

基于DEM-MFBD的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验

侯加林<sup>1,2</sup> 张二鹏<sup>1,2</sup> 张康博<sup>1,2</sup> 李玉华<sup>1,2</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

**摘要:** 针对现有辣椒移栽机取苗成功率低、损伤率高、稳定性差的问题,设计了一种插夹联动式末端执行器,基于整排取苗、间隔投苗的取投苗作业形式设计了气动控制系统,分析了取投苗装置结构及工作原理,建立了末端执行器运动学、动力学模型,以薄皮椒钵苗为研究对象开展力学特性试验,结合取苗过程边界条件确定了末端执行器主要参数范围;通过ADAMS运动轨迹仿真与FluidSIM-P 3.6气动系统仿真分析,验证了取投苗装置结构设计与气动时序的合理性;通过DEM-MFBD联合仿真对取苗情况进行了可视化分析,为末端执行器关键参数优化提供依据。通过单因素试验明确了各关键因素对取苗成功率与基质损失率的作用规律;设计正交试验,通过方差分析、响应面分析与多目标寻优得出最优参数组合为:取苗针间距12.25 mm、取苗针入土角50.37°、取苗针行程14.21 mm。台架验证试验得出:取苗成功率为97.92%、基质损失率为2.21%,与回归模型预测值误差分别为0.49%、3.8%,无茎秆损伤现象,取投苗效果良好。

**关键词:** 辣椒移栽机; 力学特性; 插夹联动式末端执行器; 正交试验; DEM-MFBD

**中图分类号:** S223.92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2023)12-0046-12

**OSID:**



Optimization Design and Test of Seedling Picking and Throwing Device of Plug Seeding Transplanter Based on DEM-MFBD

HOU Jialin<sup>1,2</sup> ZHANG Erpeng<sup>1,2</sup> ZHANG Kangbo<sup>1,2</sup> LI Yuhua<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low seedling picking success rate, high damage rate and poor stability of pepper transplanter, a kind of clamp-puncture end effector and pneumatic system was proposed based on the operation mode of taking seedlings in whole row and throwing seedlings at intervals. The structural configuration and working principle of device was analyzed and the kinematics and dynamic model was established. Based on the physical characteristics of pepper plug seedlings and analysis of boundary condition, the main parameters range of the newly improved end effector was determined. Simulation test based on ADAMS and FluidSIM-P 3.6 were carried out to verify the reasonability of the structure and response time sequence of pneumatic actuator. The coupling simulation test based on EDEM and RecurDyn turned out that the improved structure had a better performance. Aiming at the success rate of seedlings picking and the loss rate of substrate, single factor test and analysis were carried out on the key factors such as needle interval, needle insertion stroke and needle insertion angle. According to the results of single factor test, the orthogonal test, variance analysis and response surface analysis were carried out. The optimal parameters were obtained as follows: needle interval was 12.25 mm, needle insertion angle was 50.37°, needle insertion stroke was 14.21 mm, the seeding picking success rate, substrate loss rate were respectively 97.44% and 2.13%. Bench verification test showed that the success rate of seedling extraction was 97.92% and the matrix loss rate was 2.21%. The relative error between verification result and the predicted value was less than 5%.

**Key words:** pepper transplanter; physical characteristics; clamp-puncture end effector; orthogonal test; DEM-MFBD

收稿日期: 2023-04-24    修回日期: 2023-06-26

**基金项目:** 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC010611)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-D-01)和山东省现代农业产业技术体系蔬菜产业创新团队项目(SDAIT-05-11)

**作者简介:** 侯加林(1963—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jlh@sdau.edu.cn

**通信作者:** 李玉华(1983—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: liyuhua@sdau.edu.cn

## 0 引言

我国是世界最大辣椒生产国<sup>[1-2]</sup>,辣椒的移栽作业多以人工移栽或半自动移栽方式为主。其中人工移栽劳动强度大、成本高且效率低;半自动移栽采用人工取苗、投苗与机械栽植相结合的方式,作业强度有所降低,但效率低且损伤率高的弊端没有得到有效改善<sup>[3-4]</sup>。国内移栽机的取投苗装置多存在结构复杂、取苗成功率低、伤苗率高等问题<sup>[5-6]</sup>。因此,研制一款高效、低损的取投苗装置对提高辣椒移栽质量、降低作业强度、推进我国移栽技术与装备的研究具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

为解决取投苗环节技术难题,国内外学者进行了大量研究。ISLAM 等<sup>[9]</sup>通过运动学分析、虚拟仿真和验证测试确定了最适合夹取式取苗机构的尺寸。俞高红等<sup>[10]</sup>提出一种夹钵式非圆齿轮行星轮系移栽取苗机构,通过人机交互方式进行了结构参数优化,可保证钵苗栽植后有较好的直立度。文永双等<sup>[11]</sup>结合顶出式与夹钵式设计了插入顶出式取苗装置,通过气缸驱动整排插入顶出机构将钵苗顶出穴盘,但钵体基质损失率较高。谢守勇等<sup>[12]</sup>设计了斜插夹钵式取苗装置,结构简单且取苗过程钵苗状态稳定。廖庆喜等<sup>[13]</sup>根据垂直穴盘取苗、平行铅垂线投苗的位置要求设计了一种往复夹取式取苗装置,进行了末端执行器运动轨迹的描述、提取、仿真与试验验证,可有效减小脱苗率与基质损失率。胡建平<sup>[14]</sup>设计了边插边夹的夹钵式取苗爪,通过仿真分析与优化可实现较高取苗成功率与钵体完整性,但由于振动冲击的影响,取苗速率不宜过快。韩长杰等<sup>[15]</sup>设计的夹茎式取苗装置采用整排取苗、间隔投苗的作业方式,可实现较高的移栽效率,但分苗过程钵苗摆幅较大、稳定性差、易造成茎秆弯曲损伤。王超等<sup>[16]</sup>设计了气动下压式取苗装置及配套的组合式穴盘,可按取苗时序将钵苗向下压出至投苗锥斗,结构简单且精度较高,但由于配套穴盘的尺寸限制,主要适用于展幅较小的作物。

综上,为解决取投苗装置存在的成功率低、钵苗损伤率高、作业稳定性差的问题,本文提出一种插夹联动式末端执行器(下文简称“末端执行器”),基于整排取苗、间隔投苗的作业方式进行气动系统的设计,通过理论分析、仿真模拟与试验对末端执行器结构参数进行分析与优化,以降低钵苗损伤、提高取苗成功率与稳定性。

## 1 取投苗装置结构与工作原理

### 1.1 取投苗装置结构

本文所研究的取投苗装置如图 1 所示,主要由

机架、升降气缸、移苗气缸、分苗气缸、末端执行器、分苗导轨、送苗导轨、机械阀、横架、安装架等组成。 $V_1 \sim V_3$ 与 $V_4 \sim V_6$ 分别表示取苗与投苗时升降气缸、移苗气缸与分苗气缸的运动方向; $V_7$ 表示钵苗下落运动方向。其中,末端执行器是取投苗装置的核心,主要由主体、夹持气缸、穿刺气缸、指夹、取苗针、连杆、圆柱销等组成,其结构及关键状态如图 2 所示。图中 $v$ 为钵苗下落方向; $s$ 为取苗针行程,mm; $d$ 为取苗针间距,mm; $\theta$ 为取苗针入土角, $(^\circ)$ 。

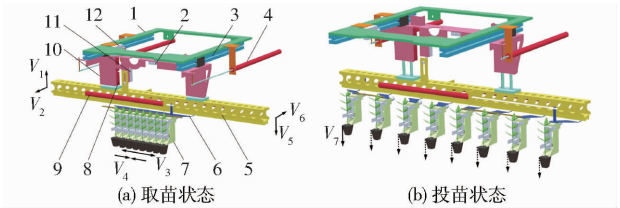


图 1 取投苗装置总成

Fig. 1 Assemblies of seeding picking and throwing device

1. 机架 2. 换向阀 I 3. 移苗导轨 4. 移苗气缸 5. 横架  
6. 分苗导轨 7. 末端执行器 8. 升降气缸 9. 分苗气缸 10. 安装架  
11. 换向阀 II 12. 换向阀 III

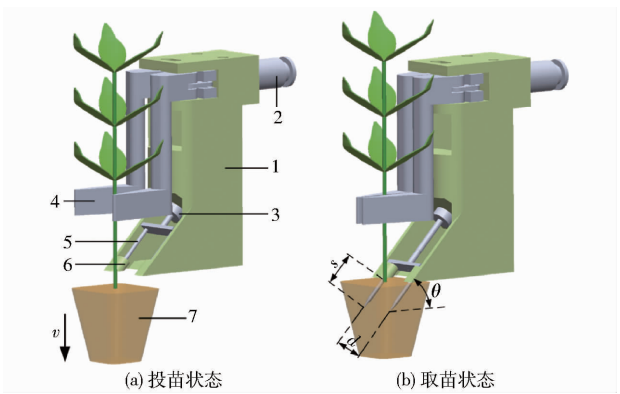


图 2 末端执行器结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of seeding-picking hand

