doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.024

漂浮穴盘苗取苗爪设计与试验

别 琼[1,2] 颜 华[1,3] 赵翔烽[1,2] 刘永强[4] 王应芬[4] 于 尧[4] 林蜀云[4]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 现代农装科技股份有限公司，北京 100083；
3. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083；4. 贵州省山地农业机械研究所，贵阳 550002)

摘要：漂浮盘育苗通过穴盘底孔可实现水分、养分及农药施放，具有方便管理、生产成本低等优点，在我国西南地区已有较大规模应用。本文针对漂浮盘育苗移栽设计了一种夹钵式弹性取苗爪。基于钵体顶出和压缩试验，确定了国福910辣椒苗钵体力学性质参数；结合ADAMS刚柔耦合仿真试验，得到苗爪片尖端入钵轨迹，验证了取苗爪的合理性；建立了取苗力学模型，分析了影响取苗成功率的关键性因素。以苗钵含水率、爪片宽度、取苗深度为试验因素，开展取苗爪辣椒苗取苗正交试验，并确定取苗最佳组合为取苗深度40 mm、爪片宽度5 mm、基质含水率55%~65%，此时取苗成功率为99%，基质损失率为3.18%。不同作物适应性试验结果表明，甘蓝茶玛、烟苗K326取苗成功率不小于98%，云烟87取苗成功率为94%，具有良好适应性。

关键词：漂浮盘；取苗爪；移栽机；设计

中图分类号：S223.92 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S1-0230-07

Design and Experimentation of Seedling Gripper for Floating Tray Seedlings

BIE Qiong[1,2] YAN Hua[1,3] ZHAO Xiangfeng[1,2] LIU Yongqiang[4] WANG Yingfen[4]
YU Yao[4] LIN Shuyun[4]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.,Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *Modern Agricultural Equipment Co.,Ltd., Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
4. *Guizhou Mountain Agricultural Machinery Research Institute, Guiyang* 550002, *China*)

Abstract: Floating tray seedling cultivation enables the delivery of water, nutrients, and pesticides through the bottom holes of the trays, offering advantages such as easy management and low production costs, and it has been widely adopted in the southwestern regions of China. A clamp-type elastic seedling picking gripper specifically for floating-tray seedlings was designed. Based on ejection and compression tests of the seedling pots, the mechanical properties of Guofu910 pepper seedling pots were determined. Using ADAMS rigid-flexible coupling simulation experiments, the trajectory of the gripper tip entering the pot was established, validating the rationality of the seedling extraction gripper. A mechanical model of the seedling extraction process was developed, providing a comprehensive analysis of the key factors affecting the success rate of seedling extraction. An orthogonal experiment was conducted by using a single seedling extraction gripper for pepper seedlings, with factors included pot moisture content, gripper width, and extraction depth, to determine the optimal combination of levels for seedling extraction. The results showed that at an extraction depth of 40 mm, gripper width of 5 mm, and substrate moisture content of 55%~65%, the seedling extraction success rate reached 99%, with a substrate loss rate of 3.18%. In adaptability tests across different crops, the extraction success rates for Chama cabbage and tobacco seedlings K326 were no less than 98%, while the success rate for Yunyan 87 tobacco seedlings was 94%, demonstrating good adaptability. This seeding picking gripper demonstrates universally excellent performance, offering raluable reference for row-wise seeding picking in vegetable transplanting machines.

Key words: floating tray; seedling picking end-effector; transplanting machine; design

收稿日期：2024-07-30 修回日期：2024-09-15

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)和山东省重点研发计划项目(2023CXGC010715)

作者简介：别琼(1999—)，男，硕士生，主要从事农业机械装备及关键技术研究，E-mail: 769575556@qq.com

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

0　引言

漂浮盘育苗是将泡沫盘置于含营养液的育苗池中培育幼苗，该育苗技术有利于集中育苗、提高单位面积育苗效率、省工省时，现已成为贵州、湖南、重庆等省市辣椒烟草等作物育苗的主要方式[1-5]。目前，漂浮盘育苗移栽主要靠手工作业，其机械化程度低、劳动强度高、种植成本高等问题制约我国种植业发展[6-7]。

取苗爪是全自动取投苗装置的核心机构，其性能直接决定了移栽质量，针对不同作物取苗效率要求和穴盘规格，取苗方式和取苗爪结构不尽相同[8-9]。韩绿化等[10-11]设计了两指四针钳夹式夹钵取苗爪，在多种穴盘苗取苗试验中平均取苗成功率达90.70%。周海丽等[12]设计了一种柔性爪片插入式成排移植手，在最佳参数组合下，成功率为97.9%。胡建平等[13]开展顶夹拔组合式取苗试验，确定了最优工作参数，此时取苗成功率94.12%。韩长杰等[14]采用夹茎式取苗方式设计了辣椒自动取投苗系统，平均取投苗成功率达97.07%。JORG等[15]针对茴香、韭葱等设计了2种取苗夹持器，在取苗试验中两指夹持器平均成功率95%，而针式夹持器仅为81.75%。ISLAM等[16]对取苗部件展开优化设计，通过运动学分析、虚拟样机仿真及原型测试，确定了合适装置尺寸，且仿真测试与验证测试之间无显著差异。PARADKAR等[17]设计了三自由度机械臂用于钵体拾取、放置，移栽效率为20株/min，能够有效移动苗钵且不造成损坏。

