doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.019

# 扦插钵苗顶夹式取苗装置优化设计与试验

赵　雄[1,2]　陈　杭[1]　叶秉良[1,2]　马行潇[1]　张　城[1]　俞高红[1,2]
(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018)

**摘要**:针对扦插钵苗因根系固结力不足及冠层扩展性显著引发的基质破碎率高、取苗成功率低等机械化移栽难题,提出一种基于顶夹式取苗方案的低损伤高效取苗装置。通过结合非圆齿轮行星轮系传动特性与“平夹直拔”的轨迹原理构建夹取机构运动学模型,经参数优化获得关键结构参数:行星架长度为 100 mm、取苗臂长度为 130 mm、锁止弧基准半径为 35 mm、接触角为 44.43°,使传动比波动范围降低 59.31%。在此基础上,基于两杆转角映射关系推导非圆齿轮节曲线。以红叶石楠扦插钵苗为试验对象,结合离散元仿真与试验验证,确定顶杆直径 6 mm、行程 6 mm、速度 28 mm/s、取苗效率 60 株/min 为最优作业参数组合,试验结果表明,在此作业条件下,取投苗成功率为 94.33%,基质破碎率小于等于 3%,茎秆损伤率小于等于 1.67%,且无明显伤苗现象。该装置通过楔形块推动顶杆以降低基质-穴盘界面粘附强度,结合“蚕豆”形取苗轨迹的夹取机构实现低损高效取苗,满足扦插苗自动化移栽的要求。

**关键词**:扦插苗;取苗装置;离散元;非圆齿轮;顶夹式
**中图分类号**:S223.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0234-11　　**OSID**:

# Optimization Design and Experiment on Top-clamping Seedling Extraction Mechanism for Cutting Plug Seedling

Zhao Xiong[1,2]　Chen Hang[1]　Ye Bingliang[1,2]　Ma Xingxiao[1]　Zhang Cheng[1]　Yu Gaohong[1,2]
(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology*, *Hangzhou* 310018, *China*)

**Abstract**: Aiming to address mechanical transplantation challenges of vegetative cutting plug seedlings caused by insufficient root anchorage strength and significant canopy expansion, leading to high substrate fragmentation rates and low seedling extraction success, a low-damage high-efficiency seedling extractor was proposed based on a top-clamping mechanism. By establishing a kinematic model of the clamping mechanism based on non-circular gear planetary transmission characteristics and a “linear clamping-vertical extraction” trajectory principle, key structural parameters were optimized through parameter optimization to minimize transmission ratio fluctuations: planetary carrier length (100 mm), extraction arm length (130 mm), locking arc base radius (35 mm), and contact angle (44.43°), achieving a 59.31% reduction in transmission ratio fluctuation. The non-circular gear pitch curve was derived based on the angular mapping relationship of a two-bar linkage mechanism. Combining discrete element method (EDEM) simulations with experimental validation using Photinia × fraseri cutting plug seedlings, optimal operational parameters were determined: ejector diameter (6 mm), stroke (6 mm), speed (28 mm/s). At a seedling extraction rate of 60 seedlings/min, the extraction and delivery success rate reached 94.33%, substrate fragmentation rate remained below 3%, and stem damage rate was under 1.67%, with no observable seedling injury. The device employed a wedge-shaped actuator to reduce adhesion between the substrate and seedling trays, combined with a kidney-shaped clamping trajectory for low-damage and high-efficiency seedling extraction, meeting the requirements for automated transplantation of cutting seedlings.

**Key words**: cutting seedlings; seedling extraction mechanism; EDEM; non-circular gears; top-clamping

收稿日期:2025-02-08　修回日期:2025-03-12
**基金项目**:国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)和浙江省自然科学基金项目(LD24E05007)
**作者简介**:赵雄(1982—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:zhaoxiong@zstu.edu.cn

## 0　引言

扦插繁殖技术作为园林绿化苗木繁育的关键方法，因其能够精准复制母株遗传特性而被广泛应用于木本观赏植物和园艺作物生产[1]。然而，扦插苗的根系盘结度较低和茎叶扩展显著的特点，使得传统机械化取苗方式面临重大挑战：夹钵式操作容易导致基质破碎，而单夹茎秆的方式则可能导致根茎分离，无法满足全自动移栽过程中对苗体完整性和操作稳定性的高要求[2-3]。当前研究趋势表明，开发基于扦插苗生物力学特性的新型取苗技术已成为突破机械化移栽瓶颈的重要方向，其进展将直接推动“育苗-移栽”全流程自动化体系的构建[4]。

在取苗机构领域，国内外学者已提出多维度解决方案。Rahul 等[5]设计了仿手指的五杆式取苗机构，使用机电一体化的方式实现无损移苗。俞高红等[6]设计了一种回转式取苗装置，利用齿轮传动带动取苗爪沿预定轨迹运行，同时借助凸轮顶杆完成扎入、夹取和投放的动作。马国鑫[7]提出的气流顶出结合指夹包裹式的取苗方法，利用 EDEM 和 Fluent 软件优化了气流参数及执行机构参数。赵匀等[8]研制的夹茎式取苗装置使用夹片通过凸轮控制夹取和投苗动作。程迪[9]提出的“尖嘴形取苗-直线投苗”方案，基于非圆齿轮行星轮系的优化研究，改善了提前落苗和甩苗的现象。胡建平等[10]通过 EDEM 与 RecurDyn 耦合仿真分析了指夹式取苗爪的效果，优化了插入夹取苗动作的最佳时序配合。张学东等[11]针对生菜苗提出了顶杆完全顶出夹取基质块取苗的方法，并通过离散元方法优化了尺寸参数。尽管上述研究在一定程度上实现了穴盘苗的自动取送，但由于扦插苗与蔬菜穴盘苗之间存在显著的物理差异，这些方案并不适用于扦插苗的取苗作业。

目前学者虽对非圆齿轮行星轮系式夹钵夹取机构广泛研究，但在顶夹式取苗方面探索有限。因齿轮传动的连续性，非圆齿轮行星轮系取苗效率远高于其他控制方式[12]。而对于盘根弱、基质硬的幼苗，顶夹式取苗能减少损伤、确保质量。本研究针对扦插苗特殊需求，提出顶钵松苗与夹茎协同作业方案，其中顶苗机构集成于送苗装置，依靠与机架固连的楔形块让顶杆上升松动基质；夹苗机构依据非圆齿轮行星轮系原理设计“平夹直拔”两杆取苗方案，提升取苗轨迹平稳性与精确度[13]。根据穴盘苗钵体物理特性优化取苗爪结构组件尺寸参数，以红叶石楠扦插钵苗为对象，用 EDEM 仿真模拟取苗爪在顶出、夹取和提离过程的动态行为，分析顶杆速度、直径及夹取速度对钵苗的影响，确定最佳的顶杆直径、顶出速度与夹取速度组合，为提高取苗成功率与质量提供重要理论基础。

## 1　顶夹式取苗装置结构与工作原理

### 1.1　取苗装置工作原理

取苗装置采用顶夹复合式机械结构（图 1），由顶苗机构与夹取机构构成协同执行系统。顶苗机构的核心组件为顶杆-楔形块联动单元：顶杆垂直安装于穴盘底部排水孔处，通过机架上的楔形块斜面接触，将横向位移转换为垂直顶升运动，实现钵苗基质的顶出。夹取机构由非圆齿轮行星轮系与单自由度取苗臂组成，通过非圆齿轮的非线性传动特性驱动取苗臂末端执行器沿预定轨迹运动，确保夹取过程的高效性与低损伤性。