1. 末端执行器主体 2. 夹持气缸 3. 穿刺气缸 4. 指夹 5. 取苗针 6. 限位导向装置 7. 钵体

### 1.2 取投苗装置工作原理

取投苗装置工作时,升降气缸推杆带动取苗架、分苗气缸及聚合状态的整排末端执行器下降至取苗高度,移苗气缸推杆带动安装架水平移动至取苗位置,末端执行器完成取苗后,升降气缸推杆收缩将钵苗拔出穴盘,移苗气缸推杆退回至投苗位置,分苗气缸将末端执行器分布于苗杯正上方,最后末端执行器完成投苗。

为实现插夹联动的取投苗动作,穿刺气缸与夹持气缸采用连通的进气管路,取苗时,指夹在夹持气缸控制下闭合以实现对茎秆的夹取,取苗针在穿刺气缸控制下插入钵体;投苗时,指夹在夹持气缸的控制下展开以实现对茎秆的释放,取苗针在导向限位装置的约束与穿刺气缸的控制下退出钵体。

## 2 钵苗力学特性分析

整排取苗与插夹联作业方式包含对钵苗的夹持、穿刺、拉拔、横移等动作。本文以苗龄 60 d 薄皮椒钵苗(基质所含泥炭、蛭石、珍珠岩体积比例为 3:1:1)为研究对象,通过岛津 EZ-SX 型单柱式电子万能试验机进行相关力学特性试验与分析,以期 为取投苗装置末端执行器结构与参数设计提供理论 依据。

### 2.1 拉拔力试验

基质含水率对根系发育状态、钵体附着程度以及拔取效果具有重要影响<sup>[17]</sup>,本文对基质含水率分别为 45%、55%、65% 的钵苗进行拉拔力试验。

由图 3b 可见,不同钵体基质含水率对应取苗拉拔力变化趋势相似:初始拉拔行程内,拉拔力上升速度较明显,到达拐点之后拉拔力迅速下降直至恒定。区别在于当含水率增加时,取出钵苗所需峰值拉拔力呈先增大后减小的趋势,根据上述试验得出:当基质含水率在 55% 附近时,所测峰值拉拔力  $F_{Lmax}$  为 2.62 N。

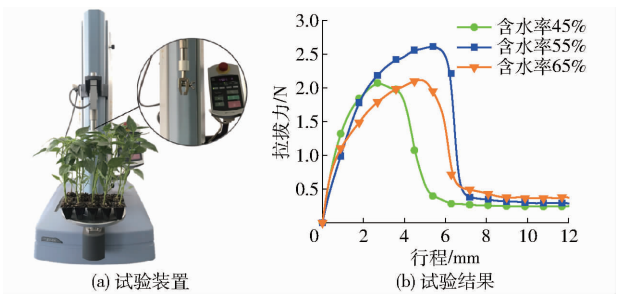


图 3 拉拔力试验  
Fig. 3 Test of drag force

### 2.2 钵体穿刺试验

为获得钵体基质的穿刺特性,选用直径为 2 mm 的柱形夹具(简称“穿刺针”)进行穿刺试验。当试验行程为 25 mm、加载速度为 60 mm/min、最大载荷为 500 N 时,试验结果如图 4 所示。图中  $P_1$ 、 $P_2$  为基质上表面达到抗穿刺屈服极限对应的载荷。

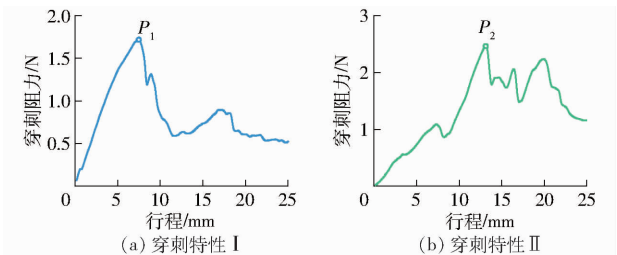


图 4 穿刺阻力-行程曲线  
Fig. 4 Puncture resistance - stroke curves

钵苗根系生长状况与形态分布不规则,穿刺针因受到主根、侧根、次生根的阻力大小不同,其穿刺

过程载荷变化趋势也较复杂。图 4a 所示穿刺针经过基质表面抗穿刺屈服点  $P_1$  后,平衡穿刺阻力的载荷逐渐减小;图 4b 所示穿刺针经过  $P_2$  后,载荷先产生小幅度下降,后上升至较高水平并伴随大幅度波动直至产生明显的下降趋势;综上,在本试验行程范围内的峰值穿刺阻力  $f_{pmax}$  为 2.45 N。

### 2.3 茎秆压缩试验

夹持力是影响茎秆损伤的重要因素之一<sup>[18]</sup>,为确定末端执行器夹持力合理范围,根据外形特征将茎秆划分为 AB(0~25 mm)段、BC 段(25~85 mm)、CD 段(85~145 mm),进行压缩试验。

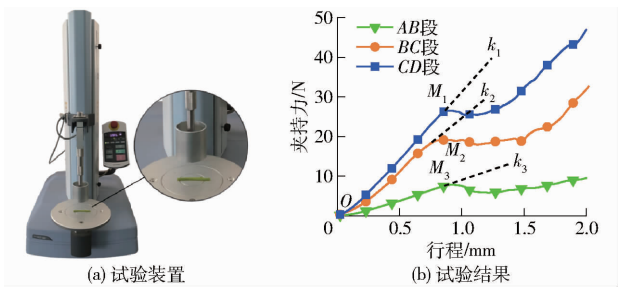


图 5 茎秆压缩试验  
Fig. 5 Compression tests of stem

如图 5b 所示,点  $O$  为初始接触点, $OM_i$  阶段压缩载荷随行程增大近似为线性增加,到达点  $M_i$  后,载荷增幅随行程的增加不再保持线性,点  $M_i$  之后载荷开始减小。以上曲线说明茎秆在  $OM_i$  段属于线性弹性变形阶段,点  $M_i$  为其生物屈服点,卸载后可恢复, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别为 CD 段、BC 段、AB 段茎秆压缩载荷随行程变化特性曲线的斜率。曲线斜率  $k_i$  可视为弹性模量  $E$ ;点  $M_i$  之后茎秆的变形与损伤为永久性不可恢复。故茎秆 AB、BC、CD 段可承受的压缩屈服极限  $N_y$  分别为 7、18、25 N。

### 2.4 茎秆弯曲试验

钵苗在育苗过程中存在茎秆位置偏离穴孔中心的现象,此时偏移的茎秆在末端执行器夹持作用下易弯曲;分苗过程中,在钵体惯性力作用下茎秆也会产生一定的弯曲。故为合理设计作业参数、避免弯曲对茎秆造成不可逆损伤,参考 GB/T 1927. 9—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 9 部分:抗弯强度测定》和 GB/T 1927. 10—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 10 部分:抗弯弹性模量测定》进行茎秆弯曲特性测定,如图 6 所示。

根据文献[19-20],弯曲探头加载速度越大时,茎秆可承受的弯曲破坏载荷越大,故本试验设定弯曲加载速度为 20 mm/min。如图 6b 所示,茎秆 AB 段、BC 段、CD 段弯曲破坏载荷  $F_b$  分别为 3.1、2.3、1.9 N。可见加载速度一定时,所测茎秆距离钵