常见的黑色塑料盘有72、105、128穴等，其穴孔尺寸较大，锥度小，底部漏水孔较大，针对此类穴盘取苗方式研究较多。而常见的漂浮盘有136、160、162、200穴等，穴孔数量多尺寸小且深，穴孔锥度大，底部漏水孔小，不适用于顶出夹取式方案且取苗难度较大，现阶段研究较少。本文基于漂浮穴盘苗移栽作业需求，依据穴盘尺寸和取苗动作要求，设计一种用于整排夹钵式取投苗装置的取苗爪，通过轨迹仿真、力学分析、正交试验、适应性试验确定取苗爪取苗时的最佳组合，以期为驱动气缸选型及整排取投苗装置设计提供支撑。

1　取投苗装置总体结构与取苗爪结构设计

选用的漂浮盘为16×10孔泡沫穴盘，如图1所示，穴盘总长565 mm，宽355 mm，高60 mm，穴格上口尺寸为30 mm×30 mm，下底尺寸为8.5 mm×8.5 mm，深度L为55 mm，穴孔锥度22°，穴格间距35 mm，漏水孔直径为(5±0.5) mm，单穴容积22.5 mL。

1.1　取投苗装置结构

针对该种穴盘，设计了取投苗装置，如图2所示，主要由工字滑台、搭板、升降气缸组合、防撞组合、滑轨安装L板、分苗滑轨、取苗爪、分苗气缸组合等组成。取投苗装置采用整排夹钵式取苗，取苗爪共有16个，但由于穴格间距较小，受限于分苗滑块尺寸，故交错分布在两条滑轨上，相邻的取苗爪之间以分苗限位板连接，取苗时取苗爪间距与漂浮盘穴孔间距一致，投苗时取苗爪间距与导苗筒间距一致。



图1　漂浮盘示意图

Fig. 1　Floating tray

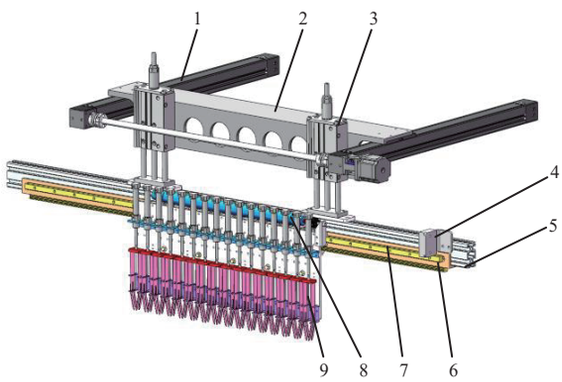


图2　取投苗装置总装

Fig. 2　Assemble of seeding picking and throwing device

1. 工字滑台　2. 搭板　3. 升降气缸组合　4. 防撞组合　5. 型材安装板　6. 滑轨安装L板　7. 分苗滑轨　8. 分苗气缸组合　9. 取苗爪

1.2　取苗爪结构设计

取苗爪是取投苗装置核心部件，为实现整排小空间取苗同时减小取苗爪对穴盘苗的损伤，根据穴格尺寸，设计了一种2片4爪式弹性取苗爪。图3为取苗爪结构示意图，主要有扎苗气缸、气缸安装座、整体安装板、苗爪安装座、苗爪片、苗爪限位座等。取苗前，预弯苗片由于限位板限制被掰直，两爪尖间距为限位板槽距离；取苗时，预弯苗爪片逐渐脱离限位板束缚而恢复弯曲状态，实现对基质包裹性扎取，扎取过程中两爪尖间距随着扎深逐渐缩短实现夹紧动作。

