} \text{ N}$ 以上,力链较稀疏,颗粒与取苗爪的接触着力点分布均匀,完全覆盖钵体侧面。

如图 19 所示,加载距离为 8 mm 时,上端面为

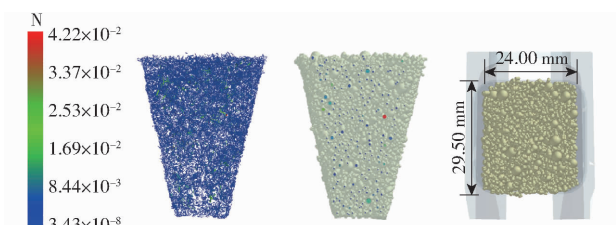


图 17 加载距离 4 mm 时法向力与压缩变形

Fig. 17 Normal force and compression deformation under compressing 4 mm

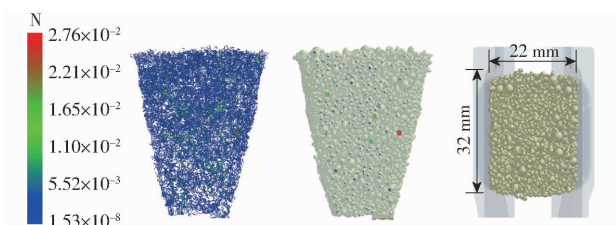


图 18 加载距离 6 mm 时法向力与压缩变形

Fig. 18 Normal force and compression deformation under compressing 6 mm

20 mm × 34.5 mm 矩形,加载方向发生压缩变形,同时垂直于加载方向上发生膨胀变形,变形量为 6.5 mm,颗粒间接触力在 $1.80 \times 10^{-8} \text{ N}$ 以上,力链稀疏,颗粒与取苗爪的接触着力点分布均匀,完全覆盖钵体侧面。

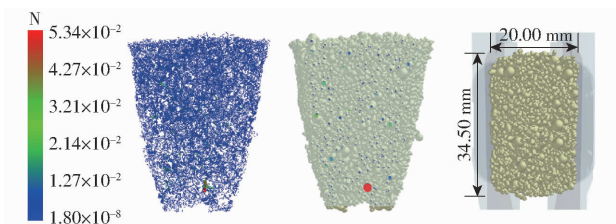


图 19 加载距离 8 mm 时法向力与压缩变形

Fig. 19 Normal force and compression deformation under compressing 8 mm

查阅相关资料,钵体受压初期,随着钵体的变形量增大其抗压力缓慢增大;当达到一定的加载距离后,随着加载距离的增大其抗压力快速增大。分析得:受压初期,变形量与抗压力的关系体现钵体的生物屈服软化特性,该阶段的变形主要是基质空隙的压缩和基质颗粒间的滑移与重新排列,钵体较松弛;当达到一定的加载距离,变形量与抗压力的关系体现钵体的生物压实硬化特性,该阶段的变形主要是基质颗粒、根系压缩变形。通常为达到取苗夹取力的要求,对钵体的夹持会达到生物硬化阶段^[22]。

夹苗仿真试验显示,上述 4 种不同加载距离下,夹苗均未出现钵体脱落。加载距离为 4 mm 时,颗粒间接触力最大,力链紧凑,即钵体内部稳定性最强。随着加载距离的增大,颗粒与取苗爪的接触着

力点分布逐渐密实,且对于取苗爪与钵体接触面的覆盖程度越来越高,即对钵体的夹持稳定性越高,但同时钵体整体变形增大,颗粒间力链由强变弱。为同时满足取苗过程中钵体夹持牢固和变形小两方面需求,尽可能保持其原有结构稳定性,综合分析优选夹苗加载距离为 4 mm。

4 试验

基于 EDEM 仿真设计,设定顶夹取苗末端执行部件结构参数和工作参数:顶杆直径为 5 mm,顶杆端面型式为平面,顶针表面粗糙度无特殊处理,顶针直径 1.9 mm,顶针长度 18 mm,顶苗速度 0.3 m/s,夹苗加载距离 4 mm。

如图 20 所示,选用北京中农富通园艺有限公司培育的生菜苗为试验对象,穴盘规格 128 穴(8 × 16),苗龄 25 d,达到移栽要求。随机检测同一批次穴盘苗钵体平均含水率 80%,育苗基质草炭、蛭石、珍珠岩配比为 4:1:1。通过单向节流阀控制安装在顶苗气缸活塞端的顶苗杆以速度 0.3 m/s 将穴盘苗顶出,取苗爪侧向夹持顶出的钵体,在顶苗杆与钵体彻底分离后,通过多个气缸协同驱动,剪叉式等距分苗机构带动取苗爪移动至导苗筒正上方,取苗爪松开钵体完成投苗,整个试验取投苗频率设置为 100 株/min。试验评价指标为取苗成功率 S 。根据取苗装置的工作原理,统计记录顶苗失败率 S_1 ,即顶杆未能将穴盘苗从穴盘中顶出、顶出后钵体不能稳固在顶针上的概率;夹苗失败率 S_2 ,即取苗爪将钵体夹碎、移动过程中钵体掉落概率;投苗失败率 S_3 ,即投苗后,穴盘苗不能准确落入分苗筒的概率。各项指标计算公式为