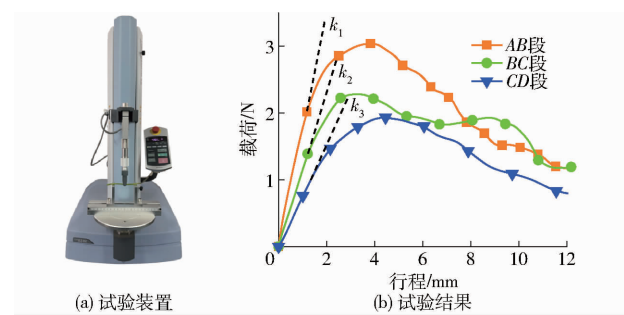


图 6 茎秆弯曲试验

Fig. 6 Bending test of stem

体越近,其可承受的弯曲破坏载荷与极限应力越大。 $AB$  段、 $BC$  段、 $CD$  段茎秆弯曲弹性模量分别为 47.6、35.8、29.6 MPa。

### 3 关键部件设计

为避免插夹联动式末端执行器机械结构对钵苗带来过度干涉损伤,结合运动理论分析、钵苗力学特性与取苗边界条件进行机构主要参数的设计。

#### 3.1 运动理论分析

末端执行器结构分为夹持部分与穿刺部分。不计杆件质量与摩擦,夹持部分运动学与动力学模型如图 7 所示。

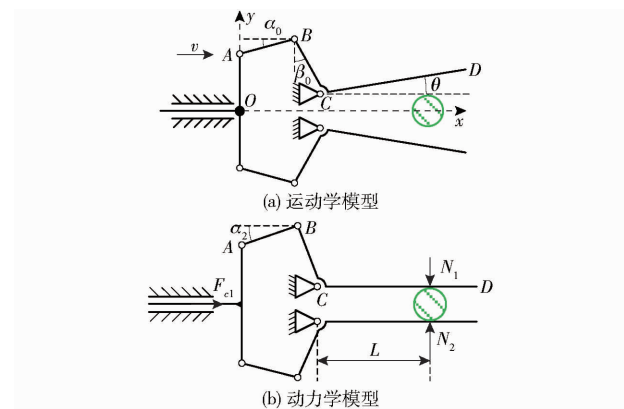


图 7 夹持结构运动学与动力学模型

Fig. 7 Kinematic and dynamics model of clamping structure

如图 7a 所示,以推杆末端点  $O$  为原点、推杆轴向为  $x$  轴、 $OA$  为  $y$  轴建立坐标系。初始状态时有

$$\begin{cases} A_0 = (0, L_{OA}) \\ B_0 = (L_{AB} \cos \alpha_0, L_{OA} + L_{AB} \sin \alpha_0) \\ C_0 = (L_{AB} \cos \alpha_0 + L_{BC} \sin \beta_0, \\ L_{OA} + L_{AB} \sin \alpha_0 - L_{BC} \cos \beta_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\alpha_0$ ——连杆初始状态水平夹角, ( $^\circ$ )

$\beta_0$ ——指夹末端初始状态竖直夹角, ( $^\circ$ )

设  $t_1$  时刻推杆沿轴向移动距离  $x$ ,  $AB$  杆与水平方向夹角为  $\alpha_1$ ,  $BC$  杆与竖直方向夹角为  $\beta_1$ , 则此时有

$$\begin{cases} A_{t_1} = (x, L_{OA}) \\ B_{t_1} = (x + L_{AB} \cos \alpha_1, L_{OA} + L_{AB} \sin \alpha_1) \\ C_{t_1} = (L_{AB} \cos \alpha_1 + L_{BC} \sin \beta_1, \\ L_{OA} + L_{AB} \sin \alpha_1 - L_{BC} \cos \beta_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\alpha_1 = \arctan \frac{y_{B_{t_1}} - y_{A_{t_1}}}{x_{B_{t_1}} - x_{A_{t_1}}} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{x_{B_{t_1}} - x_{C_{t_1}}}{y_{B_{t_1}} - y_{C_{t_1}}} \quad (4)$$

式中  $\alpha_1$ ——连杆  $t_1$  时刻水平夹角, ( $^\circ$ )

$\beta_1$ ——指夹末端  $t_1$  时刻竖直夹角, ( $^\circ$ )

$BC$  杆长度保持恒定, 式(1)、(2)可简化为

$$f(x, y) = 0 \quad (5)$$

此时, 推杆任一位置  $x$  下对应的  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  可求出, 令  $Q = \beta_1 - \beta_0$ , 联立式(1)~(5)则有

$$g(x, Q) = 0 \quad (6)$$

当取  $Q = \theta$  时, 得出所需的推杆最小运动距离  $x_{\min}$ 。

由图 7b 可知, 当末端执行器夹紧茎秆时, 末端执行器与茎秆间的夹持力学模型为

$$F_{c1} \cos \alpha_2 L_{AB} = \sum N_i L \quad (7)$$

式中  $F_{c1}$ ——夹持气缸推力, N

$N_i$ ——指夹对茎秆的夹持力, N

$L$ ——指夹夹持长度, mm

$\alpha_2$ ——夹紧时连杆水平夹角, ( $^\circ$ )

#### 3.2 取苗边界条件

取苗过程包含末端执行器对钵苗的夹取、穿刺、拉拔、横移分苗等复杂动作, 在此期间茎秆及钵体基质的关键受力状态如图 8 所示。图 8b 为左视图, 其余为主视图。

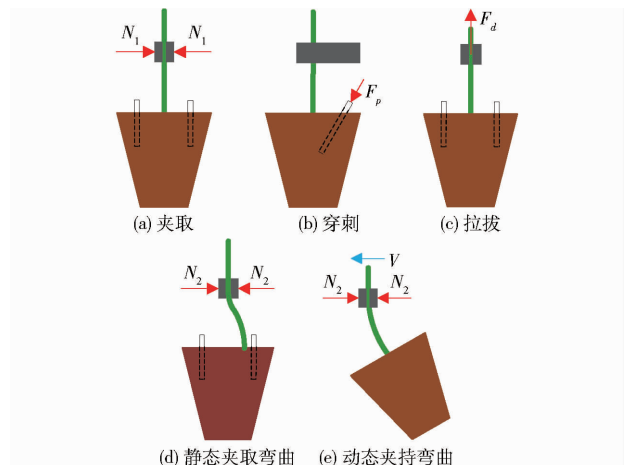


图 8 钵苗受力状态

Fig. 8 Stress status of pot seeding

为避免图 8a 所示过程对钵苗茎秆造成压缩损伤, 同时顺利将钵苗从穴盘拉拔出, 夹持气缸作用力



与行程应满足

$$N_i \leq N_{Ymin} \quad (8)$$

$$\mu N_i \geq F_{Lmax} \quad (9)$$

$$S > x_{min} \quad (10)$$

式中  $\mu$ ——指夹摩擦因数

$S$ ——夹持气缸行程, mm

根据穿刺试验可知,取苗针行程大于 15 mm 时,穿刺阻力易产生大幅波动,而波动幅度可在一定程度上反映取苗针与根系的干涉程度,干涉程度越大造成根系损伤的可能性越大。为减少穿刺动作对钵苗根系的损伤,设取苗针最大穿刺行程为 20 mm,同时为克服穿刺阻力,穿刺气缸最小推力  $F_{pmin}$  应满足

$$F_{pmin} > f_{pmax} \quad (11)$$

为减少移栽过程中茎秆易出现的弯曲损伤,本文主要采取方式:①增加取苗针结构以防止分苗弯曲损伤。②合理选取夹持高度以避免夹持弯曲损伤。其中,取苗针主要通过结构限位以防止分苗过程的茎秆在钵体惯性的作用下产生大弯曲;夹取高度则需基于茎秆抗弯强度进行合理的参数设计。

如图 9 所示静态夹取弯曲状态,以钵体中心  $O$  点为原点,茎秆远钵端为  $x$  轴正方向,侧偏向为  $y$  轴正方向建立坐标系,可知茎秆的最大夹持偏移距离为  $a_l$ ,此时弯曲挠曲线方程<sup>[21]</sup>近似为

$$w = a_l \left( 1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) \quad (12)$$

式中  $w$ ——茎秆挠度, mm

$l$ ——茎秆长度, mm

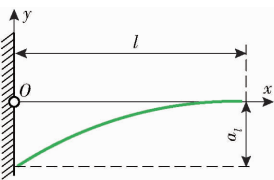


图 9 茎秆夹持弯曲变形示意图

Fig. 9 Stem bending deformation of clamping

由此可得茎秆在夹持弯曲时产生的应变能为

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (13)$$

式中  $U$ ——弯曲应变能, J/m<sup>2</sup>

为得到使茎秆产生相同挠度的临界载荷,在计算外部势能时用等效载荷  $F_e$  代替惯性力,其所做功为

$$W = \int_0^{a_l} F_e dx \quad (14)$$

茎秆总势能为

$$Q = U - W = \frac{ED^4 a_l^2 \pi^5}{64^2 l^3} - F_e a_l \quad (15)$$

式中  $D$ ——茎秆直径

由势能驻值定理,得总势能一阶变分为

$$\frac{\partial Q}{\partial a_l} = \frac{ED^4 a_l \pi^5}{64^2 l^3} - F_e = 0 \quad (16)$$

茎秆的极限弯曲内力  $F_{cr}$  为

$$F_{cr} = F_e = \frac{ED^4 \pi^5}{64^2 l^3} a_l \quad (17)$$

由式(17)得出,当茎秆的偏移距离一定时,夹苗高度与弯曲内力负相关,此时为防止夹苗弯曲作用力过大,最小夹持高度  $h$  应满足

$$h_{min} \geq l \quad (18)$$

根据茎秆弯曲试验分析与理论计算得出最小夹持高度  $h_{min}$  为 21.4 mm,为防止茎秆弯曲损伤,取夹持高度为 30 mm。

## 4 仿真分析

### 4.1 气动系统设计与仿真

基于取苗装置整排取苗、间隔投苗的作业结构,设计气动系统如图 10 所示。图中  $P$  为气源,  $L$  为过滤器,  $T$  为调压阀,  $G$  为压力表,  $V1$ 、 $V4$  为机械换向阀,  $V2$  为气控-机械换向阀,  $V3$  为气控换向阀,  $T1 \sim T6$  为换向阀触发位置,  $J1 \sim J4$  为节流阀,  $M1 \sim M7$  为排气消声器,  $A$  为夹持气缸,  $B$  为穿刺气缸,  $C$  为升降气缸,  $D$  为分苗气缸,  $E$  为移苗气缸,  $F$  为送盘气缸。