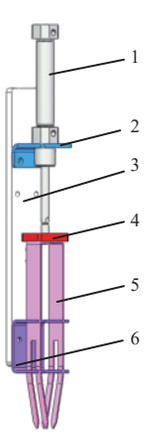


图3　取苗爪结构示意图

Fig. 3　Structure of seeding-picking end-effector

1. 扎苗气缸　2. 气缸安装座　3. 整体安装座　4. 苗爪安装座　5. 苗爪片　6. 苗爪限位座

如图4所示，取苗爪取苗流程分为4个阶段，两条虚线分别为取苗高度和投苗高度。初始时，取苗爪处于取苗高度，扎苗气缸处于收缩状态，预弯苗爪片收缩掰直；取苗工作开始后，取苗爪平移至取苗行，限位板和苗爪片将叶片外推(图4a)；扎苗气缸伸出，推动苗爪片向下扎入苗钵，苗爪预弯部分逐渐脱离限位的束缚而恢复弯曲状态从而夹紧苗钵(图4b)；升降气缸收缩，将钵苗取出提升至投苗高度(图4c)；扎苗气缸收缩，苗爪从基质中抽出，完成投苗动作(图4)；进入下一个取苗循环(图4e)。在整个取苗过程中动作(图4b、4c)直接决定取苗成功率，是取苗流程中的关键动作。

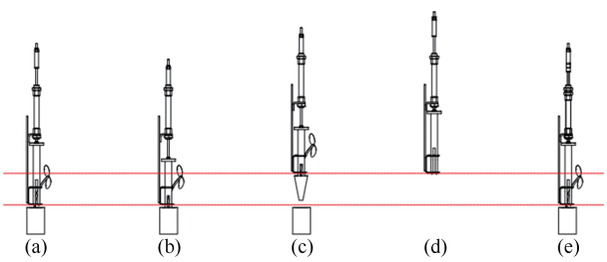


图4 取投苗动作流程图

Fig. 4 Diagrams of end-effectors picking action

2 漂浮穴盘苗物理特性及力学特性

选择夹钵式取苗方式，对钵苗进行扎取、提升、投苗动作[18-20]，为了能够成功取出苗钵，降低损伤率，提高移栽成活率，对移栽对象进行物理特性及力学特性分析。

2.1 钵苗物理特性

穴盘钵苗选用漂浮盘广泛培育对象辣椒，委托北京特菜大观园采用160穴漂浮盘培育国福910辣椒苗，基质由草炭、蛭石、珍珠岩组成，体积比为2∶1∶1，60 d辣椒穴盘苗结构尺寸如图5所示，结构尺寸结果如表1所示。

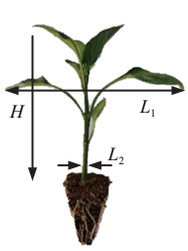


图5 辣椒苗结构尺寸

Fig. 5 Structure and size of pepper seeding

表1 辣椒苗结构尺寸

Tab. 1 Structural dimensions of pepper seedling mm

参数	数值
苗高H	154~185
叶展L_1	110~159
茎粗L_2	3.1~4.0

2.2 钵苗力学特性

基质含水率对苗钵与苗盘之间的粘附力以及苗钵抗压特性有重要影响[21]，试验前控制溉灌来保证含水率，45%~55%为低含水率，55%~65%为中含水率，65%~75%为高含水率。以苗龄60 d的辣椒苗为研究对象，利用TA.XT PlusC质构仪进行相关力学特性试验，为取苗爪设计提供参数依据。其中试验用苗盘经过扩孔至8 mm处理，以避免质构仪顶杆与苗盘产生干涉。

2.2.1 钵体顶出试验

夹取式、顶出式、夹茎秆式等取出苗钵时均需克服苗钵与苗盘之间的粘附力和苗钵重力的合力f_g。由于辣椒苗在穴格内呈中心随机偏移生长，故采用顶出试验确定f_g。试验前先分割苗盘并沿着钵体表面剪去茎叶，以便固定在质构仪的载物台上，如图6所示。不同含水率随机选取10株长势良好的钵苗，采用直径7 mm顶杆，设置质构仪行程为35 mm进行顶出试验。为了保障整排同时取苗动作的顺利进行，在单株顶出试验结果中选取相应含水率中脱盘顶力峰值最大的曲线数据，为升降气缸选型提供数据支撑。由于试验采用顶杆向下顶出，脱盘顶力需加上苗钵重量进行修正，得到顶出位移与脱盘顶力曲线如图7所示。



图6 顶苗试验

Fig. 6 Seedling ejection test

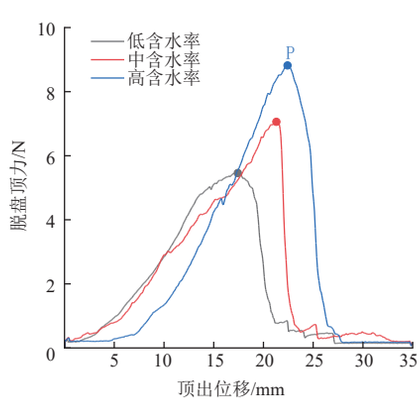


图7 脱盘顶力与顶出位移关系曲线

Fig. 7 Force-displacement curves for tray ejection

从图7可以看出，不同含水率的脱盘顶力与顶出位移曲线的变化趋势基本相似，克服最大脱盘力前，所需的力随着行程的增加而变大，达到最大脱盘顶力后，所需的力陡降，直至苗钵脱落。在漂浮盘中，辣椒苗与漂浮盘的粘附力随着含水率增加而变大，在高含水率时(65%~75%)测得辣椒苗最大脱盘顶力，即最大f_g为