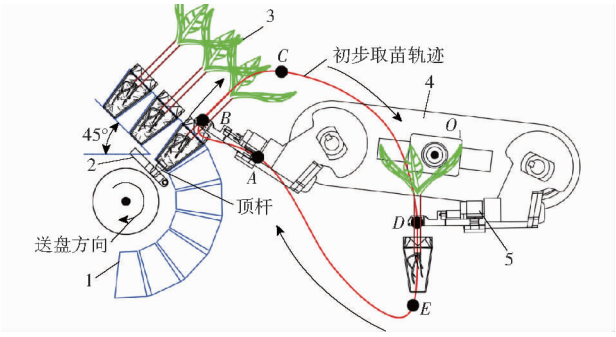



图 1　顶夹式取苗装置结构图

Fig. 1　Top-clamping seedling picking device

1. 穴盘　2. 楔形块　3. 钵苗　4. 非原齿轮行星轮系　5. 取苗臂

取苗装置的工作流程包含预取苗、顶苗、夹苗、运苗以及投苗 5 个连续阶段[14]（图 2）。预取苗阶段，取苗臂末端沿穴盘方向进行初始定位；顶苗阶段通过楔形块与顶杆的渐进式顶推，完成钵苗基质与穴盘的分离；夹苗阶段由凸轮驱动拨叉顶起伸缩杆，使夹爪闭合实现茎秆垂直提取；运苗阶段依托非圆齿轮传动系统进行预设轨迹输送；投苗阶段通过凸轮相位调控结合弹簧复位机构实现夹爪的时序释放。整个流程通过顶杆运动与非圆齿轮传动的动态耦合，形成完整的钵苗无损转移系统，有效降低了机械损伤率，并验证了机构动力学适配性[15]。

为优化取苗流程，本研究基于扦插钵苗物理特性和机械运动匹配需求[9,16]，以行星架旋转中心与取苗位置为空间约束条件，初步构建取苗臂末端运动轨迹（图 1）。通过定义行星架轴心 $O_1$、取苗点 $B$ 坐标及投苗倾角调节范围等关键参数（表 1），设计了包含 $A$（取苗起点）、$C$（运苗控制点）、$D/E$（投苗起止点）4 个节点的复合执行轨迹[17-18]。

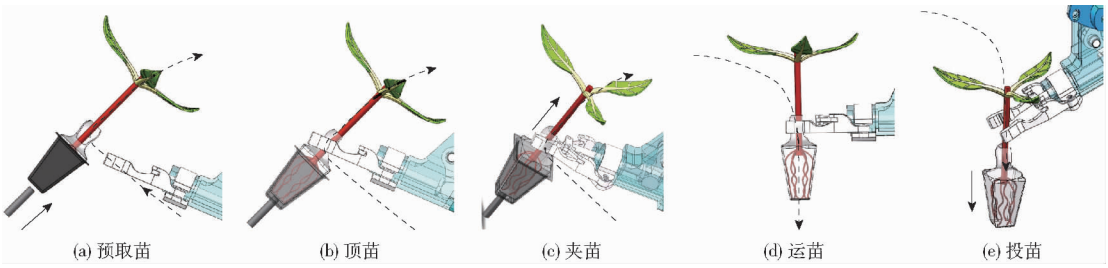



图 2 取苗工作流程

Fig. 2 Steps for seedling picking

表 1 取苗轨迹设计目标

Tab. 1 Design objectives of seedling retrieval trajectory

| 轨迹参数 | 设计值 |
|---|---|
| 行星架旋转中心 $O_1$ 坐标/mm | (0,0) |
| 取苗点 $B$ 坐标/mm | (-229,21.42) |
| 投苗点倾角/(°) | -20~20 |
| 拔苗轨迹长度/mm | >100 |
| 投苗轨迹长度/mm | >100 |
| 轨迹整体高度/mm | >240 |
| 轨迹整体宽度/mm | >210 |

## 1.2 行星轮系式夹取机构运动分析

行星轮系式夹取机构由太阳轮组、行星轮、行星架及中间轮组等构成(图 3)。太阳轮和凸锁止弧与机架固连,动力通过太阳轮轴向输入驱动行星架绕其轴线匀速转动[5]。行星架通过刚性连接同步带动中间轮Ⅰ、中间轮Ⅱ及凹锁止弧公转,同时行星轮绕自身轴线自转。中间轮Ⅱ与行星轮的啮合形成非匀速传动链,利用齿轮相位匹配控制取苗臂的变速运动轨迹,使其相对于行星架产生逆时针变速摆动[9]。

当行星架完成一周旋转时,双工位设计的取苗臂完成两株钵苗取投。行星架转速 $N$(r/min)与取苗效率 $S$(株/min)满足关系

$$S = 2N \tag{1}$$

## 1.3 顶苗机构

顶苗机构主要由楔形块、穴盘导向底板、弹簧、顶杆及顶杆安装板等组成(图 4)。楔形块与机架固连,穴盘导向底板与顶杆固定板集成于线性滑轨,共同构成横向位移模块。弹簧预紧力将顶杆初始位置限定于穴盘排水孔底部。当横向送苗装置将穴盘定位至取苗工位时,顶杆底部与楔形块斜面接触产生法向分力,克服弹簧阻力实现垂直顶升运动,完成钵苗基质与穴盘的低损分离。送苗装置的横向运动时序由不完全齿轮间歇传动控制,其主动轮齿数 $n_c$ = 35,有效驱动齿数 $n_s$ = 17,按 1∶1 传动。当间歇机构传动时处于横向送苗时间,由此单株横向送苗时间 $t_h$ 为

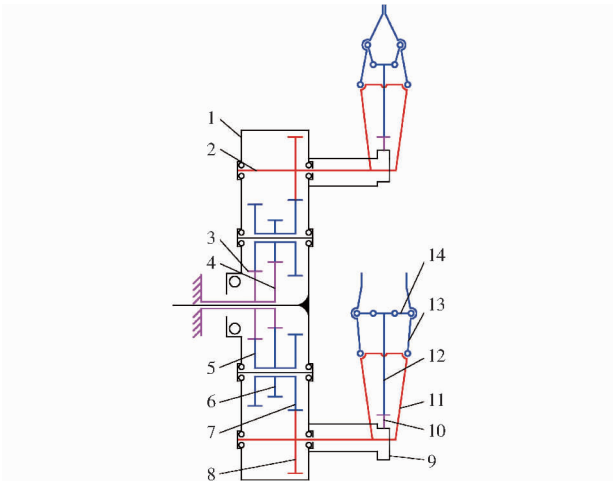



图 3 行星轮系式夹取机构结构简图

Fig. 3 Structural schematic of planetary gear train type gripping mechanism

1. 行星轮架 2. 取苗臂轴 3. 太阳轮 4. 凸锁止弧 5. 中间轮Ⅰ 6. 凹锁止弧 7. 中间轮Ⅱ 8. 行星轮 9. 取苗臂凸轮 10. 拨叉 11. 取苗臂壳体 12. 伸缩杆 13. 夹苗片 14. 拉杆

