

穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器*

韩绿化 毛罕平 严 蕾 胡建平 黄文岳 董立立

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 设计了一种穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式夹钵取苗末端执行器。利用2根气缸机械手指伸出4根夹取针插入苗钵,气缸机械手指闭合夹取针捏紧苗钵来取苗,利用两根气缸机械手指撑开放松夹持苗钵,4根夹取针回缩脱离苗钵来放苗。根据穴盘苗自动取苗力学要求,进行了基于穴盘苗物理力学特性的夹取力设计。试制末端执行器,进行夹钵取苗效能测试。在40 mm/s提取速度下,各试验因素的夹钵脱盘力无显著性差异。取苗效能的正交试验分析发现,苗钵含水率水平高度显著影响根土破坏,入钵角度、深度以及根系等试验因素没有统计学显著性影响。当夹取针入钵角为11°,入钵深度为32 mm,苗数为4株,含水率为55%~60%时,所设计的取苗末端执行器对苗钵的夹取作用达到最小根土破坏程度。

关键词: 穴盘育苗 移栽机 末端执行器 钳夹式

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0023-08

Pincette-type End-effector Using Two Fingers
and Four Pins for Picking Up Seedlings

Han Lihua Mao Hanping Yan Lei Hu Jianping Huang Wenyue Dong Lili

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings was designed. When the end-effector extracts seedlings from the tray cells, its two cylinder fingers push out the four pick-up pins to penetrate into the root soil deeply, and then the pick-up pins are closed to hold the soil of the seedlings firmly for lifting. When the end-effector releases seedlings at the discharge point, its two cylinder fingers open and the pick-up pins loosen the soil of the seedlings and pull the pick-up pins back for discharging. Based on the physical and mechanical properties of plug seedlings as related to the automatic transplanting work, the mechanical design of end-effector was conducted according to the requirements of extracting seedlings. A prototype of the pincette-type end-effector was constructed and test-operated to examine whether or not its functional requirements were satisfied. As the extraction speed was 40 mm/s, there were no significant effects on the extraction force for picking up seedlings from the tray cells under various parameters. In the orthogonal experiments, it was found that the root soil moisture content exerted the greatest effect on the root damages in the pick-up process, and other factors such as penetration angle, penetration depth, and root system had no significant effects. As the penetration angle was 11°, the penetration depth was 32 mm, the number of seedlings in the cell was 4, and the root soil moisture content was 55%~60%, the minimum root soil damages in picking up seedlings from the tray cells using the designed pincette-type end-effector can be achieved.

Key words: Plug seedling Transplanter End-effector Pincette-type

收稿日期: 2014-10-08 修回日期: 2015-01-21

* 国家自然科学基金资助项目(51475216)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B03)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012381、BE2014373)、江苏省现代农业装备与技术协同创新中心资助项目(NZXT02201402)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2014)37号)和江苏大学高级专业人才科研启动基金资助项目(BJDG061)

作者简介: 韩绿化,助理研究员,博士,主要从事穴盘苗全自动移栽装备研究,E-mail: hlh_ujs@163.com

通讯作者: 毛罕平,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备和设施农业环境控制技术研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

引言

近年来,我国穴盘育苗全自动移栽技术的研究备受关注^[1]。实现穴盘苗全自动移栽的关键是幼苗夹取机构研发,目前已经开发出钳夹式和顶穴式等多种作业方式的取苗机构^[2-13]及末端执行器^[14-18]。这些研究作为我国应用穴盘苗自动移栽机做出了重要贡献。