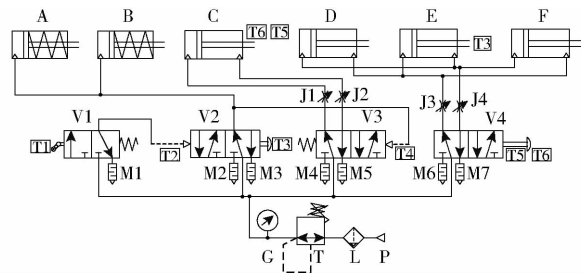


图 10 气动回路布置方案

Fig. 10 Distribution of pneumatic circuit

气动系统控制流程如图 11 所示。A 位、B 位分别表示机械阀阀芯的左位、右位。

为验证气动系统设计的合理性,依照气动回路方案与控制逻辑,通过 FluidSIM - P 3.6 搭建气动系统,对各气缸响应时序进行仿真分析,结果如图 12 所示。

由图 12 可见,所设计气动系统各执行气缸的响应时序可满足要求,在气源压力为 0.4 MPa、节流阀开度为 100%、不考虑机械阀  $V1$  触发时间间隔的情况下,单次循环时间约为 2.5 s。

### 4.2 取投苗装置运动仿真

整排取苗、间隔投苗的取投苗作业形式可保证

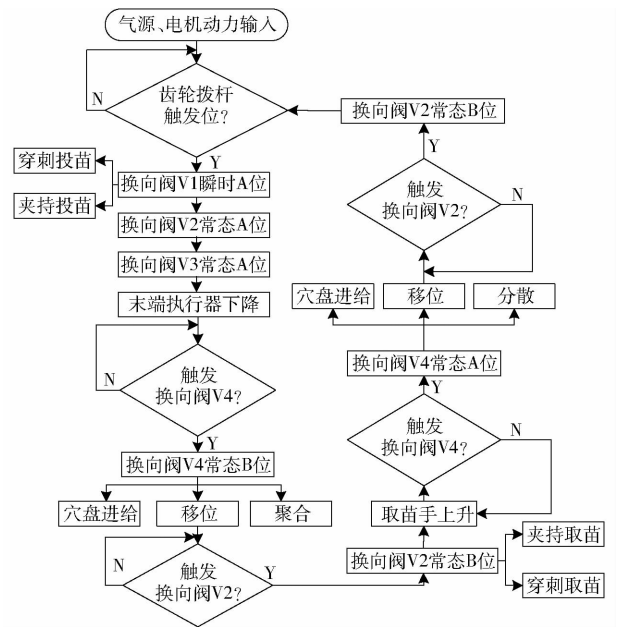


图 11 气动系统控制流程图

Fig. 11 Control flowchart of pneumatic system

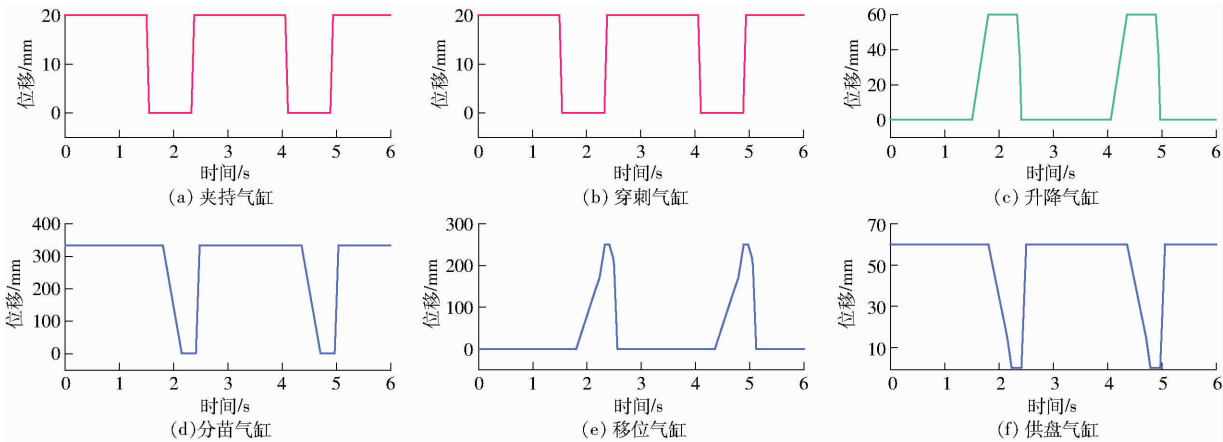


图 12 气缸响应时序

Fig. 12 Responing timing chart of cylinders

### 4.3 DEM - MFBD 联合仿真

本文所设计的插夹联动式末端执行器对钵苗的作业属于离散元 (Discrete element method, DEM) 与多柔性体动力学 (Multi flexible body dynamic, MFBD) 耦合作用过程。为揭示钵苗损伤机理, 本文借助 EDEM - RecurDyn 联合仿真平台对夹茎式与插夹联动式末端执行器取苗过程的关键状态进行对比分析, 以期验证后者的可行性与先进性, 为进一步参数优化提供指导。

EDEM 中采用 Hertz - Mindlin with JKR 模型与 bonding 模型共同描述根系与基质间的接触黏结作用, 参考文献 [22 - 23] 设置主要本征参数与接触参数如表 1 所示。

利用 RecurDyn 建立末端执行器多体动力学模型, 结合钵苗几何尺寸, 初步设计取苗针尺寸为: 间距 20 mm, 入土角 45°, 行程 5、10、15、20 mm, 取苗针

较高工作效率, 但同时对结构布置要求较高。为避免机构装配与运动产生干涉作用, 利用 ADAMS 对基于插夹联动式末端执行器的取苗装置进行虚拟样机试验, 如图 13 所示。

以取苗针为研究对象, 所得运动轨迹与分析如下: 根据虚拟仿真结果, 取苗装置工作过程无机构干涉现象。末端执行器取苗针的运动轨迹如图 13b 所示, 其中, *AB* 为伴随夹茎的取苗针入钵阶段, 以实现末端执行器对钵苗的插夹动作; *BC* 为将苗纵向拔取与横移分散阶段, 以实现所取整排钵苗与接苗杯等间隔; *CD* 为向前移位阶段, 以将整排钵苗输送至接苗杯正上方; *DE* 为纵向下落、取苗针退钵与指夹展开阶段, 以实现钵苗的投放; *EF* 为末端执行器横移聚合阶段, 以实现末端执行器与穴盘中钵苗横向间距的一致; *FA* 为向后移位阶段, 以将整排末端执行器输送至取苗工作位置。

定义为铝合金材料, 指夹定义为树脂材料, 材料属性如表 2 所示。

对茎秆进行四面体网格划分, 网格尺寸范围设置为 0.15 ~ 0.3 mm, 梯度因子为 2, 共生成网格 42 798 个, 建立茎秆柔性体模型。基于末端执行器原理进行相关运动副定义, 针对分苗、移苗过程添加驱动函数, 结合图 14 所示 Hertz 接触计算理论与摩擦试验, 设置其接触特性参数为: 动摩擦因数 0.75, 静摩擦因数 0.758。参考相关资料设置接触刚度系数  $k$  为 7.5 MN/mm, 阻尼系数  $c$  为  $1 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ , 刚度指数  $m_1$  为 1.3, 阻尼指数  $m_2$  为 1, 凹痕指数  $m_3$  为 1, 静态临界速度  $v_s$  为 0.01 mm/s, 动态临界速度  $v_d$  为 20 mm/s。通过 wall 文件实现 RecurDyn 与 EDEM 的耦合数据交换, 仿真结果如图 15 所示。