8.81 N，为升降气缸提升整排取苗爪时需克服的总脱盘力提供参数计算。

2.2.2　钵体压缩试验

压缩试验采用平板压缩方式，将苗钵放置22°载物台上，保证苗钵上表面与方形平底探头平行，在压缩速度1 mm/s、压缩行程12 mm的条件下进行试验。如图8所示，对辣椒苗钵的中部进行压缩试验[22-23]。试验结束后对数据进行三次多项式曲线拟合得到

$$F_1=\begin{cases}0.019\,82x^3-0.076\,45x^2+1.732\,93x\\\quad(\text{低含水率})\\0.030\,21x^3-0.136\,49x^2+2.605\,75x\\\quad(\text{中含水率})\\0.040\,19x^3-0.315\,79x^2+2.213\,27x\\\quad(\text{高含水率})\end{cases}\tag{1}$$

由式(1)可得，拟合相关系数分别为0.999 92、0.998 68、0.998 43，均能较好地反映在压缩范围区间内苗钵抗压力F_1与变形量x之间的关系。

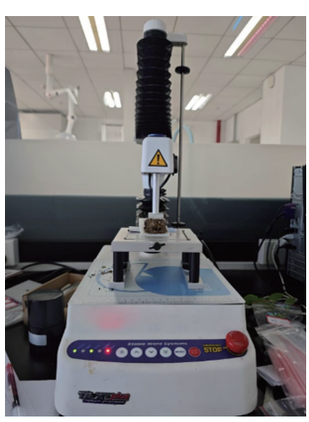


图8　压缩试验

Fig. 8　Compression test

从图9可以看出，苗钵抗压力与变形量呈非线性关系，增长呈先慢后快的趋势，与生物压实特性基本吻合。压缩开始时增长较慢主要是基质混合物结构松散等造成，随着变形量增加，基质逐渐压实硬化导致增长速度加快。中含水率时苗钵抗压性能较强。同时3条曲线在变形量8 mm后，增长速率有明显变化阶段，此时为基质急剧压实状态，试验中发现在这个阶段钵体底部有基质破碎掉落现象。

3　取苗爪入钵轨迹仿真

由于本文漂浮盘上下端横截面积相差大且穴孔较深，取苗作业时，如果苗爪片预弯角α较小，则容易泡沫盘发生干涉，预弯角较大则会将苗钵底部切断，故选择苗爪片预弯角等于穴盘倾角1/2，为11°。取苗作业时，苗爪片循环弯曲变直，选择65Mn钢保证苗爪弹性和韧性。取苗爪到达取苗高度时，爪尖与苗盘表面距离5 mm。根据文献[24-25]可知在夹钵取苗过程中，取苗爪通常夹持钵体的中下部的位置，考虑到漂浮盘辣椒苗根系垂直根系平行于穴格内壁生长，底部空间狭小根系交织不明显，容易造成底部基质损失，故设置扎深在30~40 mm之间。为防止两个苗爪片尖端在扎钵体的过程中与穴盘孔壁发生干涉，需要爪尖间距始终不大于相应深度的穴孔长度。对于同一个取苗爪，可以通过苗爪片预弯部分长度和气缸行程来控制扎深，若最大扎深为40 mm，苗爪片入钵过程中与穴孔壁无干涉，可知扎深小于最大扎深的苗爪片同样满足该结论。

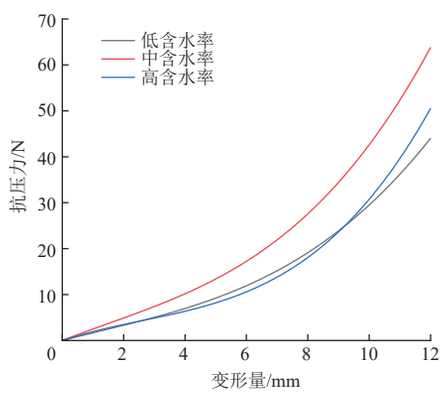


图9　辣椒苗钵抗压力与变形曲线

Fig. 9　Pressure-resistance and deformation curve of pepper seedlings

取苗爪取投苗过程也是预弯苗爪片弹性变形到恢复的过程。利用ADAMS对取苗爪预弯苗爪片展开刚柔仿真分析。在Solidworks中建立取苗爪模型，将除苗爪片、气缸杆外所有实体组合成一个实体，输出x_t格式文件导入ADAMS中，如图10所示，设置各实体材料属性、添加连接副，利用软件自带功能实现苗爪片的柔性化，给气缸杆添加驱动，移动距离为45 mm，设置苗爪片与限位板接触为柔性体对刚体，设置相关参数如表2所示。准备完毕后，对取苗爪模型进行仿真，选择测量两爪尖距离，得到两苗爪片尖端间距随扎深位移曲线。