总的来看,所设计的取苗机构在功能上都能满足对穴取苗要求,并且很多研究从机构学角度对取苗轨迹和机构结构参数进行了优化^[3, 5, 7-10],但实际取苗效果却不理想,取苗成功率不高,分别为84%^[8]、80%^[9],苗钵损伤较大,平均基质损失率为9.26%^[11]。初步分析取苗失败原因为育苗问题^[8-9, 11],比如苗根部太细,土壤水分偏多,枝叶纠缠等。事实上,对于穴盘苗自动移栽机设计而言,除了育苗农艺要配套移栽机具外,很大程度上要使机构设计适应育苗农艺特点^[19-20],特别是作业对象为有生命的柔性苗-根-基质复合体,且生长在有限的穴孔里,进行适应对象结构特性的高效夹取技术研究就显得尤为重要^[16]。

本文在前期研究工作的基础上,结合穴盘苗结构特点,提出一种钳夹式夹钵取苗方法,依据穴盘苗物理力学特性,进行夹取执行器结构参数设计,开展夹钵取苗试验研究,分析取苗效能的影响因素。

1 取苗末端执行器设计

经过多次尝试,发明了一种两指四针钳夹式取苗末端执行器^[21]。图 1a 是末端执行器的机械结构

图,该执行器是一个镊子型钳夹式取苗手爪,主要由气缸机械手指、橡胶气囊、限位槽、外围收紧弹簧和安装手柄等组成。其中,气缸机械手指可在限位槽内绕手柄支架上的转轴摆动,由双作用微型气缸、管接头、紧固在活塞杆上的夹取针和手指挡块组成,夹取针为叉子型,可在双作用微型气缸推拉下沿着手指挡块孔伸缩,从而构造成两指两侧各伸缩两针。两根气缸机械手指在弹簧收紧作用下并行夹住橡胶气囊,当橡胶气囊充气时,撑开两根气缸机械手指,当橡胶气囊放气时,借助于收紧弹簧作用力,两根气缸机械手指合拢闭合。该末端执行器取苗工作原理是通过两根气缸机械手指伸出 4 根夹取针插入穴盘苗钵体,气缸机械手指合拢夹取针夹紧钵体,在取苗装置带动下取出苗钵,通过橡胶气囊撑开两根气缸机械手指,4 根夹取针放松夹持钵体,2 根气缸手指回缩夹取针脱离穴盘苗钵体来放苗。

1.1 夹钵取苗方法

夹钵取苗具体操作可描述为:

- (1) 在一个取苗周期开始点,当末端执行器执行取苗时,橡胶气囊充气使两根气缸手指呈张开状态,同时夹取针回缩至气缸手指里(见图 1b)。
- (2) 末端执行器沿垂直穴盘方向进给接近穴盘苗钵体(见图 1c),到达取苗点位后,2 根气缸手指伸出夹取针,于是夹取针从钵苗两侧沿穴孔边缘内壁以最大深度插进根系包裹的基质体(见图 1d)。
- (3) 橡胶气囊放气,在外围收紧弹簧作用下,2 根气缸手指合拢闭合,于是夹取针以弹簧收紧力为作用力捏住穴盘苗钵体(见图 1e)。
- (4) 取苗装置带动末端执行器沿垂直穴盘方向