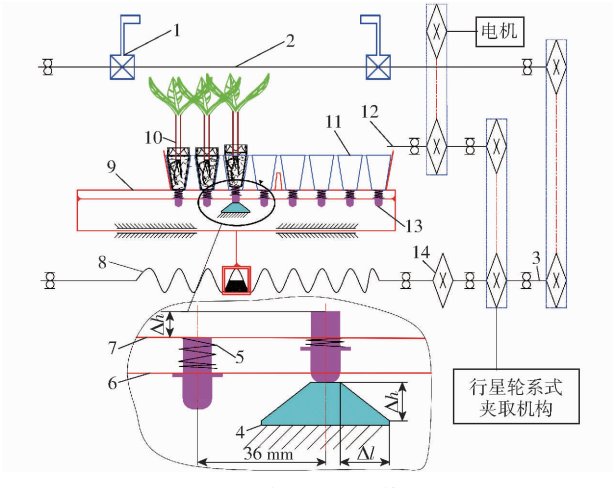



图 4 顶苗机构运动传动图

Fig. 4 Motion transmission diagram of seedling ejector mechanism

1. 纵向换行凸轮 2. 轴 2 3. 轴 3 4. 楔形块 5. 弹簧 6. 顶杆安装板 7. 穴盘导向底板 8. 双螺旋轴 9. 送苗装置 10. 扦插钵苗 11. 穴盘 12. 轴 1 13. 顶杆 14. 不完全齿轮间歇传动机构

$$t_h = \frac{60}{S}\left(1 - \frac{n_s}{n_c}\right) \tag{2}$$

式中,$n_s/n_c$ = 0.48,反映运动间歇占空比。

穴盘每穴横向间距为 36 mm，顶杆顶出动作时间 $t_d$ 由楔形块作用长度 $\Delta l$ 与横向送苗时间 $t_h$ 共同决定，即

$$t_d = \frac{\Delta l}{36} t_h = \frac{5(n_c - n_s)\Delta l}{3Sn_c} \tag{3}$$

由式(2)、(3)和顶杆行程 $\Delta h$ 推导得出顶杆顶苗速度 $V_d$(mm/s)表达式为

$$V_d = \frac{\Delta h}{t_d} = \frac{3Sn_c\Delta h}{5(n_c - n_s)\Delta l} \tag{4}$$

## 2　非圆齿轮行星轮系夹取机构运动学建模

### 2.1　行星轮系夹取机构运动学建模

行星轮系夹取机构由开链两杆组与非圆齿轮组复合构成(图 5)，其核心组件包含行星架(第 1 杆，旋转中心 $O_1$)和取苗臂(第 2 杆，旋转中心 $O_2$)。

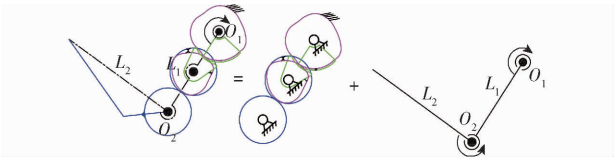



图 5　行星轮系简化模型

Fig. 5　Simplified model of double planet carrier gear train

基于预设的平夹直拔的“蚕豆”形取苗轨迹特征，通过轨迹关键位姿点与旋转中心的几何约束建立杆长方程，求解两杆尺寸参数。进一步结合行星轮系传动比计算，确保摆杆末端精确通过 4 个关键位姿点[19]。关键位姿点的几何参数见表 2，其中 $\theta$ 为取苗臂简化的第 2 杆与水平方向的夹角。

**表 2　关键位姿点参数**

**Tab. 2　Parameters of key pose points**

| 位姿点 | $x$/mm | $y$/mm | $\theta$/(°) |
|---|---|---|---|
| 取苗起点 $A$ | -187.06 | 20.53 | 141.79 |
| 取苗点 $B$ | -254.51 | 58.09 | 167.50 |
| 取苗控制点 | -228.72 | 86.12 | 171.04 |
| 运苗控制点 $C$ | -189.03 | 108.02 | 167.05 |
| 投苗开始点 $D$ | -51.45 | -3.12 | 221.41 |
| 投苗控制点 | -47.06 | -61.91 | 182.58 |
| 投苗结束点 $E$ | -47.15 | -129.31 | 206.11 |

固定铰链点 $O_1(0,0)$，动铰链点 $O_2(u,v)$，取苗臂末端点在 $P_j$ 位姿的坐标为 $(x_j,y_j)$，行星架长度为 $L_1$，取苗臂长度为 $L_2$，取苗臂与水平方向的角度为 $\theta_j$，行星架初始安装角为 $\alpha_0$，行星架相对转角为 $\alpha_j$，行星架与取苗臂的转角为 $\beta_j$，如图 6 所示。

运动学方程可表述为

$$\begin{cases} x_j = L_1\cos(\alpha_0 - \alpha_j) + L_2\cos\theta_j \\ y_j = L_1\sin(\alpha_0 - \alpha_j) + L_2\sin\theta_j \\ \beta_j = \theta_j - (\alpha_0 - \alpha_j) \end{cases} \tag{5}$$

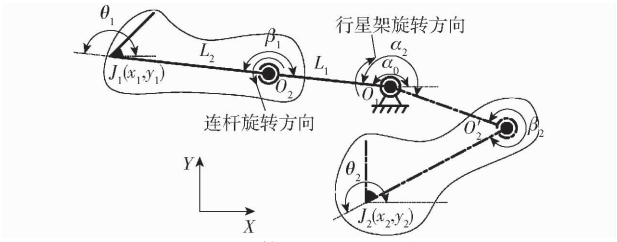



图 6　刚体平面运动示意图

Fig. 6　Rigid body planar motion schematic

取苗点 $B$ 为两杆机构到达距旋转中心点 $O_1$ 最远端。此时两杆共线，行星架角速度为 $\omega_B$、$O_1B$ 距离为 $L_1 + L_2$，瞬时线速度即拔苗速度 $V_B$，有

$$V_B = \omega_B(L_1 + L_2) = \frac{S\pi(L_1 + L_2)}{60} \tag{6}$$

在平面运动中，刚体运动可视为平移和旋转的组合。对于平面上任意一点 $(x,y)$，经过刚体运动后，新坐标 $(x',y')$ 为

$$[x' \quad y']^{\mathrm{T}} = [x \quad y]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_j \tag{7}$$

其中

$$\boldsymbol{D}_j = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_j & -\sin\Delta\theta_j & \Delta x_j \\ \sin\Delta\theta_j & \cos\Delta\theta_j & \Delta y_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\Delta\theta_j = \theta_j - \Delta\theta_1 \tag{9}$$

式中　$\Delta\theta_j$——取苗臂相对转角

$\Delta\theta_1$——第一位姿时取苗臂姿态角

$\Delta x_j$、$\Delta y_j$——平移分量

布尔梅斯特曲线是解决“四位置刚体导引问题”的核心工具，其通过在有限解域内筛选可行解，确保行星架能够实现整周转动，从而驱动取苗臂末端完成包含图 1 所示取苗轨迹的平面复合运动。行星架固定铰链点与动铰链点的几何关系需满足

$$\begin{aligned} &(u\cos\Delta\theta_j - v\sin\Delta\theta_j + \Delta x_j)^2 + \\ &(u\sin\Delta\theta_j + v\cos\Delta\theta_j + \Delta y_j)^2 = L_1^2 \end{aligned} \tag{10}$$

式中　$u$、$v$——动铰链点 $O_2$ 在固定坐标系下的横、纵坐标

联立 4 个位姿点约束方程，消元后得到三次曲线方程

$$\begin{aligned} &a_3u^3 + a_2u^2v + a_1uv^2 + a_0v^3 + b_2u^2 + \\ &b_1uv + b_0v^2 + c_1u + c_0v + d = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

式中　$a_3$、$a_2$、$a_1$、$a_0$——三次项系数

$b_2$、$b_1$、$b_0$——二次项系数

$c_1$、$c_0$——一次项系数

$d$——常数项

此方程为布尔梅斯特曲线方程，其解域涵盖了两铰链点所有可能的位置组合，为确定机构的几何参数提供了重要依据。为了得到行星架和取苗臂参数，建立约束

$$\begin{cases} L_1 + L_2 \geqslant 330 \\ |L_1 - L_2| \leqslant 210 \\ L_1 \leqslant L_2 \leqslant 2L_1 \end{cases} \tag{12}$$