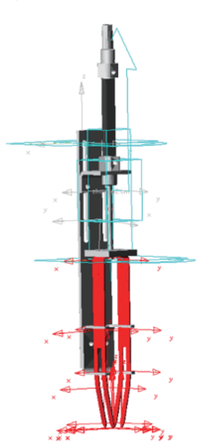


图10　ADAMS刚柔耦合仿真模型

Fig. 10　Rigid-flexible coupling simulation model

对两爪尖间距曲线进行处理，如图11所示。红色为穴格边界；黑色为爪尖运动轨迹；蓝线为扎深40 mm时苗爪尖位移，同时为苗爪预弯部分完全扎入钵体所在位

表 2 仿真参数设置

Tab.2 Simulation parameter settings

参数	数值
苗爪片密度/(kg·m^{-3})	7 810
弹性模量/Pa	2.10×10^{11}
泊松比	0.282
刚度/(N·m^{-1})	1.0×10^{5}
力指数	1.3
阻尼系数/(N·s·m^{-1})	1 000
穿透系数	0.1

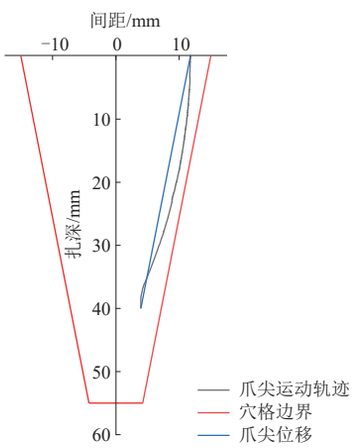


图 11 苗爪尖轨迹仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of claw point trajectory in process of picking seedlings

置线。在取苗过程中黑线与红线两者无交叉，表明当扎深为 40 mm 时，苗爪片在扎钵过程中与穴盘无干涉，其中苗爪尖离穴孔壁最近距离约为 1.5 mm。黑线与蓝线之间的区域为单个苗爪片夹紧压缩区域，两线间最大距离为 1.8 mm，则双苗爪间最大压缩位移为 3.6 mm，小于破损位移 8 mm，符合设计要求。

3.3 取苗爪取苗受力分析

取苗作业时，苗爪片通过插入基质的预弯部分将苗钵夹紧取出，这个过程中，苗爪直接对苗钵进行夹紧接触，两者间的受力情况直接影响着取苗质量。图 12 为苗爪片完全扎入钵体时苗钵的受力分析，苗爪片对苗钵摩擦力分别为f_1、f_2，对苗钵内部产生法向的挤压力分别为F_{N1}、F_{N2}。对苗钵受力分析可得，成功取苗时，各作用力需要满足

$$\begin{cases}(F_{N1}+F_{N2})\sin\beta+(f_1+f_2)\cos\beta\geqslant f_g\\ f_1\sin\beta+F_{N2}\cos\beta=f_2\sin\beta+F_{N1}\cos\beta\\ f_1=\mu F_{N1}\\ f_2=\mu F_{N2}\end{cases}\tag{2}$$

式中 μ——苗钵基质与取苗片间摩擦因数

β——苗爪片夹持角度

忽略基质和苗根分布不均匀的影响，可得到苗钵在两侧受力对称；苗爪片扎入夹持苗钵时，角度变化较小，即作用力满足

$$\begin{cases}F_{N1}=F_{N2}\\ f_1=f_2\\ \alpha=\beta\end{cases}\tag{3}$$

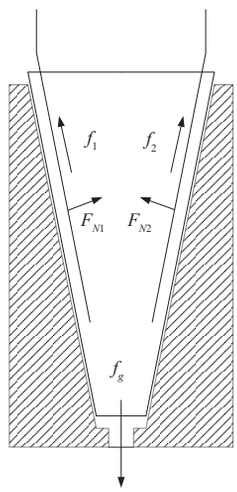


图 12 苗钵受力分析

Fig. 12 Force analysis of seedling pots

则成功取苗需要满足

$$2F_{N1}(\sin\alpha+\mu\cos\alpha)\geqslant f_g\tag{4}$$

钵体夹取受力分析可知，苗爪片取苗时对苗钵挤压力F_{N1}为

$$F_{N1}=\sigma S_1\tag{5}$$

式中 σ——苗钵抗压强度

S_1——苗爪片夹取苗钵时最大有效面积

结合图 10 和钵体压缩试验研究，不同含水率下苗钵的抗压强度不同，抗压强度计算公式为

$$\sigma=\frac{F_1}{S}\tag{6}$$

式中 S——钵体压缩试验中探杆的有效面积

结合式(4)~(6)得

$$\frac{2F_1S_1}{S}(\sin\alpha+\mu\cos\alpha)\geqslant f_g\tag{7}$$

由式(7)可知，摩擦因数μ和钵体抗压力F_1、夹取有效面积S_1是取苗爪成功取苗的关键技术参数。在苗爪材质和基质配比确定的情况下，摩擦因数μ与含水率有关；通过钵体压缩试验可知，F_1与钵体含水率有关；夹取有效面积S_1与爪片扎入钵体的深度和爪片宽度有关。综上分析，影响取苗成功率的因素为钵体含水率、爪片宽度、取苗深度。