由图 15a ~ 15d 可见, 在同一夹持高度下, 当以 1 m/s 的速度分苗时, 夹茎式末端执行器夹持区域

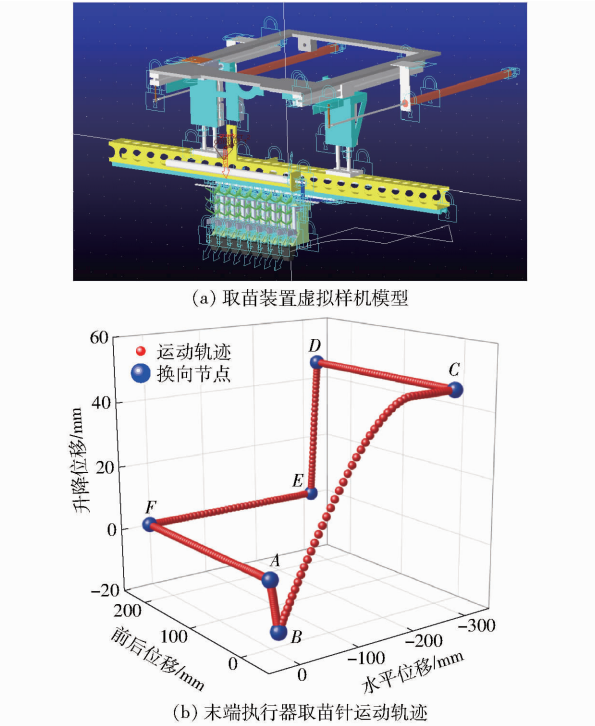


图 13 虚拟样机试验结果

Fig. 13 Test result of virtual prototype

表 1 EDEM 主要参数设置

| Tab. 1 Main parameters setting of EDEM |                                          |                 |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| 对象                                     | 参数                                       | 数值              |
| 颗粒                                     | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )     | 793.9           |
|                                        | 泊松比                                      | 0.246           |
|                                        | 剪切模量/Pa                                  | $1.6\times10^6$ |
|                                        | 半径/mm                                    | 0.5             |
|                                        | 接触半径/mm                                  | 0.6             |
|                                        | 碰撞恢复系数                                   | 0.12            |
| 颗粒-颗粒                                  | 动摩擦因数                                    | 0.65            |
|                                        | 静摩擦因数                                    | 0.345           |
|                                        | 法向刚度/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )    | $1\times10^8$   |
|                                        | 切向刚度/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )    | $5\times10^7$   |
|                                        | 法向应力/Pa                                  | $3\times10^5$   |
|                                        | 切向应力/Pa                                  | $1.5\times10^5$ |
| 颗粒-穴盘                                  | 粘结键半径/mm                                 | 0.45            |
|                                        | 碰撞恢复系数                                   | 0.4             |
|                                        | 动摩擦因数                                    | 0.2             |
|                                        | 静摩擦因数                                    | 0.02            |
| 颗粒-根茎                                  | 碰撞恢复系数                                   | 0.2             |
|                                        | 动摩擦因数                                    | 0.542           |
|                                        | 静摩擦因数                                    | 0.12            |
| 颗粒-穴盘                                  | JKR 表面能/( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 1.513           |
| 颗粒-根茎                                  | JKR 表面能/( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 5.728           |

表 2 RecurDyn 材料属性设置

| Tab. 2 Material property setting of RecurDyn |                                      |                 |      |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------|
| 部件                                           | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 杨氏模量/MPa        | 泊松比  |
| 取苗针                                          | $2.66\times10^3$                     | $7.0\times10^4$ | 0.34 |
| 指夹                                           | $1.21\times10^3$                     | $3.2\times10^3$ | 0.38 |

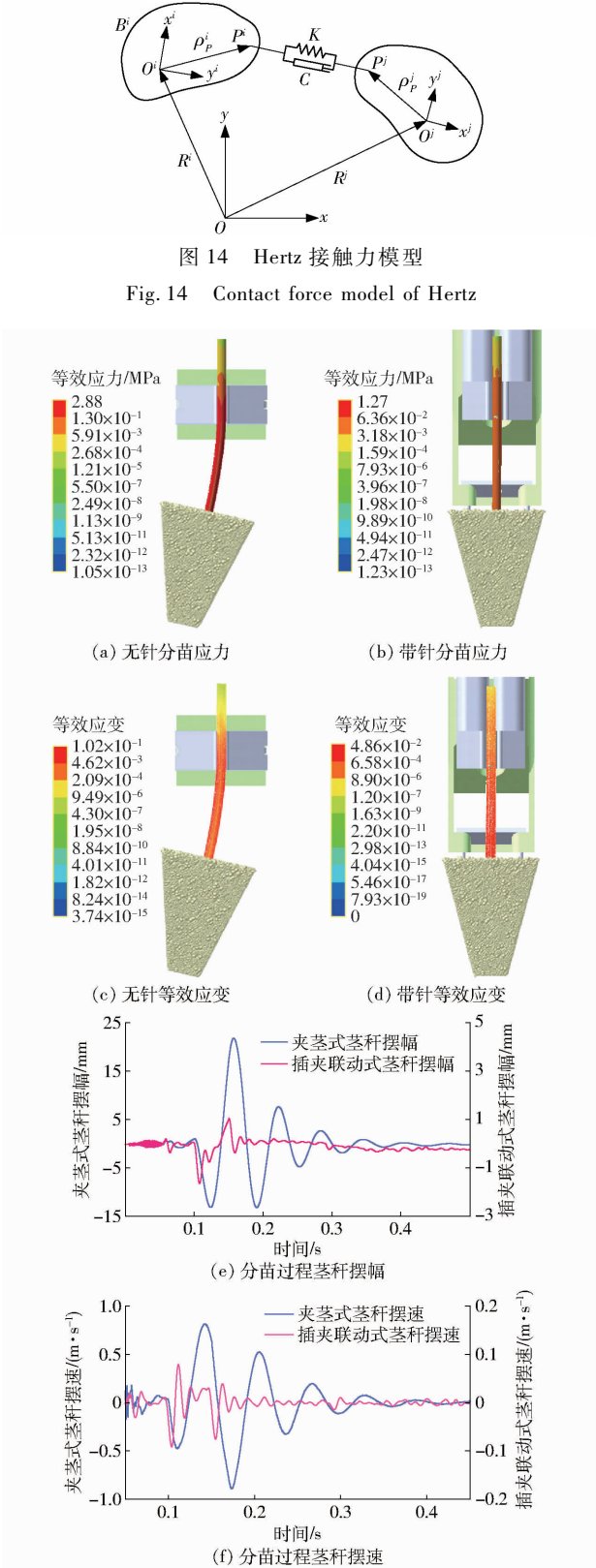


图 15 分苗过程钵苗状态

Fig. 15 Pot seeding status of separating process

下方茎秆弯曲变形明显,其最大应力为 2.88 MPa,最大应变为 0.102,茎秆存在损伤风险;同样条件下,插夹联动式末端执行器所持茎秆无明显变形,最大弯曲应力与应变分别为 1.27 MPa、0.048 6,与夹茎式相比分别降低 56% 和 52%。



图 15e、15f 描述了分苗过程茎秆根部某节点相对于末端执行器横向位移与速度的变化情况。由此可见,夹茎式与插夹联动式末端执行器所对应茎秆的同一节点在分苗开始时均获得一定位移与速度,并在经过一定波动后逐渐趋于稳定。分苗过程中,夹茎式末端执行器对应茎秆节点的最大位移为 22 mm,最大瞬时速度为 0.9 m/s,插夹联动式末端执行器对应茎秆节点最大位移为 1.8 mm,最大瞬时速度为 0.1 m/s,与前者相比分别降低了 91.8% 和 88.9%。

由图 16a ~ 16d 可见,以相同速度移苗时,夹茎式末端执行器所持茎秆受到的最大应力为 2.47 MPa,最大应变为 0.081 2;插夹联动式末端执行器所持茎秆受到的最大应力为 1.16 MPa,最大应变为 0.046 4,与夹茎式相比分别降低了 53% 和 43.2%。

由图 16e、16f 可见,移苗过程中,夹茎式末端执行器对应茎秆节点的最大位移为 11 mm,最大瞬时速度为 0.75 m/s,插夹联动式末端执行器对应茎秆节点最大位移为 1.4 mm,最大瞬时速度为 0.05 m/s,与前者相比分别降低了 87.3% 和 93.4%。由此可见,插夹联动式末端执行器取苗针辅助结构的增设对于降低分苗、移苗时钵体的摆幅、避免茎秆的弯曲损伤具有显著作用,结构设计具有合理性。

由图 17 穿刺过程基质受力情况可见,当取苗针行程在不足 10 mm 时,基质颗粒 bond 键受到的法向力较小且参与受力的 bond 键数量较少,当行程由 10 mm 逐渐向 20 mm 增大时参与受力的键数量与高水平法向受力状态的 bond 键数量明显增多,不利于钵体基质完整性的保持。