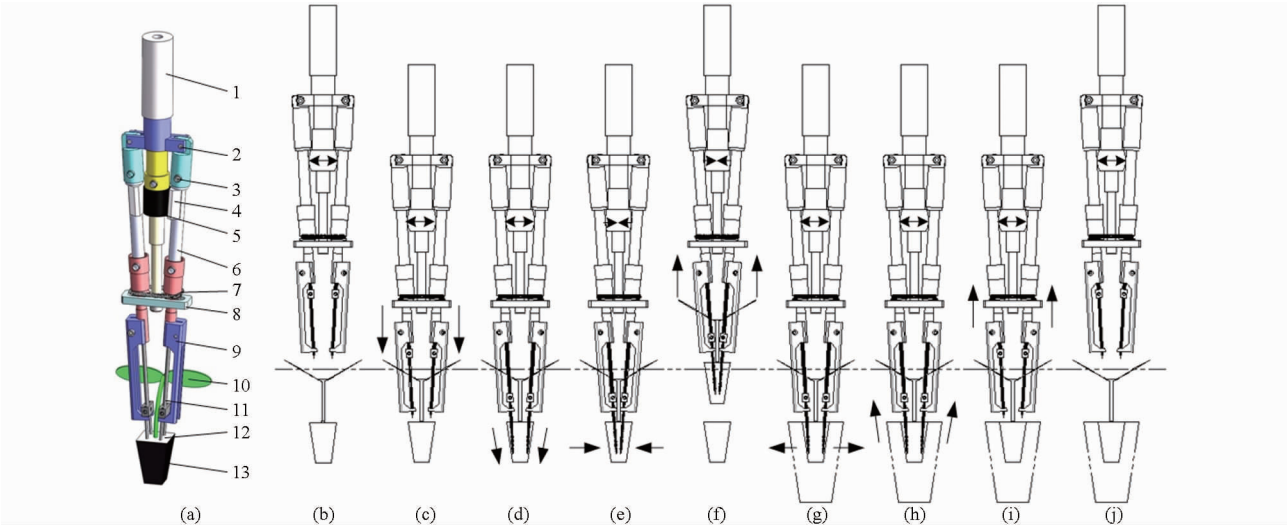


图 1 两指四针钳夹式取苗操作过程

Fig. 1 Operation of pincette-type end-effector for a seedling extraction

1. 安装手柄 2. 转轴 3. 管接头 4. 垫块 5. 橡胶气囊 6. 双作用微型气缸 7. 收紧弹簧 8. 限位槽 9. 挡块 10. 幼苗 11. 夹取针
12. 苗钵 13. 穴孔

13 mm × 13 mm, 穴深 42 mm; 72 孔穴盘规格尺寸为口径 40 mm × 40 mm, 底部 20 mm × 20 mm, 穴深 45 mm。为了保证最大的夹取角度, 同时兼顾 128 孔和 72 孔穴盘使用, 理论上设计入钵角为 7.34° ~ 9.75°, 夹取角为 24°, 于是夹取针与穴孔壁可以保持 2 ~ 3 mm 斜插间隙, 这样可以有 28 ~ 35 mm 的初始夹取开度, 最大能达到 40 mm 的插入深度。单侧夹取针为叉子型, 两针尖中心距为 12 mm, 形成镊子型四针夹持机构^[28]。已经测出黄瓜、番茄等穴盘苗的拉拔力范围为 0.97 ~ 2.93 N^[16,29], 钵体与夹取针钢板材料的静摩擦因数为 0.49 ~ 0.54^[16]。于是按式(2) ~ (5) 估算出达到克服最大拉拔力需要的弹簧收紧力 F'_{s1} 为 2.45 N。考虑工程安全因数, 主要是夹取针非理想状态闭合, 会因苗钵抗夹而产生夹持弹性变形, 达不到理论设计的闭合夹取角度, 这里需适当放大弹簧预紧力以稳固夹紧苗钵取苗。在实际应用中, 可以用弹簧秤测力确保夹取针对苗钵夹持后有足够的收紧力, 并使收紧弹簧的开合变形量在弹性范围内。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料和条件

以可移栽的番茄穴盘苗为对象, 开展夹钵取苗多因素正交试验。育苗基质为江苏淮安中诺农业科技发展有限公司生产的精装通用型有机基质营养土, 主要成分为优质泥炭、珍珠岩、蛭石、腐熟植物秸秆、蘑菇下脚料、酒渣等, 其物化特性: 容重为 0.24 g/cm³, 总孔隙度为 77.01%, 气水比为 1/3, 实测 pH 值为 6.37, 电导率为 1.34 mS/cm。育苗穴盘为 PS 硬质注塑盘, 128 穴孔, 孔形状如倒金字塔, 穴孔尺寸为 32 mm × 13 mm × 42 mm, 穴孔锥形角为 25.5°。试验时苗龄 32 d, 两叶一心, 测试前对穴盘苗进行炼苗处理。