$$S = \frac{N - N_1 - N_2 - N_3 - N_4 - N_5}{N} \times 100\% \quad (16)$$

$$S_1 = \frac{N_1 + N_2}{N} \times 100\% \quad (17)$$

$$S_2 = \frac{N_3 + N_4}{N - N_1 - N_2} \times 100\% \quad (18)$$

$$S_3 = \frac{N_5}{N - N_1 - N_2 - N_3 - N_4} \times 100\% \quad (19)$$

- 式中 N —— 试验总取苗个数
 N_1 —— 未顶出的穴盘苗个数
 N_2 —— 顶出后钵体未能稳固在顶针上,掉落的穴盘苗个数
 N_3 —— 钵体被取苗爪夹碎的穴盘苗个数
 N_4 —— 取苗爪夹持移动过程中掉落的穴盘苗个数

N_5 —— 投苗时未能准确落入分苗筒的穴盘苗个数

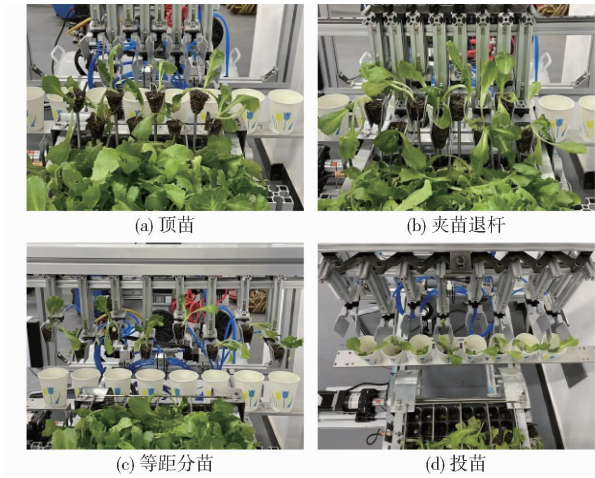


图 20 顶夹取苗末端执行部件取苗试验

Fig. 20 Seedling taking tests for jacking and clamping components

试验结果为 $N = 252$,其中 $N_1 = 10, N_2 = 2, N_3 = 3, N_4 = 0, N_5 = 2$,顶苗失败率 S_1 为 4.76%,夹苗失败率 S_2 为 1.25%,投苗失败率 S_3 为 0.84%。基于 EDEM 仿真优化设计的顶夹取苗末端执行部件,在将苗从育苗穴盘中取出并投放至分苗筒的实际取苗试验中,取苗成功率 93.25%,满足叶菜类蔬菜穴盘苗自动旱地移栽取苗要求。

5 结论

- (1) 针对顶夹结合式取苗装置易出现顶苗失败、钵体受压变形严重、基质块破损等问题,对顶夹取苗装置的末端执行部件进行优化设计。分别建立顶苗和夹苗过程力学分析模型,分析筛选出影响取苗效果的主要因素为顶针直径、顶针长度、加载距离和顶苗速度。
- (2) 以 128 穴(8 × 16)生菜苗为对象,基于 EDEM 软件,选用 EEPA 接触模型,建立穴盘苗钵体模型。选用 Box - Behnken 设计法进行顶苗仿真试验设计,分析不同因素对于顶苗试验效果的影响,以坐标差 0 mm 为目标,得到一组最优参数组合为:顶针直径 1.9 mm、顶针长度 18 mm、顶苗速度 0.3 m/s。基于顶苗仿真试验所得顶苗最优参数组合,以顶出后稳定在顶苗杆组上的钵体为研究对象,采用单变量控制法,优选夹苗加载距离为 4 mm。
- (3) 基于 EDEM 仿真优化设计结果,进行实际取投苗验证试验,在取投苗频率为 100 株/min 时,取苗成功率 93.25%,满足叶菜类蔬菜穴盘苗自动旱地移栽取苗要求。