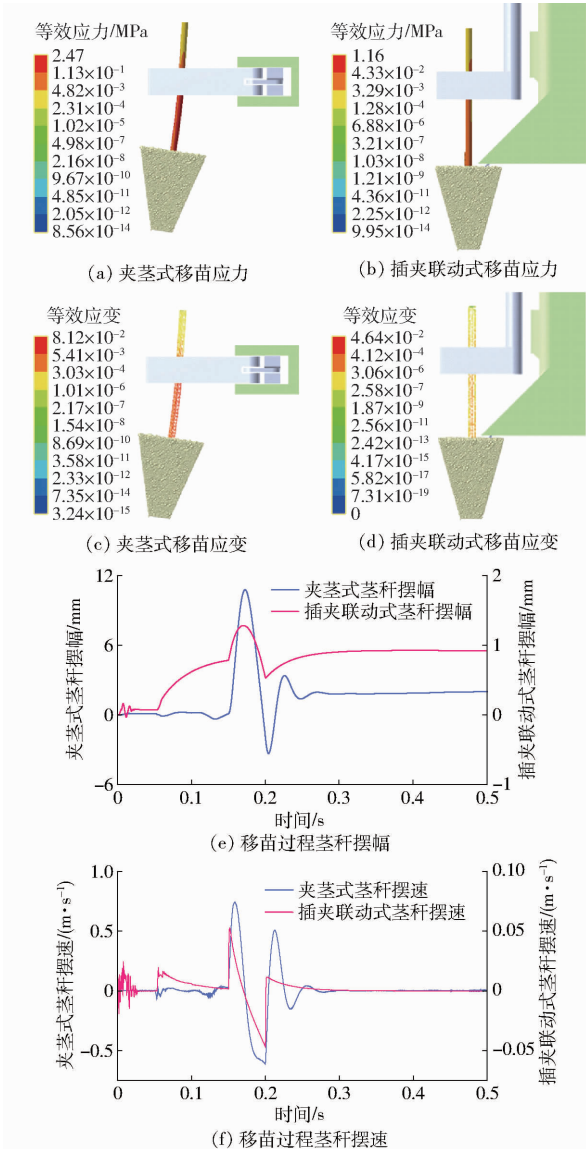


图 16 移苗过程钵苗状态

Fig. 16 Plug seeding status of transporting process

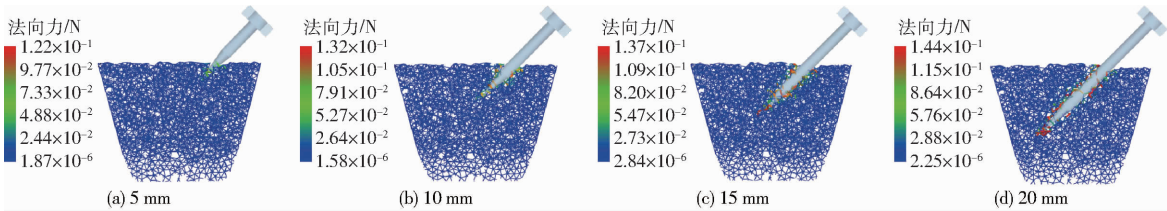


图 17 穿刺过程受力情况  
Fig. 17 Substrate stress during puncture process

由图 18 横移分苗过程基质受力情况可见,当行程为 5 mm 时,取苗针与基质接触面积小,基质为平

衡弯曲惯性需要分担较集中的作用力,基质间 bond 键受力较大,实际作业中造成取苗针横向脱出风险

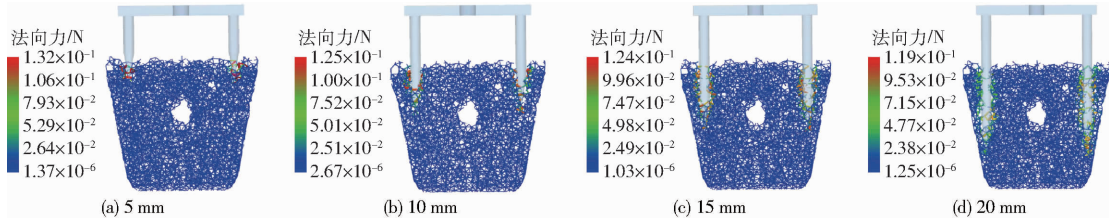


图 18 分苗过程基质受力情况  
Fig. 18 Substrate stress during seedling separation process



较大,随行程不断增加至 20 mm,基质间 bond 键作用力显著降低,理论上可实现取苗针脱出与基质破损风险的有效降低。

5 试验优化

5.1 单因素试验

结合末端执行器结构特点与仿真分析结果,取 4 × 128 辣椒穴盘苗若干,以取苗成功率与基质损失率为试验评价指标,以取苗针间距、行程、入土角为关键因素进行单因素试验。试验设计如表 3 所示。

表 3 单因素试验设计  
Tab.3 Single factor test

| 编号 | 因素          |            |             |
|----|-------------|------------|-------------|
|    | 取苗针间距/mm    | 取苗针行程/mm   | 取苗针入土角/(°)  |
| 1  | 10、14、18、22 | 16         | 50          |
| 2  | 18          | 16         | 30、40、50、60 |
| 3  | 18          | 8、12、16、20 | 50          |

记录取苗试验后穴盘中剩余钵苗数量,计算取

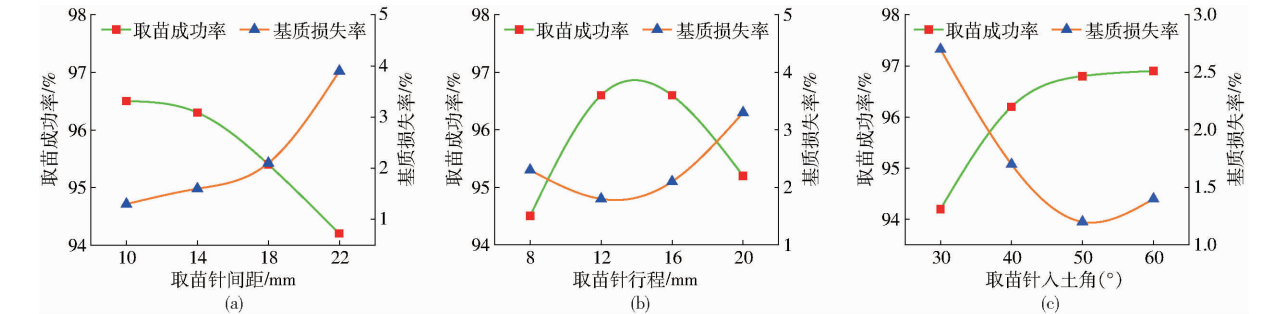


图 19 单因素试验结果

Fig. 19 Influence rule of the single factors on test index

由图 19a 可知,取苗成功率随取苗针间距的增加呈逐渐减小的变化趋势,基质损失率随取苗针间距的增加逐渐增大;由图 19b 可知,取苗成功率随取苗针行程的增加呈先增加后减小的变化趋势,基质损失率随取苗针行程的增加呈现先减小后增大的趋势。由图 19c 可知,取苗成功率随取苗针入土角的增加逐渐增加,基质损失率随取苗针入土角的增加先降低后小幅增加。综上确定取苗针间距最优范围为 10 ~ 18 mm,取苗针行程最优范围为 12 ~ 16 mm,取苗针入土角最优范围为 40° ~ 60°。

5.2 正交试验

为进一步优化结构参数,提高取苗成功率、降低基质损失,以取苗针间距、行程、入土角为关键因素,采用 Box - Behnken 中心组合设计方案进行三因素三水平正交试验,因素编码如表 4 所示。

试验方案与结果如表 5 所示。

苗成功率,计算式为

$$Y_1 = \frac{N_s - r}{N_s} \times 100\%$$
 (19)

式中  $Y_1$ ——取苗成功率,%

$N_s$ ——钵苗总数量

$r$ ——穴盘内剩余钵苗数量

分别称量空盘质量、穴盘苗总质量与试验后的穴盘质量,计算基质损失率,计算式为

$$Y_2 = \frac{M_1 - M_0}{M_2 - M_1} \times 100\%$$
 (20)

式中  $Y_2$ ——基质损失率,%

$M_0$ ——空穴盘质量,kg

$M_1$ ——试验后穴盘质量,kg

$M_2$ ——试验前苗盘总质量,kg

通过 3D 打印技术制备不同结构参数的插夹联动末端执行器,搭建取投苗装置试验台,对取苗针间距、取苗针行程、取苗针入土角依次以单一变量原则进行取苗成功率与基质损失率的测量,得出各因素对评价指标影响如图 19 所示。

表 4 正交试验因素编码

Tab.4 Factors codes of orthogonal test

| 编码  | 因素       |          |            |
|-----|----------|----------|------------|
|     | 取苗针间距/mm | 取苗针行程/mm | 取苗针入土角/(°) |
| - 1 | 10       | 12       | 40         |
| 0   | 14       | 14       | 50         |
| 1   | 18       | 16       | 60         |

5.3 方差分析

运用 Design-Expert 进行多元回归拟合分析,得出取苗成功率  $Y_1$ 、基质损失率  $Y_2$  的二次多项式回归模型

$$Y_1 = 97.32 - 0.34A - 0.19B - 0.15C - 0.27AB - 0.093AC - 0.11BC + 0.086A^2 - 0.079B^2 - 0.19C^2$$
 (21)

$$Y_2 = 1.93 + 0.24A - 0.19B - 0.58C + 0.2AB - 0.2AC - 0.6BC + 1.91A^2 + 0.77B^2$$
 (22)