试制取苗末端执行器。夹取针伸缩采用台湾亚德客公司生产的双作用微型气缸, 型号为 MA-16 × 40-S-CA, 有效行程为 40 mm, 能满足最大插入深度要求。其工作速度范围为 30 ~ 800 m/s, 工作压力范围为 0.1 ~ 1.0 MPa, 配置 CS1-M 感应开关, 用于监测活塞杆位置信息。气缸手指开合采用日本小金井 RBP017RCA 型橡胶手指, 最高使用空气压力 0.5 MPa, 最大工作力为 30 N, 结构紧凑, 能满足手指开合力要求。运用电磁继电器控制电磁阀方式实现末端执行器动作控制, 采用两位五通电磁阀控制夹取针伸缩, 采用两位三通电磁阀控制气缸手指开合。对每个工作气缸的进气路采用溢流减压阀保持回路工作压力恒定可调, 以适应气缸不同工作压力

要求, 并在电磁换向阀排气口上安装排气消声节流阀, 通过调节节流阀开度实现气缸背压的排气控制, 完成气缸往复速度的调节。

将取苗末端执行器安装到 TA.XT Plus 物性仪上(英国 SMS 公司), 穴盘紧固在测试台上。试验时, 控制物性仪机械臂, 使取苗末端执行器到达待取幼苗的上方, 执行夹钵动作, 完成后启动物性仪机械臂, 使取苗末端执行器提取苗钵, 从而开展对穴夹钵取苗试验, 测试取苗过程力学特性, 考察不同试验因素下夹钵取苗效能。提苗速度为仪器最大限速 40 mm/s。

2.2 试验指标

夹钵取苗试验时, 观测取苗过程拔苗力学特性。以取苗过程中根土破坏率 S_{DR} (Soil damage ratio in picking up seedling) 考察末端执行器夹钵取苗效能, 其定义为

$$S_{DR} = \frac{W_{SD}}{W_{ES} + W_{SD}} \times 100\%$$
 (6)

式中 S_{DR} ——根土破坏率
 W_{SD} ——残留、破碎基质的质量, g
 W_{ES} ——取出苗钵的质量, g

2.3 试验方案设计

如图 3 所示, 夹取针插入钵体取苗, 因此入钵角(图 3 中 P_A)应低于穴孔锥形角 25.5°的一半, 以能深度入钵, 入钵深度(图 3 中 P_D)应以不刺破穴孔壁为宜, 最大入钵深度不超过 42 mm。夹取针插入钵体来取苗, 可以看出幼苗根系成主要受力部件, 这里通过设定不同数目的穴孔苗数来表示根系结构状况。对于幼苗移栽, 存在一个较优的含水率来匹配幼苗提取^[26], 研究中调查 4 种含水率水平下夹钵取苗效果, 分别为 45% ~ 50%、50% ~ 55%、55% ~ 60%、60% ~ 65%。综合以上分析, 对夹钵取苗试验因素水平编码, 如表 1 所示。采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 末列作误差列分析。共有 16 组试验, 采用随机样本法对每组试验取苗 50 株, 取其平均值作为每组试验

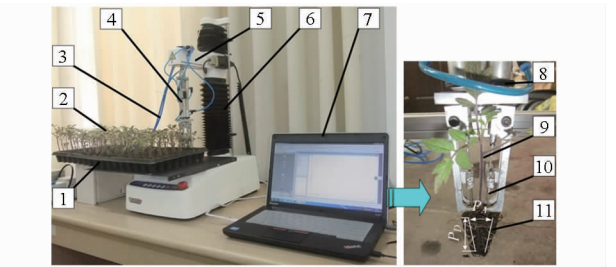


图 3 穴盘苗夹钵取苗测试装置

Fig. 3 Tests for picking up seedlings from the tray cells
1. 穴盘 2. 幼苗 3. 气压回路 4. 取苗末端执行器 5. 加载单元 6. 测试臂 7. 计算机 8. 收紧弹簧 9. 茎秆 10. 夹取针 11. 苗钵