为得到最优的行星架和取苗臂参数，以最小化轨迹跟踪误差为目标，定义优化函数

$$F = \min_{L_1, L_2, |\alpha_j|, |\theta_j|} \sum_{j=1}^{7} [(x_j - \hat{x}_j)^2 + (y_j - \hat{y}_j)^2] \tag{13}$$

式中 $(\hat{x}_j, \hat{y}_j)$——模型预测值

由式(12)、(13)计算得到初始第 1 杆长 $L_1^{(0)} = 98.35$ mm，初始第 2 杆长 $L_2^{(0)} = 131.65$ mm。为了便于设计非圆齿轮，将结果调整为 $L_1 = 100$ mm，$L_2 = 130$ mm。

## 2.2 行星轮系传动复合设计

基于离散转角数据$(\alpha_j, \beta_j)$，采用三次非均匀 B 样条插值构造非圆齿轮传动比函数 $i(\alpha_j)$。为确保传动比函数在行星架整周运动中的连续性与周期性闭合，强制满足边界条件

$$\begin{cases} i(0°) = i(360°) \\ \left.\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\alpha}\right|_{\alpha=0°} = \left.\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\alpha}\right|_{\alpha=360°} \end{cases} \tag{14}$$

为了使传动比连续定义周期节点矢量 $\boldsymbol{U} = (0°, 0°, 0°, 0°, 120°, 240°, 360°, 360°, 360°, 360°)$，传动比函数可表示为

$$i(\alpha) = \sum_{k=0}^{n} N_{k,3}(\alpha) i_k \tag{15}$$

式中 $N_{k,3}(\alpha)$——三次 B 样条基函数

$i_k$——控制点处的传动比

以预取苗控制点 $A$ 为取苗轨迹起始基准点，根据上述数据求出两杆转角传动比关系，其变化特性如图 7 黑色曲线所示。在 $\alpha \in [250°, 360°]$阶段，传动比呈现显著波动特征($\Delta i = 1.45$)，且其最小值达到 0.05。该数值特征表明：若直接采用原始传动比曲线进行非圆齿轮设计，将导致齿轮啮合过程中产生剧烈运动冲击，难以满足齿廓啮合的基本几何条件。

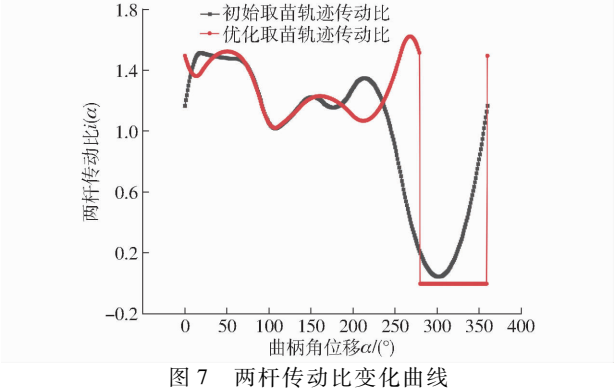



图 7 两杆传动比变化曲线

Fig. 7 Two-link transmission ratio variation curves

为优化传动特性，在保持取苗臂末端执行轨迹关键位姿点不变的前提下，引入凹凸锁止弧以修正传动特性。锁止弧的极径函数 $r_{\mathrm{lock}}(\alpha)$和凹锁止弧接触角 $\chi$ 为

$$\begin{cases} r_{\mathrm{lock}}(\alpha) = R_0(1 + \eta_1 \cos\alpha + \eta_2 \cos(2\alpha)) \\ \chi = \arccos \dfrac{R_0}{a} \end{cases} \tag{16}$$

式中 $R_0$——凸锁止弧基准半径

$\eta_1$、$\eta_2$——形状调制系数

$a$——齿轮中心距

凹凸锁止弧还需满足连续性条件

$$\begin{cases} r_{\mathrm{lock}}(\alpha) = r_1(\alpha_a^-) \\ \left.\dfrac{\mathrm{d}r_{\mathrm{lock}}}{\mathrm{d}\alpha}\right|_{\alpha=\alpha_a} = \left.\dfrac{\mathrm{d}r_1}{\mathrm{d}\alpha}\right|_{\alpha=\alpha_a^-} = 0 \\ \left.\dfrac{\mathrm{d}^2 r_{\mathrm{lock}}}{\mathrm{d}\alpha^2}\right|_{\alpha=\alpha_a} = \left.\dfrac{\mathrm{d}^2 r_1}{\mathrm{d}\alpha^2}\right|_{\alpha=\alpha_a^-} \end{cases} \tag{17}$$

式中 $\alpha_a^-$——锁止弧起始角度

联立式(16)和式(17)求解得 $\eta_1 = 0.12$，$\eta_2 = -0.05$，锁止弧有效作用域为 $\alpha \in [280°, 360°]$。初始设计中，锁止弧极径设定为 $R_0 = 25$ mm 并得出凹锁止弧接触角 $\chi$ 为 30°。为最小化锁止弧介入时的冲击载荷 $F_c$，采用动态模型进行分析，有

$$F_c = k\delta + c\dot{\delta} + m\ddot{\delta} \tag{18}$$

式中 $\delta$——啮合间隙　　$\dot{\delta}$——相对速度

$\ddot{\delta}$——加速度　　$k$——接触刚度

$c$——阻尼系数　　$m$——质量

通过有限元接触仿真优化锁止弧曲率半径，使取苗速度 30 r/min 时最大冲击载荷从 146.55 N 降至 85 N，降幅达 42%。优化后的锁止弧参数为基准半径 $R_0 = 35$ mm，凹锁止弧接触角为 44.43°。优化后的传动比如图 7 红色曲线所示，有齿部分的传动比范围从 0.05 ~ 1.50 优化至 1.02 ~ 1.61，波动幅值降低 59.31%，有效减缓了取苗过程中的冲击。

## 2.3 非圆齿轮节曲线计算与实现轨迹

加入凹凸锁止弧后，行星架与取苗臂的传动比变化显著减小。由于行星架杆长为 100 mm，采用一级传动会导致齿轮尺寸过大，影响取苗臂灵活性，因此采用二级传动方案，将太阳轮与中间轮的中心距 $a$ 设定为 50 mm。基于修正后的传动比函数 $i^*(\alpha)$，太阳轮与中间轮的极径函数定义为

$$\begin{cases} r_1(\alpha) = \dfrac{a i^*(\alpha)}{1 + i(\phi_1)} \\ r_2(\alpha) = \dfrac{a}{1 + i^*(\alpha)} \end{cases} \tag{19}$$

基于式(19)求解得到的非圆齿轮节曲线如图 8

所示。采用展成法设计非圆齿轮，其中太阳轮与中间轮模数相同，齿数分别为 25 齿和 20 齿。剔除太阳轮的[280°，360°]范围内的 5 齿以凹凸锁止弧替代，确保在行星架完成整周旋转后，取苗臂也完成整周旋转。取苗臂的取苗轨迹如图 9 红色曲线所示，取苗理论轨迹在各取苗关键位置与理想轨迹基本一致，验证了该设计方案的可行性。