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ——取苗针间距、行程、入土角因素编码值

对正交试验数据进行方差分析,如表 6、7 所示。

表 5 正交试验方案与结果

| Tab.5 Schemes and results of orthogonal experiment |              |              |                |             |             |
|----------------------------------------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|
| 序号                                                 | 因素           |              |                | 取苗成<br>功率/% | 基质损失<br>率/% |
|                                                    | 取苗针<br>间距/mm | 取苗针<br>行程/mm | 取苗针<br>入土角/(°) |             |             |
| 1                                                  | 14           | 14           | 50             | 97.26       | 1.87        |
| 2                                                  | 14           | 14           | 50             | 97.32       | 2.07        |
| 3                                                  | 18           | 12           | 50             | 97.08       | 4.71        |
| 4                                                  | 18           | 16           | 50             | 96.60       | 3.31        |
| 5                                                  | 10           | 16           | 50             | 97.55       | 3.27        |
| 6                                                  | 14           | 12           | 60             | 97.12       | 3.78        |
| 7                                                  | 14           | 12           | 40             | 97.30       | 2.83        |
| 8                                                  | 14           | 16           | 60             | 96.59       | 1.27        |
| 9                                                  | 14           | 14           | 50             | 97.43       | 2.04        |
| 10                                                 | 10           | 14           | 60             | 97.72       | 3.94        |
| 11                                                 | 10           | 14           | 40             | 97.55       | 4.86        |
| 12                                                 | 14           | 16           | 40             | 97.22       | 2.73        |
| 13                                                 | 18           | 14           | 40             | 97.47       | 4.98        |
| 14                                                 | 14           | 14           | 50             | 97.27       | 2.05        |
| 15                                                 | 10           | 12           | 50             | 97.66       | 3.88        |
| 16                                                 | 14           | 14           | 50             | 97.33       | 1.83        |
| 17                                                 | 18           | 14           | 60             | 96.58       | 4.86        |

表 6 取苗成功率方差分析  
Tab.6 Variance analysis of  $Y_1$

| 来源    | 平方和     | 自由度 | 均方    | $P$      |
|-------|---------|-----|-------|----------|
| 模型    | 1.98    | 9   | 0.22  | <0.000 1 |
| $A$   | 0.99    | 1   | 0.95  | <0.000 1 |
| $B$   | 0.12    | 1   | 0.29  | <0.000 1 |
| $C$   | 0.19    | 1   | 0.18  | 0.000 4  |
| $AB$  | 0.28    | 1   | 0.28  | <0.000 1 |
| $AC$  | 0.03    | 1   | 0.03  | 0.027 9  |
| $BC$  | 0.05    | 1   | 0.05  | 0.012 1  |
| $A^2$ | 0.03    | 1   | 0.03  | 0.032 8  |
| $B^2$ | 0.03    | 1   | 0.03  | 0.047 0  |
| $C^2$ | 0.15    | 1   | 0.15  | 0.000 7  |
| 残差    | 0.031 3 | 7   | 0.004 |          |
| 失拟项   | 0.013 0 | 3   | 0.004 | 0.495 2  |
| 误差    | 0.018 2 | 4   | 0.005 |          |
| 总计    | 2.015 4 | 16  |       |          |

表 7 基质损失率方差分析  
Tab.7 Variance analysis of  $Y_2$

| 来源    | 平方和   | 自由度 | 均方    | $P$      |
|-------|-------|-----|-------|----------|
| 模型    | 23.86 | 9   | 2.65  | <0.000 1 |
| $A$   | 0.46  | 1   | 0.46  | 0.001 8  |
| $B$   | 0.3   | 1   | 0.3   | 0.005 5  |
| $C$   | 2.67  | 1   | 2.67  | <0.000 1 |
| $AB$  | 0.16  | 1   | 0.16  | 0.023 5  |
| $AC$  | 0.16  | 1   | 0.16  | 0.024 7  |
| $BC$  | 1.45  | 1   | 1.45  | <0.000 1 |
| $A^2$ | 15.42 | 1   | 15.42 | <0.000 1 |
| $B^2$ | 2.52  | 1   | 2.52  | <0.000 1 |
| $C^2$ | 0.037 | 1   | 0.037 | 0.209    |
| 残差    | 0.13  | 7   | 0.019 |          |
| 失拟项   | 0.084 | 3   | 0.028 | 0.231 3  |
| 误差    | 0.051 | 4   | 0.013 |          |
| 总计    | 24    | 16  |       |          |

取苗成功率  $Y_1$  与基质损失率  $Y_2$  回归模型的  $P$  值均小于 0.000 1,说明模型均显著,失拟项  $P$  值均大于 0.05,说明失拟项均不显著,回归模型拟合效果较好。两模型中取苗针间距、行程、入土角一次项的  $P$  值均小于 0.01,说明其对于取苗成功率与基质损失率均具有极显著影响,交互项  $AB$  对取苗成功率具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ),  $AC$ 、 $BC$  对取苗成功率具有显著影响 ( $P < 0.05$ );交互项  $AB$ 、 $AC$  对基质损失率具有显著影响 ( $P < 0.05$ ),  $BC$  对基质损失率具有极显著影响 ( $P < 0.01$ )。  $Y_1$ 、 $Y_2$  回归模型决定系数  $R^2$  分别为 0.984 4 和 0.994 4,校正决定系数  $R^2_{Adj}$  分别为 0.964 4 和 0.987 2,变异系数  $C_v$  分别为 0.069% 和 4.34%,信噪比分别为 23.719 和 34.096,说明所拟合的两模型具有较高的可靠性。

5.4 响应面分析

为探究交互作用对取苗成功率与基质损失率的影响,绘制交互项响应曲面如图 20 所示。

如图 20a 所示,入土角为 40°时,取苗成功率随取苗针间距减小明显增大,入土角为 60°时,取苗成功率随取苗针间距增大基本保持恒定;间距为 12 mm 时,取苗成功率随入土角的增大缓慢增大,间距为 18 mm 时,取苗成功率随入土角的增大而减小。如图 20b 所示,入土角为 40°时,取苗成功率随行程增大而减小,入土角为 60°时,取苗成功率随行程增大先增大后减小;行程为 12 mm 时,取苗成功率随入土角增大缓慢增大,行程为 16 mm 时,取苗成功率随入土角增大明显增大。如图 20c 所示,间距为 10 mm 时,取苗成功率均随行程的增大先增大后减小,间距为 18 mm 时,取苗成功率随行程的增大而减小。如图 20d 所示,入土角取任一水平时基质损失率均随间距的增大先减小后增加,区别在于同间距情况下响应值产生了明显的差异。如图 20e 所示,入土角为 40°时,基质损失率随行程的增大基本保持恒定,入土角为 60°时,基质损失率随行程的增大而减小;行程为 12 mm 时,基质损失率随入土角增大先减小后增大,行程为 16 mm 时,基质损失率随入土角增大而减小。如图 20f 所示,行程取任一水平时基质损失率均随间距的增大先减小后增大,区别在于同间距情况下的响应值产生了明显的差异。综上所述,各因素间交互作用对响应值的影响与方差分析结论一致。

5.5 参数优化与试验验证

为保证较高取苗成功率与较低基质损失率,利用 Design-Expert 对目标函数进行优化求解。目标函数为

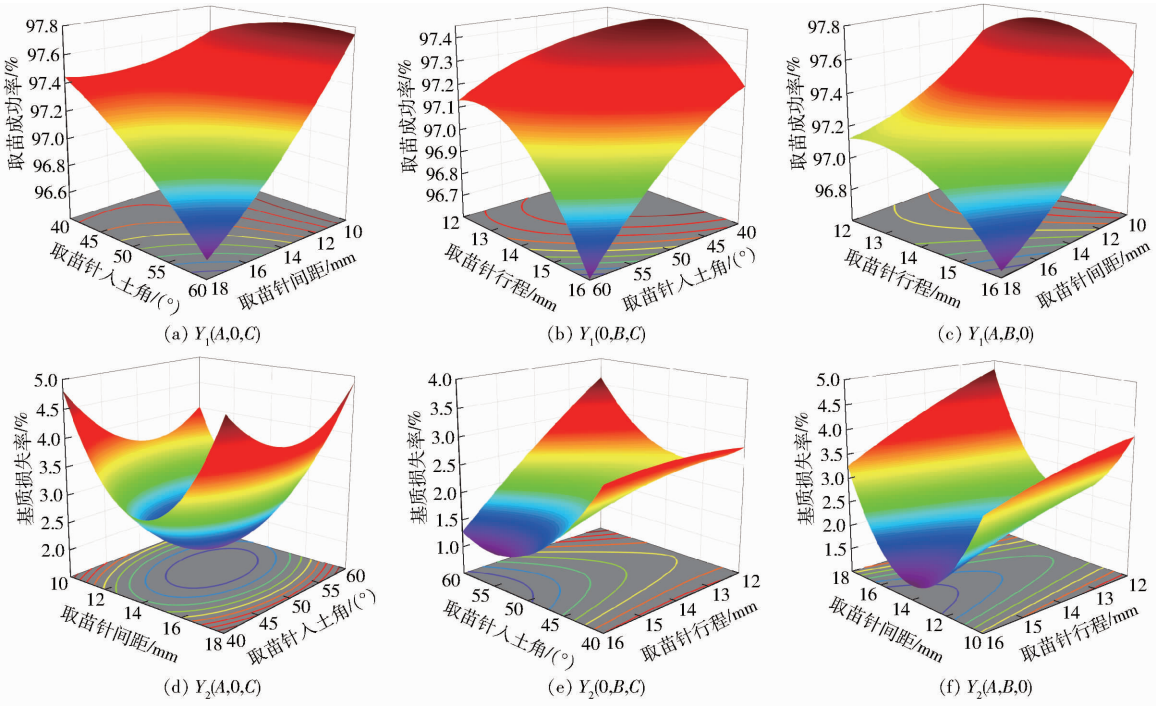


图 20 试验因素交互作用对取苗成功率和基质损失率影响的响应曲面  
Fig. 20 Interaction influence of test factors on  $Y_1$  and  $Y_2$