的结果数据,入钵角、插入深度、苗数、苗钵含水率编码值以 $A、B、C、D$ 表示。

试验后采用 SPSS 18.0 软件对所获数据做统计方差分析,多重比较方法为 Duncan 新复极差法,设显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

表 1 试验因素水平表

Tab.1 Coding of testing factors and levels

水平	因素			
	入钵角/ (°)	插入深度/ mm	苗数/ 株	苗钵 含水率/%
1	8	32	1	45 ~ 50
2	9	34	2	50 ~ 55
3	10	36	3	55 ~ 60
4	11	38	4	60 ~ 65

注:苗数表示穴孔里的幼苗株数。

3 试验结果与分析

典型的穴盘苗钵体与穴盘孔穴脱盘试验力-位移曲线如图 4 所示。

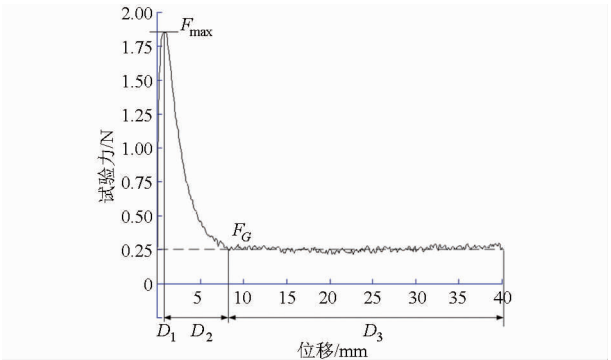


图 4 穴盘苗脱盘试验力-位移曲线

Fig. 4 Force - distance curve for extracting seedlings from tray cells

在图 4 中,穴盘苗钵体脱盘过程分 3 个阶段: D_1 段为穴盘苗拉拔过程,从开始拉拔到最大试验力 $F_{\max}$ 处,试验力与位移呈非线性变化,在此过程中,随着拉拔试验的进行,幼苗被拉伸展,同时幼苗根系牵拉钵体松弛,当达到最大试验力 $F_{\max}$ 时,穴盘苗钵体挣脱穴盘孔穴附着,若此时穴盘苗钵体保持整体性,则为成功取苗,定义最大试验力 $F_{\max}$ 为穴盘苗钵体拉拔试验脱盘力 F_L ; D_2 段为穴盘苗拉拔分离过程,在此过程中,穴盘苗钵体部分粘连根系摆脱穴孔纠缠,同时包括幼苗之间的碰撞,试验力将随着拉拔位移的增大逐渐减小趋于平衡; D_3 段为穴盘苗分离过程,在此过程中,穴盘苗钵体彻底脱离穴盘孔穴,试验力保持稳定数值 F_G ,这个试验力为幼苗和钵体重力的合力。