3.4 气缸选型

取苗过程中，扎苗气缸运动受到的阻力有苗爪片挠度变形与限位板间的摩擦力和入钵阻力。根据前期试验和穴格尺寸，确定最大取苗扎深为 40 mm，最大爪片宽度为 5 mm，进行该种爪片设计。将 ZMF-500 型数显推拉力计的螺纹头与苗爪安装座相连接，用手握持推拉力计进行推出苗爪扎苗和拉回苗爪投苗动作，即模拟扎苗气缸动作，设置仪器峰值模式，重复试验 10 次，测得最大阻力为 25.7 N。选用亚德客 MIJ12 型气缸，当气压

0.7 MPa时，输出推力79.1 N和拉力59.4 N。

升降气缸除需要克服整排16株苗钵同时取出的脱盘力，还需要考虑整排取苗爪、型材等重量，对于升降气缸推力F_2有

$$2F_2 \geqslant 16f_g + F_3 \tag{8}$$

式中　F_3——升降负载

经过测量，升降负载F_3为156.8 N，则单个升降气缸F_2≥148.9 N，选择TCL25型气缸，当气压为0.7 MPa时，输出拉力为264.4 N。

4　单个取苗爪正交试验

取苗爪是取苗装置的关键部件，对单个取苗爪进行取苗试验选择较优的因素组合，可为整排苗爪取苗提供数据支持，减小试错成本。通过分析式(7)，选择苗钵含水率A、爪片宽度B、取苗深度C为试验因素，以取苗成功率为评价指标，选取$L_9(3^4)$正交试验表进行正交试验。正交试验因素编码如表3所示，试验结果如表3、4所示，表中A、B、C为因素编码值。

表3　正交试验因素编码

Tab. 3　Factors and levels of orthogonal test

编码	因素		
	含水率/%	爪片宽度/mm	取苗深度/mm
−1	45~55	3	30
0	55~65	4	35
1	65~75	5	40

表4　正交试验方案与结果

Tab. 4　Experiment scheme and results of orthogonal test

试验序号	因素			取苗成功率/%
	A	B	C	
1	−1	−1	−1	60.0
2	−1	0	0	92.5
3	−1	1	1	100
4	0	−1	0	90.0
5	0	0	1	100
6	0	1	−1	72.5
7	1	−1	1	97.5
8	1	0	−1	67.5
9	1	1	0	100

取苗成功率Y计算式为

$$Y = \frac{N - N_1 - N_2}{N} \times 100\% \tag{9}$$

式中　N——取苗总个数

N_1——未取出钵苗个数

N_2——基质损失率大于15%的个数

基质损失率W计算式为

$$W = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \times 100\% \tag{10}$$

式中　W_1——未取出以及破损基质质量

W_2——取出钵苗基质质量

取苗成功率越大，取苗效果越好，极差和方差分析结果如表5、6所示，取苗效果如图13所示。

表5　极差分析

Tab. 5　Range analysis

编码	因素		
	A	B	C
−1	84.17	82.50	66.67
0	85.50	86.67	94.17
1	88.33	90.83	99.17
极差R	4.16	8.33	32.50
最优水平	A_1	B_1	C_1
因素主次	$C>B>A$		

表6　方差分析

Tab. 6　Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F
A	29.17	2	14.59	6.98
B	104.17	2	52.09	24.92
C	1 837.50	2	918.75	439.59
误差	4.17	2	2.09	



图13　辣椒取苗效果

Fig.13　Seedling picking performance for peppers

由表6可知，因素取苗深度F为439.59大于$F_{0.95}(2,2)=19$，爪片宽度F为24.92大于$F_{0.9}(2,2)=9$，因此取苗深度和爪片宽度分别在显著水平0.05和0.10显著，在表5中应选择其最优的水平B_1C_1。因素含水率A对试验结果不显著，但是在实际移栽作业的过程中，钵体含水率控制在中高水平比较容易，也能保证移栽成活率。综合考虑到不同含水率钵体力学特性，最终选择$A_0B_1C_1$组合，由于正交试验中无该组合，进行100次重复验证试验，得到取苗成功率为99%，基质损失率为3.18%。