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

经求解,最优参数组合为:取苗针间距 12.25 mm、取苗针入土角 50.37°、取苗针行程 14.21 mm,取苗成功率为 97.44%,基质损失率为 2.13%。圆整后最优参数为:取苗针间距 12.3 mm、取苗针入土角 50°、取苗针行程 14.2 mm。以最优参数进行关键部件的制备及试验台架调整,如图 21 所示。

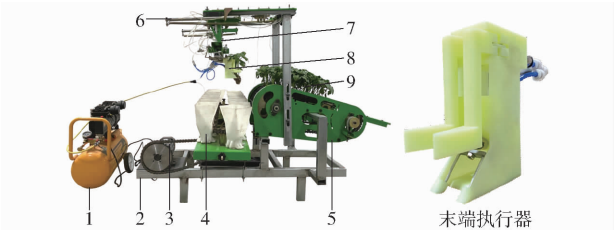


图 21 台架试验装置  
Fig. 21 Equipment of test

1. 压力泵 2. 机架 3. 驱动电机 4. 苗杯 5. 供盘机构 6. 驱动气缸 7. 气缸支架 8. 末端执行器 9. 穴盘苗

进行验证试验得出:取苗成功率为 97.92%,基质损失率为 2.21%,分别与回归模型预测结果相差

0.49% 与 3.8%,此时取投苗装置气动系统触发间隔为 2.5 s,取苗频率可达 128 株/min,茎秆无弯曲损伤现象,移栽作业效果良好,满足设计要求。

6 结论

(1)设计了一种插夹联动式取投苗装置末端执行器,结合钵苗力学特性试验、理论分析、取苗边界条件分析对末端执行器主要结构参数进行了设计;采用 DEM-MFBD 方法揭示了取苗过程关键状态下钵苗损伤机理,验证了插夹联动式结构的可靠性与先进性。

(2)基于整排取苗、间隔投苗的作业方式设计了取投苗装置气动控制系统,利用 FluidSIM-P 3.6 对执行元件的动作时序进行了优化分析,验证了气动回路布置方案的合理性。

(3)采用 Box-Behnken 中心组合设计方案建立了以取苗成功率、基质损失率为评价指标的回归模型,通过正交试验方差分析与响应面分析得出了末端执行器关键因素对指标的影响规律,求解其最优参数并进行验证试验,试验结果表明:该装置取苗成功率为 97.92%,基质损失率为 2.21%,无茎秆损伤现象,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 陈大军,侯加林,施国英,等. 国内旱地移栽机技术现状分析[J]. 中国农机化学报,2018,39(7): 98-102.  
CHEN Dajun,HOU Jialin,SHI Guoying,et al. Analysis on the current situation of technology of domestic dryland transplanter

- [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 98 - 102. (in Chinese)
- [2] HU S Y, HU M J, WEI Y, et al. Design and experiment of an integrated automatic transplanting mechanism for picking and planting pepper hole tray seedlings[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 557.
- [3] 缪小花, 毛罕平, 韩绿化, 等. 黄瓜穴盘苗拉拔力及钵体抗压性能影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 27 - 32. MIAO Xiaohua, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Analysis of influencing factors on force of picking plug seedlings and pressure resistance of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup. 1): 27 - 32. (in Chinese)
- [4] 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. Experiment 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)
- [5] 葛荣雨, 肖海文, 纪玉川, 等. 穴盘苗移栽机自动取苗装置的设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 84 - 88. GE Rongyu, XIAO Haiwen, JI Yuchuan, et al. Design of automatic seeding picking device for plug seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2): 84 - 88. (in Chinese)
- [6] 那明君, 滕乐, 周坤, 等. 旱地钵苗移栽复式作业机栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 67 - 73. NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Kun, et al. Optimal design and experiment of planting mechanism of dryland pot seedlings transplanting compound machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 67 - 73. (in Chinese)
- [7] 张妮, 张国忠, 王姣, 等. 旱地作物机械化移栽关键技术研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 22 - 31. ZHANG Ni, ZHANG Guozhong, WANG Jiao, et al. Research status and development trend of upland crops mechanized transplanting key technologies[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 22 - 31. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] 俞高红, 金也, 常数数, 等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100 - 108. YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu, et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100 - 108. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 谢守勇, 阳尚宏, 刘军, 等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 1 - 10. XIE Shouyong, YANG Shanghong, LIU Jun, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 1 - 10. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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 and optimization design 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)
- [15] 韩长杰, 肖立强, 徐阳, 等. 辣椒穴盘苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 20 - 29. HAN Changjie, XIAO Liqiang, XU Yang, et al. Design and experiment of the automatic transplanter for chili plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 20 - 29. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 田志伟, 马伟, 杨其长, 等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 22 - 38. TIAN Zhiwei, MA Wei, YANG Qichang, et al. Research status and problem analysis of plug seeding transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22 - 38. (in Chinese)
- [18] HU S Y, HU M J, ZHANG W Y. Design and experiment of flexible clamping device for pepper plug seedlings[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(6): 168781322211072.



method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53–62. (in Chinese)

[14] 丁兆军, 白洋. 根系发育和微生物组研究现状及未来发展趋势[J]. 中国科学:生命科学, 2021, 51(10): 1447–1456. DING Zhaojun, BAI Yang. The current and future studies on plant root development and root microbiota[J]. Science China: Life Sciences, 2021, 51(10): 1447–1456. (in Chinese)

[15] 王金武, 关睿, 高鹏翔, 等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 73–81. WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73–81. (in Chinese)

[16] 陈平录, 许静, 翟因敏, 等. 丘陵山区低矮树型果园立式微耕机的设计与试验[J]. 机械设计与制造, 2021(2): 299–303. CHEN Pinglu, XU Jing, ZHAI Yinmin, et al. Design and experimental study of vertical micro-cultivator for low trees in hilly orchard[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(2): 299–303. (in Chinese)

[17] MARIEM A, CHRISTIAN F, TINO D, et al. Parameterising wheat leaf and tiller dynamics for faithful reconstruction of wheat plants by structural plant models[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 213–230.

[18] 邓佳玉. 基于离散元法的深松铲耕作阻力的仿真与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015. DENG Jiayu. Simulation and experimental study of the subsoiler tillage resistance based on discrete element method[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[19] 李云伍, 张国勇, 张植, 等. 低功耗小型立轴式深耕机分段螺旋旋耕刀具的研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 72–80. LI Yunwu, ZHANG Guoyong, ZHANG Zhi, et al. Development of low power-consumption multi-helical rotavator for small vertical-shaft deep-cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 72–80. (in Chinese)

[20] 陈金楚, 奚小波, 殷慧子, 等. 基于 EDEM–Fluent 耦合的气爆松土效果仿真分析[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(3): 70–79. CHEN Jinchu, XI Xiaobo, YIN Huizi, et al. Simulation analysis and gas explosion loosening soil effect based on EDEM–Fluent coupling[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(3): 70–79. (in Chinese)

[21] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. LIU Jun'an. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[22] 赵淑红, 刘汉朋, 杨超, 等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 75–87. ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75–87. (in Chinese)

(上接第 57 页)

[19] 胡双燕, 胡敏娟, 张文毅, 等. 辣椒穴盘苗茎秆力学特性试验与仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 9–18. HU Shuangyan, HU Minjuan, ZHANG Wenyi, et al. Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 9–18. (in Chinese)

[20] 马晓晓, 李华, 葛云, 等. 番茄钵苗茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 161–167. MA Xiaoxiao, LI Hua, GE Yun, et al. Experimental study on mechanical properties of tomato seedling stem[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 161–167. (in Chinese)

[21] 刘晓东, 王春光, 郭文斌, 等. 甜高粱弯曲力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 180–185. LIU Xiaodong, WANG Chunguang, GUO Wenbin, et al. Experiments on bending mechanical properties of sweet sorghum[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 180–185. (in Chinese)

[22] 马国鑫. 生物炭苗钵低损取苗增强机理与气顶-包裹夹取式取苗机构研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. MA Guoxin. Study on enhancement mechanism of low loss seedling picking in biochar and air ejection-package clamping pick-up device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[23] 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)