各种试验条件下所获夹钵取苗脱盘力如图 5 所示。图 5 中各种试验条件下穴盘苗脱盘力数据是在

$L_{16}(4^5)$ 正交表中对每组 50 个样本数据按单因素分析方法划分的,每个试验因素的不同水平结果对应 200 个测试结果数据。从图 5a、图 5b 可以看出,随着入钵角度和插入钵体深度的增大,脱盘力先增大后减小,可见以大角度大深度入钵夹取有利提取。当穴孔中幼苗株数增多时,表明钵体盘根性增强,这在一定程度上加大了与穴孔壁的吸附力,难以脱盘,表现在脱盘力为随幼苗株数增多而增大,如图 5c 所示。在一定情况下,润湿苗钵有助于降低根与穴孔的粘附作用,可提高取苗成功率^[24]。在试验中也发现了一致的规律,从图 5d 中可以看出,随着含水率增加,脱盘力减小,并保持相当水平,但是过于湿润的苗钵会减弱其抗压特性,脱盘力与抗压力之间要有一个适中的匹配^[20]。进一步比较各种试验组合下的脱盘力,均无显著差异,表明各种试验条件下脱盘力不受夹取作用影响,数值不同主要来自苗钵个体差异。试验测试得到番茄穴盘苗脱盘力平均最小值为 1.59 N,最大值为 2.29 N。虽然穴孔形状和尺寸可能会影响穴孔与苗钵的粘附力度,但对于自动移栽而言,仍然需要夹取针对苗钵产生足够的夹紧力去克服粘附力来取苗。如果在自动移栽时提前放松苗钵,对提取力的要求会很低。这就是顶穴式取苗方式^[25]。

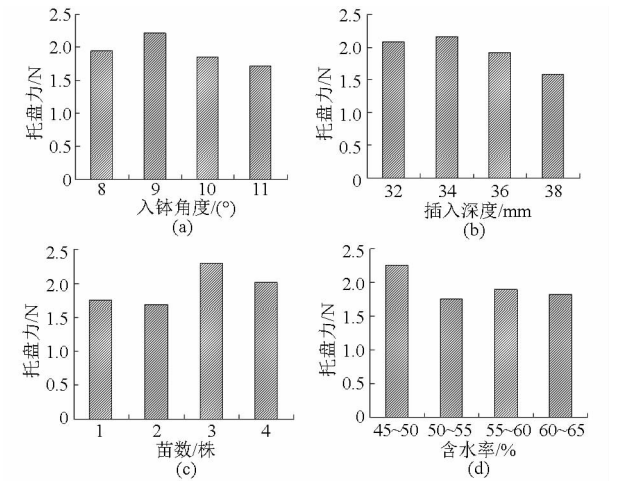


图 5 各种试验条件下穴盘苗脱盘力

Fig. 5 Forces for extracting seedlings from tray cells under various conditions

分析夹钵取苗效能的正交试验安排表及试验结果如表 2 所示。

根据破碎率各试验因素的 k 值确定优组合为 $A_4B_1C_4D_3$,即当入钵角为 11° ,入钵深度为 32 mm,苗数为 4 株,含水率为 55% ~ 60% 时,在 40 mm/s 提升速度下取苗末端执行器对苗钵的夹取作用效果达到最小根土破坏程度。根据 R 值大小确定试验因素的主次顺序是 $D、A、C、B$ 。对所获试验结果进行

统计方差分析,分析结果如表 3 所示。结果表明对于两指四针钳夹式夹钵取苗方法,苗钵含水率水平高度显著影响根土破坏率($p = 0.004$),入钵角度、深度以及根系状况等试验因素没有统计学显著性影响($p > 0.05$)。

表 2 试验方案与结果极差分析

Tab.2 Experimental program and range analysis of results						
试验号	因素					指标
	A	B	C	D	误差	$S_{DR}/\%$
1	1	1	1	1	1	4.65
2	1	2	2	2	2	3.94
3	1	3	3	3	3	1.89
4	1	4	4	4	4	2.11
5	2	1	2	3	4	1.68
6	2	2	1	4	3	1.47
7	2	3	4	1	2	4.38
8	2	4	3	2	1	3.51
9	3	1	3	4	2	1.37
10	3	2	4	3	1	1.26
11	3	3	1	2	4	3.58
12	3	4	2	1	3	4.06
13	4	1	4	2	3	2.67
14	4	2	3	1	4	4.48
15	4	3	2	4	1	1.31
16	4	4	1	3	2	1.42
k_1	3.15	2.59	2.78	4.39	2.68	
k_2	2.76	2.79	2.75	3.43	2.78	
k_3	2.57	2.79	2.81	1.56	2.52	
k_4	2.47	2.78	2.61	1.57	2.96	
R	0.61	0.18	0.19	2.55	0.40	
优组合	4	1	4	3		