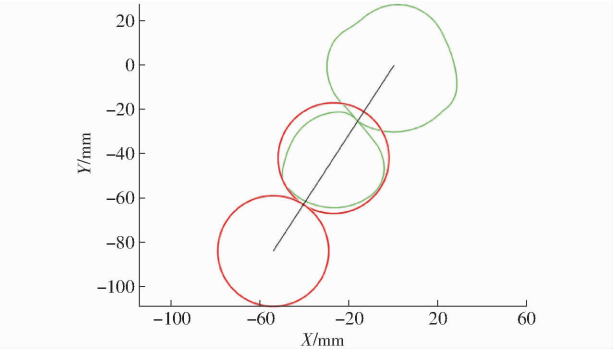



图 8　非圆齿轮节曲线

Fig. 8　Non-circular gear tooth curve

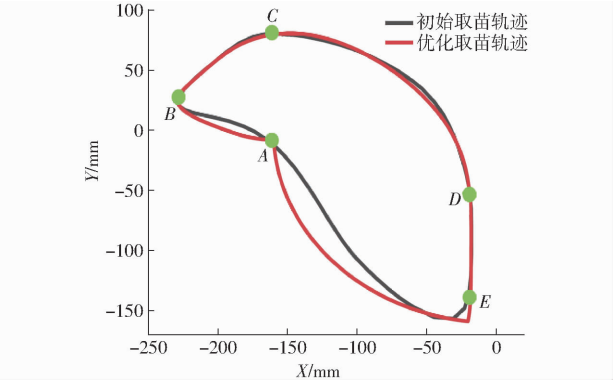



图 9　取苗轨迹对比

Fig. 9　Comparison of seedling extraction trajectories

## 3　基于离散元的取苗装置参数分析

### 3.1　离散元建模

本研究以红叶石楠扦插苗（苗龄 50 d，基质含水率 50%，茎秆直径 4 mm）为研究对象，构建根−土−机械耦合离散元模型[20]。通过万能试验机在 5 mm/min 加载速率下测得基质与穴盘的粘附力范围为 1 ~ 5 N，钵苗根系拔出力经测试为 7 ~ 12 N。基质采用泥炭、蛭石、珍珠岩体积比为 3∶1∶1（容重 0.793 9 g/cm$^3$），其力学特性通过直剪试验标定：内聚力 25.12 kPa，内摩擦角 28.2°[21]。为模拟根系−土壤与机械系统的交互作用，采用分层多尺度建模方法构建根茎：主干由 0.8 mm 粒径颗粒按蜂巢结构逐层堆叠，根系采用 0.6/0.4 mm 双粒径颗粒链式组合[22]（图 10）。机械部件包含 $\phi$4 ~ 6 mm 顶杆及 2 mm 厚夹爪。材料本征参数基于文献[23 − 25]确定，鉴于扦插苗茎秆包含新生组织与半木质化组织共存的特性，模型参数选取木质化与半木质化材料性能的适中值（见表 3、4）。

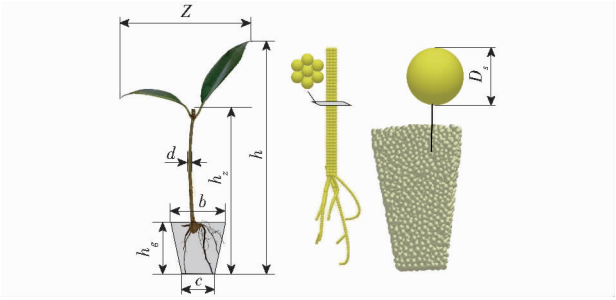



图 10　离散元模型

Fig. 10　Discrete element model

**表 3　材料本征参数**

**Tab. 3　Material intrinsic parameters**

| 参数 | 茎秆 | 基质 | 钢 | 穴盘 |
|---|---|---|---|---|
| 泊松比 | 0.2 | 0.246 | 0.29 | 0.38 |
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 112 | 793.9 | 7 850 | 1 400 |
| 剪切模量/Pa | $6\times10^6$ | $1.6\times10^6$ | $7.01\times10^{10}$ | $8.66\times10^8$ |

**表 4　接触参数**

**Tab. 4　Contact parameters**

| 参数 | 茎秆−茎秆 | 茎秆−基质 | 基质−基质 | 茎秆−钢 | 基质−穴盘 | 基质−钢 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 恢复系数 | 0.35 | 0.2 | 0.12 | 0.51 | 0.40 | 0.60 |
| 静摩擦因数 | 0.66 | 0.54 | 0.65 | 0.74 | 0.20 | 0.39 |
| 动摩擦因数 | 0.45 | 0.12 | 0.34 | 0.46 | 0.02 | 0.26 |

基于 Hertz − Mindlin 接触理论，建立复合界面模型并引入粘结模型（Bonding）与 JKR 粘附模型[10]。通过系统性的参数优化流程，针对基质剪切/压缩、茎秆拉伸/三点弯曲等关键力学行为（图 11），反复修正粘结参数以实现仿真与物理试验

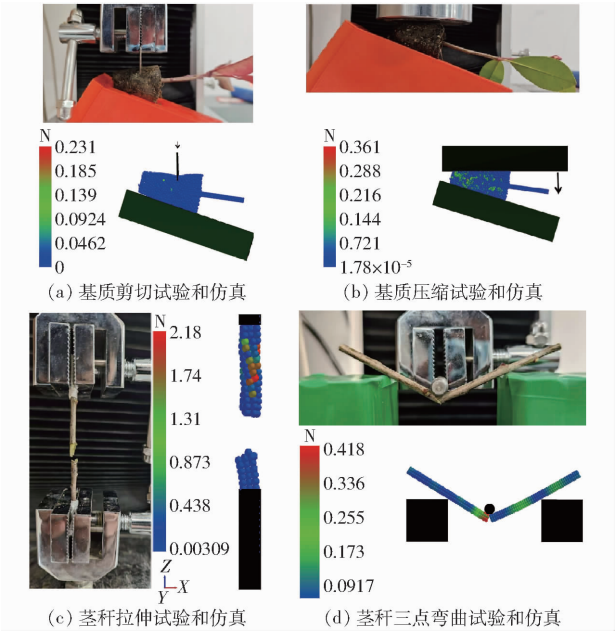



图 11　物理试验与仿真模型验证

Fig. 11　Physical experiment and simulation

的等效。最终确定:茎秆颗粒间法向刚度 3.26 × $10^{10}$ N/$m^3$,临界法向应力 2.38 MPa(与三点弯曲试验位移-倾斜角偏差小于 7%);基质颗粒法向刚度 1 × $10^8$ N/$m^3$,切向临界应力 150 kPa(直剪试验拟合度 $R^2$ = 0.93)。根-土界面表面能 $\gamma$ 设定为 1.5 J/$m^2$[26],粘结参数见表 5[7]。

**表 5 Bonding 参数**

**Tab. 5 Bonding parameters**

| 材料 | 法向粘结刚度/(N·$m^{-3}$) | 切向粘结刚度/(N·$m^{-3}$) | 法向临界应力/Pa | 切向临界应力/Pa |
|---|---|---|---|---|
| 茎秆-茎秆 | 3.26 × $10^{10}$ | 2.17 × $10^{10}$ | 2.38 × $10^6$ | 1.59 × $10^6$ |
| 基质-基质 | 1 × $10^8$ | 5 × $10^7$ | 3 × $10^5$ | 1.5 × $10^5$ |

### 3.2 仿真模型构建

在 EDEM 2022 软件中建立一个用于研究顶夹式取苗作业方案的仿真模型(图 12)。为了模拟根茎复合体的自然生长形态及其空间分布特征,使用颗粒工厂在穴盘中心生成了相应的结构,并应用分层填充的方法来布置基质颗粒[27]。随后,激活粘结模型并给予系统 0.5 s 的弛豫时间,确保土壤颗粒全部生成堆积后通过 Bonding 键相互连接从而减少基质内的空隙率[26]。动力学边界条件设定时,考虑到模拟的真实性,初始重力场沿 $x-z$ 平面的对角线方向施加,以模拟植物在自然状态下的生长条件;整个仿真过程持续时间为 1 s,时间步长设定为 0.05 s(即总仿真时间的 5%)。最后,为了更准确地反映实际取苗操作的物理条件,将重力方向调整至 $z$ 轴负方向。