为进一步验证取苗爪的取苗效果，在北京、贵州等地采用甘蓝茶玛、烟草等钵苗对该取苗爪进行适应性试验，钵苗参数如表7所示，取苗结果如表8所示，取苗效果如图14所示。

表7　钵苗参数

Tab. 7　Structure dimensions of seeding plants

参数	甘蓝茶玛	烟苗K326	云烟87
苗高H/mm	106~144	94~179	91~115
叶展L_1/mm	124~187	106~179	103~131
茎粗L_2/mm	—	4.2~5.7	3.5~4.5
最大脱盘力/N	3.3	5.7	4.7

表8 取苗结果

ab. 8 Seedling picking results %

品种	成功率		失败率	
	取苗成功率	基质损失率	未取出率	粘连掉苗率
甘蓝茶玛	100	—	—	—
烟苗K326	98	3.20	2	—
云烟87	94	8.47	2	4



图14 甘蓝、烟草取苗效果

Fig. 14 Seedling picking performance for cabbage and tobacco

由表8可知，云烟87取苗成功率较低，取苗效果较差，主要由于云烟87钵苗弱小，钵苗盘根效果差，基质较为松散，取苗时钵体底部尖端容易断裂；烟叶表面附有绒毛且分泌有粘性物质增加了植株间的粘附干扰，导致取苗成功率较低。对于甘蓝茶玛、烟苗K326，该取苗爪取苗成功率均能保证在98%以上。

5 结论

(1)针对漂浮盘小穴格取苗作业要求，设计了一种夹钵式弹性取苗爪，结合ADAMS刚柔耦合仿真，验证了取苗爪入钵轨迹的可行性。

(2)对国福910辣椒苗钵进行力学特性分析，建立取苗力学模型，分析了取苗爪取苗的关键因素。建立了以含水率、爪片宽度、取苗深度为试验因素，取苗成功率为评价指标的正交试验，得到了取苗最佳组合为取苗深度40 mm，爪片宽度5 mm，基质含水率55%~65%，此时取苗爪取苗成功率为99%，基质平均损失率为3.18%。

(3)不同作物适应性取苗试验结果表明，甘蓝茶玛取苗成功率100%；烟苗K326取苗成功率98%，基质损失率3.20%；云烟87取苗成功率94%，基质损失率8.47%，适应性效果较好。

参 考 文 献

[1] 张兰芳.辣椒漂浮育苗的优点及应用前景[J].长江蔬菜，2017(2)：17－19.

[2] 张锦阁，范高领，胡明文.辣椒漂浮育苗影响因素研究进展[J].中国瓜菜，2018，31(4)：5－9.

[3] 何梅.中高海拔地区辣椒漂浮育苗技术[J].长江蔬菜，2024(12)：18－20.

[4] 旷子扬，郑宏斌，文伟康，等.漂浮育苗盘孔数和控水促根育苗措施对烟苗生长发育的影响[J].江苏农业科学，2024，52(9)：94－99.
KUANG Ziyang, ZHENG Hongbin, WEN Weikang, et al. Influences of floating seedling tray pore numbers and water control on growth of tobacco seedlings[J].Jiangsu Agricultural Sciences，2024，52(9)：94－99. (in Chinese)

[5] 李旭，伍硕祥，匡敏球，等.蔬菜泡沫育苗盘多适应性自动叠盘装置设计与试验[J].农业机械学报，2024，55(3)：122－132.
LI Xu, WU Shuoxiang, KUANG Minqiu, et al. Design and test of automatic tray stacking device for vegetable foam seedling trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(3)：122－132. (in Chinese)

[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] 喻丽华，徐志波，韩忠禄，等.丘陵山区辣椒机械化移栽适应性分析[J].农机化研究，2020，42(10)：184－188，194.
YU Lihua, XU Zhibo, HAN Zhonglu, et al. Adaptability analysis of mechanized transplanting of pepper in hilly mountainous area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(10)：184－188，194. (in Chinese)

[8] 文永双，张俊雄，袁挺，等.蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J].中国农业大学学报，2021，26(4)：128－142.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, YUAN Ting, et al. Current situation and analysis of automatic pick-up technology for vegetable plug seedlings[J]. Journal of China Agricultural University，2021，26(4)：128－142. (in Chinese)

[9] HABINEZA E, ALI M, REZA M N, et al. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms: a review[J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2023, 50(1): 113－129.