表 3 方差分析结果

Tab.3 Results of variance analysis						
方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性水平
A	1.08	3	0.36	2.65	0.222	ns
B	0.11	3	0.04	0.27	0.843	ns
C	0.10	3	0.03	0.25	0.860	ns
D	23.87	3	7.96	58.81	0.004	**
误差	0.41	3	0.14			
总和	25.56					

注:ns, 不显著; * *, $p < 0.01$ 时显著水平。

采用两指四针钳夹式夹钵取苗方法,苗钵含水

率水平显著影响取苗质量。Ryu 等^[26]利用滑针式取苗末端执行器开展移栽试验,发现在 44% ~ 59% 中等水平根土含水率下能够获得最好的移栽效果。对于我国基质育苗,移栽 55% ~ 60% 苗钵含水率水平具有较低的夹取根土破坏率,均值为 1.56%,能够最大限度保持根钵完整性。此最优含水率水平略高于国外,可能的原因是育苗基质成分的差异,我国育苗基质为草本泥炭型,其持水力、空气度等物理特性远不及国外广泛使用的藓类泥炭^[27]。在各种夹取条件下 60% ~ 65% 苗钵含水率水平夹取效能与最优含水率相当,根土破坏率均值为 1.57%,均低于 55% 含水率以下的根土破坏率。原因是草本泥炭型苗钵含水率低,根土粘结力降低,夹取过程容易松散^[28]。移栽时必须严格控制苗钵含水率,使其适中,含水率水平保持在 55% ~ 65% 范围内为宜。

对于采用夹钵方式来取苗,当采用四针点从幼苗主根四周插入钵体夹持时,能显著聚拢根系和基质体,在 9° ~ 11° 入钵角和 32 ~ 38 mm 入钵深度下,末端执行器夹钵取苗效能相当,根土破坏率为 2.47% ~ 2.79%。当入钵角为 8° 时,夹取破坏率为 3.15%,破坏程度相比增大,可能的原因是夹取针过于垂直,使得夹取针对根土的抓取量不够。由于夹取过程中根系是主要的受力部件,显然苗钵盘根性越好,夹取过程中具有越小的根土破坏程度。穴孔里 3、4 株幼苗夹取时根土破坏低于 1、2 株。但在实际生产中,穴盘育苗往往采用精良化播种方式,一穴一苗^[30]。为了增强苗钵盘根性,可以通过增加育苗基质纤维成分的方法增强基质体自身的盘结强度,比如使用岩棉材料等^[31],也可以通过苗期水肥管理、环境调控等措施促根盘结生长^[32]。

将设计的末端执行器安装到一种温室穴盘苗移栽机自动取苗机械手^[33]上,开展从 128 穴盘自动移栽穴盘苗到 50 穴盘试验。试验结果如表 4 所示,从实际效果来看,对西兰花、辣椒、番茄和黄瓜 4 种穴盘苗,当移栽频率为 22 株/min 时,平均取苗成功率为 90.14%^[28]。取苗后幼苗全部成活,移栽效果满意。

表 4 移栽性能试验结果

Tab.4 Results of transplanting performance tests							
苗种类	苗数	空穴数	提取失败数	根土破碎数	伤苗数	投苗失败数	取苗成功率/%
西兰花	384	9	6	6	12	0	93.60
辣椒	384	0	15	12	0	0	92.97
番茄	384	9	4	15	9	9	90.13
黄瓜	384	0	6	12	32	12	83.85