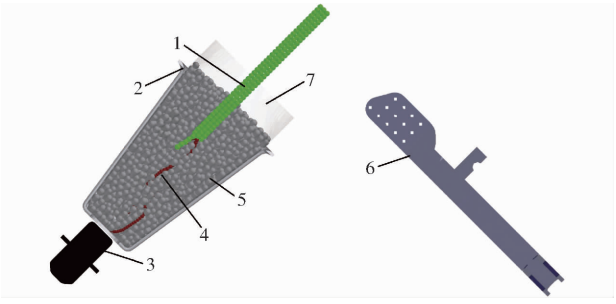



图 12 顶夹式取苗仿真模型

Fig. 12 Top-clamping seedling picking simulation model

1. 茎秆 2. 穴盘 3. 顶杆 4. 根茎 5. 土壤 6. 夹爪片 7. 育苗袋

### 3.3 仿真结果分析

通过离散元仿真研究无顶杆单夹取茎秆取苗过程(图 13),结果揭示了夹取速度与根土复合体破坏程度之间的显著正相关性。试验结果表明,随着取苗效率从 40 株/min($V_B$≈482 mm/s)增加到 80 株/min($V_B$≈963 mm/s),土壤颗粒的速度场均匀性显著下降,变异系数从 0.18 上升至 0.23。键力学分析进一步显示,颗粒间键断裂率随取苗效率的增加而显著上升,有效键连接密度从 93.4% 降至 71.7%,剪切断裂的比例也从 12% 增至 27%。当拔苗速度超过 750 mm/s 时,破坏模式从基质裂纹扩展转变为界面剥离。因此,将取苗效率控制在 60 株/min($V_B$≈723 mm/s),以平衡效率与根系完整性。

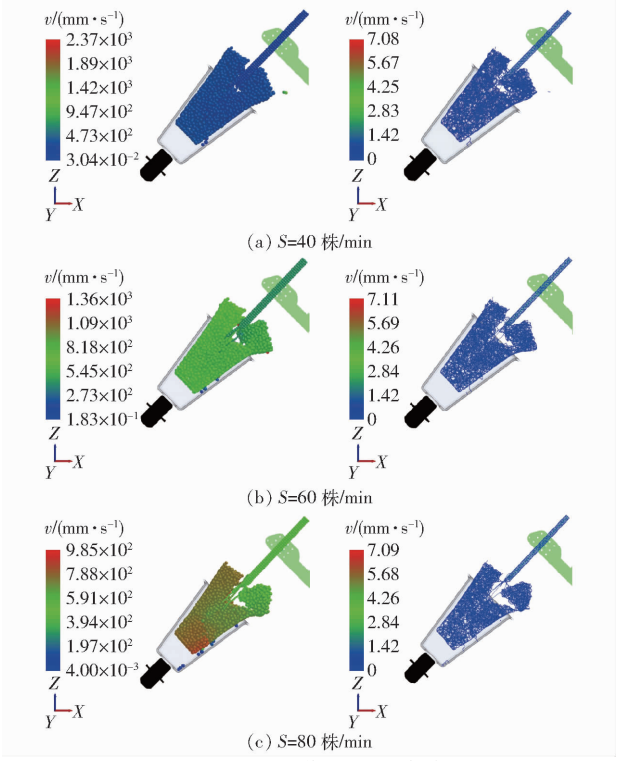



图 13 无顶杆作用下取苗效果

Fig. 13 Seedling picking effects without ejector rod

基于文献[27-28]及 $\phi$4/6 mm 顶杆的动力学仿真(图 14),可知顶杆几何参数与运动学响应之间存在复杂的非线性关系。相较于直径较小的顶杆,直径为 6 mm 的顶杆表现出更优性能:顶出行程缩短了 25%,基质扰动减少了 28%,插入深度降低了 35%。这主要是因为较大的直径能够抑制土壤中的

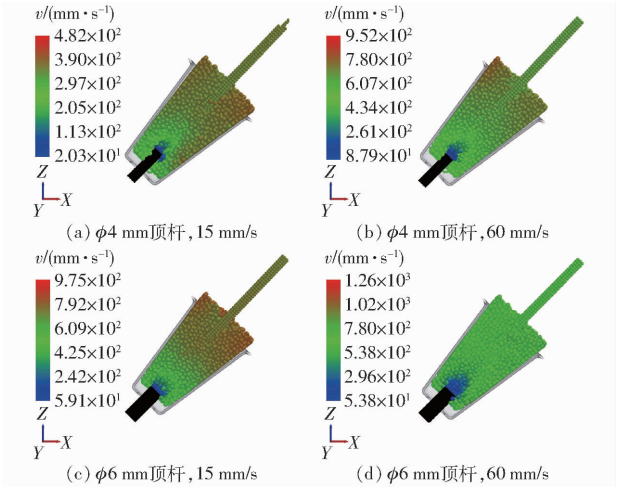



图 14 顶杆作用下钵苗颗粒速度仿真图

Fig. 14 Velocity simulation diagrams of seedling plug particles under ejector rod

塑性变形能量积累，并分散应力分布。速度阈值分析指出，在顶升速度达到 60 mm/s 时，作用时间为 0.095 s，需满足粘附力临界值 5 N 以防钵苗飞脱。仿真结果表明，顶杆直径越大、顶升速度越慢，则对钵苗基质的破坏越小。优化设计方案采用 $\phi$6 mm 的顶杆与 6 mm 行程，可以显著提高取苗效率并减少基质扰动。

结合单夹茎取苗与单顶杆顶出基质仿真试验，本研究选取取苗效率 60 株/min 及顶杆行程 $\Delta h$ = 6 mm 为基准参数，并结合式(4)推导确定楔形块作用长度 $\Delta l$ = 15 mm。理论计算表明，在取苗转速分别为 40、60、80 株/min 时，对应的顶苗速度依次为 18.67、28、37.33 mm/s。

通过顶杆与夹爪协同作用仿真(图 15)，对比分析不同取苗效率下的基质动态响应特性。颗粒速度

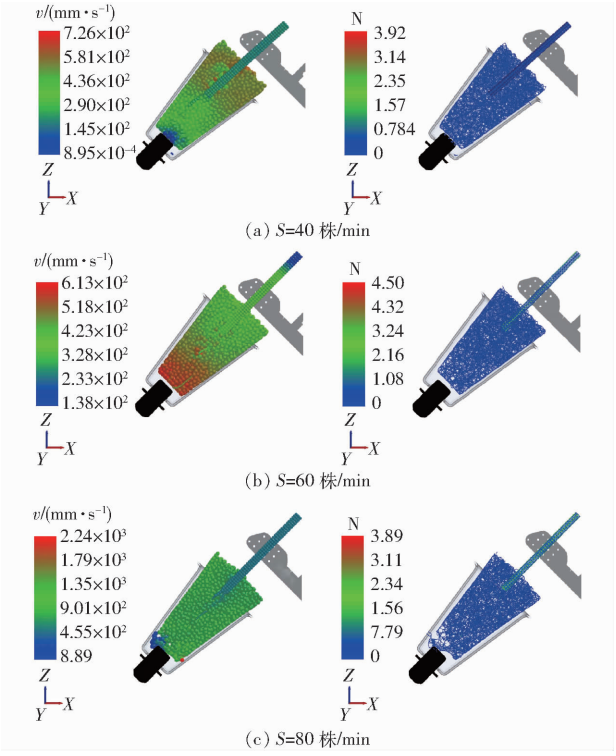



图 15　顶杆与夹爪协同作用下的取苗效果图

Fig. 15　Seedling picking effect under collaborative action of ejector rod and gripper