[10] 韩绿化，毛罕平，严蕾，等.穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J].农业机械学报，2015，46(7)：23－30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(7)：23－30. (in Chinese)

[11] 韩绿化，毛罕平，胡建平，等.温室穴盘苗自动移栽机设计与试验[J].农业机械学报，2016，47(11)：59－67.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and test of automatic transplanter for greenhouse plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(11)：59-－67. (in Chinese)

[12] 周海丽，刘珂，童俊华，等.温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J].农业机械学报，2023，54(5)：82－90.
ZHOU Haili, LIU Ke, TONG Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：82－90. (in Chinese)

[13] 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(Supp.1)：110－117，184. (in Chinese)

(下转第269页)

Smart Agriculture, 2023, 5(4): 92 - 104.(in Chinese)
[10] 杨长辉,王卓,熊龙烨,等.基于Mask R-CNN的复杂背景下柑橘树枝干识别与重建[J].农业机械学报, 2019, 50(8): 22 - 30.
YANG Changhui, WANG Zhuo, XIONG Longye, et al. Citrus branch stem recognition and reconstruction in complex background based on Mask R-CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 22 - 30.(in Chinese)
[11] LIU S, HUANG Z, XU Z, et al. High-throughput measurement method for rice seedling based on improved UNet model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108770.
[12] JIN X, CHEN S, ZHAO L, et al. Low-damage fetching method for pepper seedlings based on Res-UNet[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108919.
[13] ZHANG X, MU W. GMamba: state space model with convolution for grape leaf disease segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109290.
[14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI, 2015.
[15] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv Preprint arXiv: 1409.1556, 2014.
[16] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]. //Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2017.
[17] VERAMENDI W N C, CRUVINEL P E. Method for maize plants counting and crop evaluation based on multispectral images analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108470.
[18] CHEN L, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]// European Conference on Computer Vision - ECCV, 2018.
[19] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
[20] NIKNEJAD N, BIDESE-PUHL R, BAO Y, et al. Phenotyping of architecture traits of loblolly pine trees using stereo machine vision and deep learning: stem diameter, branch angle, and branch diameter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107999.
[21] TONG S, ZHANG J, LI W, et al. An image-based system for locating pruning points in apple trees using instance segmentation and RGB-D images[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 277 - 286.

(上接第236页)

[14] 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)
[15] JORG O J, SPORTELLI M, FONTANELLI M, et al. Design, development and testing of feeding grippers for vegetable plug transplanters [J]. AgriEngineering, 2021, 3(3): 669 - 680.
[16] 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.
[17] PARADKAR V, RAHEMAN H, RAHUL K. Development of a metering mechanism with serial robotic arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 5: 52 - 63.
[18] 张学东,崔巍,刘云强,等.穴盘苗移栽自动取投苗技术研究现状与展望[J].中国农机化学报,2023,44(12):17 - 24.
ZHANG Xuedong, CUI Wei, LIU Yunqiang, et al. Research status and prospect of automatic seedling picking and dropping technology of plug seedling transplanting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(12):17 - 24. (in Chinese)
[19] 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)
[20] 童俊华,刘珂,刘霓红,等.植物工厂岩棉块种苗移植机移植部件设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):106 - 114.
TONG Junhua, LIU Ke, LIU Nihong, et al. Design and test of rock wool block seedling transplantation mechanism in plant factory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):106 - 114. (in Chinese)
[21] 宋琦,喻俊志,王卫兵,等.番茄穴盘苗钵体的力学特性分析与优化[J].济南大学学报(自然科学版),2019,33(6):529 - 536.
SONG Qi, YU Junzhi, WANG Weibing, et al. Analysis and optimization of mechanical properties of tomato seedling pot[J].Journal of Jinan University (Natural Science Edition),2019,33(6):529 - 536. (in Chinese)
[22] 刘姣娣,曹卫彬,田东洋,等.基于苗钵力学特性的自动移栽机执行机构参数优化试验[J].农业工程学报,2016,32(16):32 - 39.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Optimization experiment of transplanting actuator parameters based on mechanical property of seedling pot[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(16):32 - 39. (in Chinese)
[23] 张妮,张国忠,付建伟,等.顶钵-夹茎组合式取苗装置设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(3):50 - 61.
ZHANG Ni, ZHANG Guozhong, FU Jianwei, et al. Design and experiment of the seedling pick-up device with ejecting pot-clamping stem combination[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(3):50 - 61. (in Chinese)
[24] 李树峰,连国党,马晓晓,等.移栽机整排取送苗控制系统的设计与试验[J].中国农机化学报,2019,40(12):136 - 143.
LI Shufeng, LIAN Guodang, MA Xiaoxiao, et al. Design and experiment of whole row of taking and sending seedlings control system for transplanting machine [J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(12):136 - 143. (in Chinese)
[25] 田素博,谢天,王鹤锦,等.蔬菜移栽机可调式喂苗装置设计与试验[J].华南农业大学学报,2023,44(3):464 - 472.
TIAN Subo, XIE Tian, WANG Hejin, et al. Design and experiment of adjustable seedling-feeding device for vegetable transplanting machine[J]. Journal of South China Agricultural University,2023,44(3):464 - 472. (in Chinese)