参 考 文 献

- [1] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 96–104.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, ZHANG Yu, et al. Development of insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 96–104. (in Chinese)
- [2] 孙国祥, 汪小昆, 何国敏, 等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 48–53.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, HE Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 48–53. (in Chinese)
- [3] 胡建平, 刘育彤, 刘伟, 等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 110–117, 184.
HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experimental research on combined seedling picking device with top clamping and pulling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Sup. 1): 110–117, 184. (in Chinese)
- [4] 韩绿化, 毛罕平, 赵慧敏, 等. 蔬菜穴盘育苗底部气吹式钵体松脱装置设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 37–45.
HAN Lùhua, MAO Hanping, ZHAO Huimin, et al. Design of root lump loosening mechanism using air jets to eject vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 37–45. (in Chinese)
- [5] PARISH R L. Current developments in seeders and transplanters for vegetable crops[J]. Horttechnology, 2005, 15(2): 346–351.
- [6] 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)
- [7] 崔巍, 赵亮, 刘立晶, 等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 79–84, 98.
CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 2): 79–84, 98. (in Chinese)
- [8] 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 rail for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 116–125. (in Chinese)
- [9] 陈斌, 胡广发, 刘文, 等. 蔬菜自动移栽机对置秧盘交替自动取投苗机构研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 131–139, 151.
CHEN Bin, HU Guangfa, LIU Wen, et al. Alternate automatic seedling picking and dropping mechanism based on symmetrically arranged seedling trays for automatic vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 131–139, 151. (in Chinese)
- [10] ISAO M. Seedling transportation apparatus for transplantation machine: 5784984[P]. 1998–06–28.
- [11] 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): 1–8.
- [12] 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)
- [13] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100–111.
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100–111. (in Chinese)
- [14] 贾广鑫. 链勺式人参精密播种机设计与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
JIA Guangxin. Design and experiment of chain-spoon type ginseng precision seeder[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] 韩绿化, 赵峥嵘, 马国鑫, 等. 蔬菜穴盘苗钵体压缩-力松弛特性[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 271–274.
- [16] 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 Lùhua, 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)
- [17] 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)

- XUE Zhong, ZHAO Liang, WANG Fenghua, et al. Performance simulation test of the spiral fertilizer distributor based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(5): 548–553. (in Chinese)
- [19] 李鑫,姜新波,纪欣鑫,等. 基于遗传算法的螺旋双轮排肥器优化设计与试验[J/OL]. 河南农业大学学报:1–12[2023–08–29]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20230619.001>.
LI Xin, JIANG Xinbo, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiments of double-spiral fertilizer discharge device based on genetic algorithm[J/OL]. Journal of Henan Agricultural University:1–12[2023–08–29]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20230619.001>. (in Chinese)
- [20] ZHENG W Q, ZHANG L P, ZHANG L X, et al. Reflux problem analysis and structure optimization of the spiral grooved-wheel fertilizer apparatus[J]. Int. J. Simul. Model, 2020, 3(19): 422–433.
- [21] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):10–16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):10–16. (in Chinese)
- [22] 洪致育,林良明. 连续运输机[M]. 北京:机械工业出版社,1981
- [23] 顿国强,刘文辉,杜佳兴,等. 弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):118–125,174.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, DU Jiaying, et al. Optimal design and experiment of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 118–125,174. (in Chinese)
- [24] 《运输机械设计选用手册》编辑委员会. 运输机械设计选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [25] 张涛然,晁晓洁,郭丽红,等. 材料力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2018.
- [26] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2016.
- [27] 常新宇,张瑞君,王绍中,等. 矩形截面扭转弹簧扭矩的预置扭矩检测法[J]. 理化检验(物理分册),2019,55(11):753–754.
CHANG Xinyu, ZHANG Ruijun, WANG Shaozhong, et al. Preset torque detection method of torque of torsional spring with rectangular cross section[J]. PTCA, 2019, 55(11): 753–754. (in Chinese)
- [28] 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [29] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):57–68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57–68. (in Chinese)
- [30] TOURLONIAS M, BUENO M A, FASSI G, et al. Influence of friction angle between carbon single fibres and tows: experimental analysis and analytical model[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019,124: 105478.
- [31] 董秀茹,王迪,刘强. 非耕农用地耕种功能恢复适宜性评价模型构建[J]. 农业工程学报,2023,39(12):226–235.
DONG Xiuru, WANG Di, LIU Qiang. Construction of the suitability evaluation model for the cultivated function recovery of non-grain cultivated land[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(12):226–235. (in Chinese)
- [32] 施肥机械质量评价技术规范:NY/T 1003—2006[S]. 北京:中国农业出版社,2006.

(上接第 124 页)

- [18] 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)
- [19] 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 Xingting, 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)
- [20] 冯世杰. 基于活动苗盘的油菜钵苗取苗系统及钵体破损机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.
FEN Shijie. Study on pick-up system and pot body damage mechanism of rape pot seedling based on movable tray[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [21] 孙其诚,王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报,2008, 57(8): 4667–4674.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. Acta Phys. Sin., 2008, 57(8): 4667–4674. (in Chinese)
- [22] 文永双. 蔬菜穴盘苗自动移栽关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2021.
WEN Yongshuang. Research on key technology of automatic transplanting for vegetable plug seedlings[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)