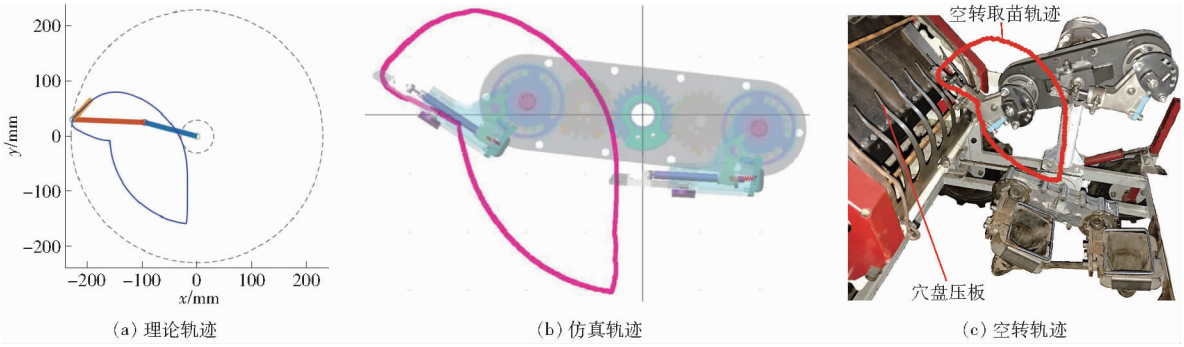
云图及 Bond 键法向力演变显示，取苗效率与基质损伤程度呈显著正相关。具体而言，在较低取苗效率(40、60 株/min)时，钵苗基质未发生结构性破坏；然而，当速度增至 80 株/min 时，底部基质出现局部破坏现象。机理分析指出，在高速工况下，顶杆冲击效应与夹爪快速夹取动作的时间-空间耦合导致底部基质在脱离穴盘过程中承受动态挤压应力集中，从而引起塑性变形及粘结键断裂。上述结果揭示了取苗效率对基质完整性的临界阈值效应。优化顶苗速度与夹取速度的动态匹配关系，可有效降低机械作业对基质的损伤。

## 4　顶夹式取苗装置样机试验

### 4.1　虚拟样机仿真与空转试验

基于优选的行星轮系参数解，结合非圆齿轮组转角相位关系，以点 $A$ 为初始状态，确定第 1 行星架中 4 个非圆齿轮的初始安装角 。使用 Solidworks 完成了取苗机构的三维建模，并通过 Parasolid 格式导入 ADAMS 软件以构建多体动力学模型，在此过程中添加了转动副、齿轮副及接触力约束。理论轨迹与仿真轨迹(图 16a、16b)表明，在持苗段($B-C-D$)曲率半径误差以及投苗段($D-E$)的关键位置点上，最大位置偏差为 1.98 mm(投苗结束点 E)，且行星架转角同步误差 $\Delta\alpha \leqslant 0.8°$均在允许范围内，验证了理论模型与结构设计的有效性。

在物理样机集成测试阶段，将装配完成的取苗机构搭载于自主研制的步行式移栽机进行空载试验。通过高速摄像机捕捉取苗轨迹，经图像处理提取的实测轨迹与理论轨迹之间的 Hausdorff 距离为 3.2 mm，误差主要源于行星架轴承座配合间隙(累计公差 ±0.15 mm)及非圆齿轮间隙(实测 0.12 ~ 0.25 mm)共同作用导致的运动传递偏差。动态性能测试表明：当行星架转速提升至 60 r/min 时，在取苗点 $A$ 处取苗臂的角加速度为 −8.78 rad/s$^2$，与理论计算值 −9.12 rad/s$^2$ 的偏差率为 3.73%。




(a) 理论轨迹　(b) 仿真轨迹　(c) 空转轨迹

图 16　样机仿真和安装

Fig. 16　Prototype simulation and installation

### 4.2 取苗试验

为验证顶夹式取苗装置的作业性能，以苗龄 50 ~ 65 d、茎径直径 4 mm、苗高小于等于 150 mm、叶径小于等于 60 mm 的红叶石楠扦插钵苗为对象开展系统试验。试验采用 128 穴(8 × 16)正方形锥体穴盘(上、下口径 30 ~ 16 mm)，基质按泥炭、蛭石、珍珠岩体积比 3∶1∶1配比，含水率 50%(含水率过高基质易散，过低易损坏)，设置 40、60、80、100 株/min 4 组取苗效率，每组重复 3 次试验，单次试验样本量 100 株。

试验过程(图 17)分析表明，装置运行周期包含 3 个阶段：预取苗阶段中左侧取苗臂沿穴盘方向进入取苗状态，楔形块推动顶杆实现基质与穴盘预分离；取投苗阶段通过左侧夹爪垂直夹持茎秆拔苗并移送钵苗至投苗点，右侧取苗臂同步完成投苗动作；持苗、返程阶段中左侧取苗臂夹持钵苗至投苗位置，而右侧取苗臂则返回准备下一次取苗。结果表明，各阶段位姿与设计轨迹预期相符，验证了该装置的有效性和稳定性。

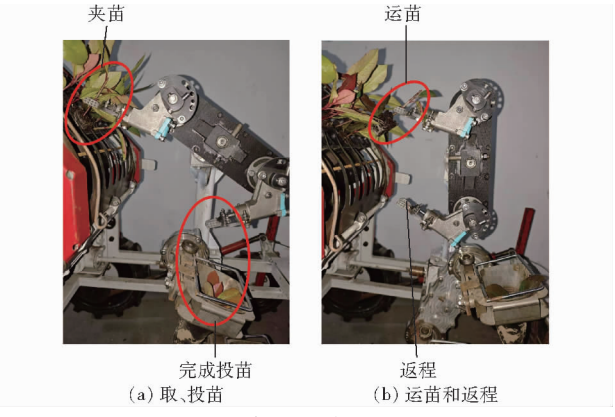



图 17 扦插钵苗取投试验

Fig. 17 Transplanting experiment of cuttings in plug trays

试验结果如表 6 所示，当取苗效率从 40 株/min 提升至 100 株/min 时，投苗失败数由 2 株增至 12 株，取投苗成功率从 95.33% 下降至 88.00%。值得关注的是，60 株/min 工况表现显著优于其他区间，在维持较高取苗效率的同时，成功将取投苗成功率达到 94.33%，且基质与茎秆的损伤效率均处于较低水平。损伤量化分析表明：基质破碎(以肉眼可见的基质结构破坏)率与取苗效率呈显著正相关(0.67% ~ 5.33%)，主要原因是顶杆冲击导致基质界面粘结失效；茎秆损伤(表皮明显压痕或断裂)率随速度提升同步升高(0 ~ 3.33%)，主要源于夹爪动态夹持过程中摩擦与取苗冲击耦合作用。通过试验视频逐帧发现，取苗成功但投苗失败可归因于基质破碎以及高速运动下苗叶在空气阻力作用下未能完全进入栽植机构，投苗失败概率随取苗效率提升也呈显著上升趋势。

表 6 扦插苗取苗试验结果

Tab. 6 Results of seedling extraction

| 取苗效率/(株·min$^{-1}$) | 顶苗速度/(mm·s$^{-1}$) | 取苗成功数/株 | 投苗失败数/株 | 基质破碎数/株 | 基质破碎率/% | 茎秆损伤率/% | 取投苗成功率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 18.67 | 288 | 2 | 2 | 0.67 | 0 | 95.33 |
| 60 | 28.00 | 287 | 4 | 9 | 3.00 | 1.67 | 94.33 |
| 80 | 37.33 | 281 | 9 | 15 | 5.00 | 2.67 | 90.67 |
| 100 | 46.67 | 276 | 12 | 16 | 5.33 | 3.33 | 88.00 |

经过对试验数据的系统分析，综合评估结果表明：当取苗效率设定为 60 株/min 时，整机综合性能指标达到最佳平衡状态，其动作时序与理论模型高度一致，验证了运动学模型的工程适用性。损伤机理研究表明，基质破碎率的升高是夹爪惯性冲击与根系固结力不足两者耦合作用的结果；而茎秆损伤率的良好控制得益于苗爪表面涂抹的硅胶缓冲层，兼具缓冲吸能与抗剪切功能。试验数据显示，顶出机构与平夹直拔复合式取苗机构的协同工作方案可有效降低基质破碎率，同时提升作业稳定性。该设计通过试验验证了运动学模型的工程可靠性。

## 5 结论

(1)针对园艺扦插苗根系盘结度低、茎叶扩展显著的特性，提出一种基于非圆齿轮行星轮系的“平夹直拔”顶夹式取苗方案。该方案通过楔形块顶出钵苗基质以降低粘附力，采用末端轨迹呈“蚕豆”形的行星轮系夹取机构实现低损分离。基于非圆齿轮传动特性建立夹取机构运动学模型，通过多目标优化算法确定行星架长度 100 mm、取苗臂长度 130 mm，并采用凹凸锁止弧修正方法确定锁止弧基准半径 35 mm、接触角 44.43°。通过建立行星架与取苗臂转角映射关系求解非圆齿轮节曲线，试验验证显示优化后取苗轨迹与理想轨迹在关键位姿点高度吻合，验证了方案有效性。

(2)基于三点弯曲试验、拉伸试验与压缩试验的参数标定，完成离散元模型验证。仿真分析表明，顶杆速度、直径及楔形块作用长度对取苗过程有显著影响：过快的顶杆速度会导致钵苗飞脱，而过细的顶杆直径则易使钵体被穿透。综合这些因素，确定了最佳参数组合：取苗效率 60 株/min、顶杆直径 6 mm、行程 $\Delta h = 6$ mm、楔形块作用长度 $\Delta l = 15$ mm 及顶苗速度 28 mm/s，确保高效且低损伤的取苗操作。

(3)基于优化参数开展仿真建模并完成样机试制与测试，台架试验验证该夹取机构可满足扦插钵

苗作业要求。在 40、60、80、100 株/min 多工况测试中，各转速指标存在波动但整体达标，印证机构设计合理性。试验表明：转速提升虽显著提高作业效率，但由于扦插苗物理特性限制，同步引发取投苗成功率下降与损伤率上升。综合评价，60 株/min 工况综合性能最优，其取投苗成功率稳定保持 94% 以上且无明显伤苗现象，动作时序与理论高度一致，充分验证顶夹式协同取苗机构的结构可靠性。

## 参 考 文 献


[1] 石红旗，苗峰. 试论园林苗木容器化栽培的应用和发展趋势[J]. 中国园林，2013，29(1)：107－109.
Shi Hongqi, Miao Feng. The application and development trend of garden nursery stock container cultivation[J]. Chinese Landscape Architecture，2013，29(1)：107－109. (in Chinese)

[2] 魏立刚，张娟，张尧，等. 红叶石楠营养钵扦插繁殖技术[J]. 北方园艺，2011(19)：71－72.
Wei Ligang, Zhang Juan, Zhang Yao, et al. The cutting reproduction technique on the culture pans of photinia fraser[J]. Northern Horticulture，2011(19)：71－72. (in Chinese)

[3] LY/T 2294—2014　红叶石楠扦插繁殖技术规程[S].

[4] 王宁，任玲，李江全，等. 穴盘苗移栽机自动取苗技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报，2021，42(1)：59－66.
Wang Ning, Ren Ling, Li Jiangquan, et al. Research status and prospect of automatic seedling picking technology of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021，42(1)：59－66. (in Chinese)

[5] Rahul K, Raheman H, Paradkar V. Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019，166：105014.

[6] 俞高红，俞腾飞，叶秉良，等. 一种旋转式穴盘苗取苗机构的设计[J]. 机械工程学报，2015，51(7)：67－76.
Yu Gaohong, Yu Tengfei, Ye Bingliang, et al. Design of a rotary plug seedling pick-up mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering，2015，51(7)：67－76. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 赵匀，樊福雷，宋志超，等. 反转式共轭凸轮蔬菜钵苗移栽机构的设计与仿真[J]. 农业工程学报，2014，30(14)：8－16.
Zhao Yun, Fan Fulei, Song Zhichao, et al. Design and simulation of inverted vegetable pot seedling transplanting mechanism with conjugate cam[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(14)：8－16. (in Chinese)

[9] 程迪. 基于关键位姿点与轨迹约束的取苗机构优化设计与试验研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2023.
Cheng Di. Optimization design and experimental research of seedling picking mechanism based on key pose points and trajectory constraints[D]. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University，2023. (in Chinese)

[10] 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)

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

[12] 刘蒙滋，姜凯，王秀，等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究，2024，46(10)：1－8，20.
Liu Mengzi, Jiang Kai, Wang Xiu, et al. Research status and prospect of automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2024，46(10)：1－8，20. (in Chinese)

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

[14] 王磊，方子辰，王振涛，等. 不等速行星轮系机构混合多位姿综合方法及应用[J]. 中国机械工程，2024，35(12)：2211－2220.
Wang Lei, Fang Zichen, Wang Zhentao, et al. Mixed multi pose synthesis method and applications of unequal velocity planetary gear trains[J]. China Mechanical Engineering，2024，35(12)：2211－2220. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 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 seeding-bowl-root multiple properties[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2017. (in Chinese)

[17] 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):64 - 71.
Ma Yifan, Wang Weibing, Feng Jingan, et al. Experimental study on compression properties transplanted tomato plug seedlings pot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(1):64 - 71. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 俞高红,王系林,刘建刚,等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):94 - 103.
Yu Gaohong, Wang Xilin, Liu Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot peedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):94 - 103. (in Chinese)

[20] 高国华,谢海峰,王天宝. 设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(23):24 - 31.
Gao Guohua, Xie Haifeng, Wang Tianbao. EDEM simulation and experiment of pullout force protected vegetable harvester [J]. Transactions of the CSAE,2017,33(23):24 - 31. (in Chinese)

[21] 郭辉,郭烈红,李海峰,等. 适收期油菜茎秆离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(24):20 - 29.
Guo Hui, Guo Liehong, Li Haifeng, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters for rapeseed stems during the suitable harvest period[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(24):20 - 29. (in Chinese)

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

[23] Tian Y, Zeng Z, Xing Y. A review of discrete element method applications in soil-plant interactions: challenges and opportunities[J]. Agriculture, 2024,14(9):1486.

[24] 鞠青娟. 基于 ANSYS 建立的油松根土复合体有限元模型的验证[D]. 北京:北京林业大学,2015.
Ju Qingjuan. To verify the finite element model of the Pinus tabulaeformits root-soil composite base on the ANSYS[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2015. (in Chinese)

[25] 张凯,杨松. 基于离散元模拟的草本植物根系分布对黏土抗剪强度的影响研究[J]. 草原与草坪,2022,42(2):59 - 66.
Zhang Kai, Yang Song. Influence of herbal plant root distribution on soil consolidation capacity based on discrete element simulation[J]. Grassland and Turf,2022,42(2):59 - 66. (in Chinese)

[26] 曾百功,李敏,姚亮华,等. 基于图像重建的黄连根系-土壤复合体力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(19):75 - 84.
Zeng Baigong, Li Min, Yao Lianghua, et al. Simulation and experiment on the mechanical properties of *Coptis chinensis* root-soil composites based on image reconstruction[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(19):75 - 84. (in Chinese)

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

[28] 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)