4 结论

(1) 设计了一种两指四针钳夹式夹钵取苗末端

执行器。利用 2 根气缸机械手指伸出 4 根夹取针插入苗钵,气缸机械手指闭合,夹取针捏紧苗钵来取苗,利用 2 根气缸机械手指撑开放松夹持苗钵,4 根

夹取针回缩脱离苗钵来放苗。对苗钵夹取操作,分为取苗时夹取针刺入钵体,抓紧钵体,提取苗钵,放苗时夹取针放松夹持苗钵,夹取针回缩,释放苗钵。根据穴盘苗自动取苗力学要求,进行基于穴盘苗力学特性的夹取机构结构设计,得出理论上满足最大穴盘苗拉拔脱盘力的弹簧最小收紧力为 2.45 N。

(2) 进行夹钵取苗力学测试,在 40 mm/s 提取速度下,各试验因素夹钵脱盘力无显著性差异,获得

番茄穴盘苗脱盘力平均最小值为 1.59 N,最大值为 2.29 N。取苗末端执行器设计时需要夹取针对苗钵产生足够的夹紧力去克服粘附力来脱盘。夹钵取苗效能正交试验发现,苗钵含水率水平高度显著影响根土破坏率,其余试验因素没有统计学显著性影响。当入钵角为 11° ,入钵深度为 32 mm,苗数为 4 株,含水率为 55% ~ 60% 时,在 40 mm/s 提取速度下取苗末端执行器对苗钵的夹取作用达到最小根土破坏程度。

参 考 文 献

- 1 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2014,45(8):44-53.
Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44-53. (in Chinese)
- 2 俞高红,刘炳华,赵匀,等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J]. 农业机械学报,2011,42(4):53-57.
Yu Ganhong, Liu Binghua, Zhao Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):53-57. (in Chinese)
- 3 叶秉良,俞高红,陈志威,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(12):7-12.
Ye Bingliang, Yu Gaohong, Chen Zhiwei, et al. Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):7-12. (in Chinese)
- 4 Mao Hanping, Ding Wenqin, Liu Fa, et al. Structure design and simulation analysis on the plug seedlings auto-transplanter[C]// IFIP Advances in Information and Communication Technology, Computer and Computing Technologies in Agriculture VI, 2011, 344:456-463.
- 5 崔巍,方宪法,赵亮,等. 齿轮-五杆取苗装置机构优化与试验验证[J]. 农业机械学报,2013,44(8):74-77.
Cui Wei, Fang Xianfa, Zhao Liang, et al. Structural optimization and experimental verification of geared five-bar linkage seedling pick up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):74-77. (in Chinese)
- 6 严宵月,胡建平,吴福华,等. 整排取苗间隔放苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):7-13.
Yan Xiaoyue, Hu Jianping, Wu Fuhua, et al. Design and experiment of full-row-pick-up and single-dropping seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1):7-13. (in Chinese)
- 7 陈科,杨学军,颜华,等. 基于 Matlab 的全自动移栽机取苗机构设计与参数优化[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):24-26,32.
Chen Ke, Yang Xuejun, Yan Hua, et al. Design and parameter optimization of seedling pick-up mechanism based on Matlab[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1):24-26,32. (in Chinese)
- 8 俞亚新,骆春晓,俞高红,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构参数优化[J]. 农业机械学报,2013,44(6):62-68.
Yu Yaxin, Luo Chunxiao, Yu Gaohong, et al. Parameters optimization of pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):62-68. (in Chinese)
- 9 叶秉良,刘安,俞高红,等. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(2):57-62.
Ye Bingliang, Liu An, Yu Gaohong, et al. Parameters optimization with human-computer interaction method and experiment of vegetable seedling pick-up mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):57-62. (in Chinese)
- 10 陈建能,王英,黄前泽,等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(10):52-56,92.
Chen Jianneng, Wang Ying, Huang Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):52-56,92. (in Chinese)
- 11 韩长杰,杨宛章,张学军,等. 穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(8):51-61.
Han Changjie, Yang Wanzhang, Zhang Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):51-61. (in Chinese)
- 12 赵雄,陈建能,杨茂祥,等. 二阶自由非圆齿轮行星系钵苗移栽机取苗机构[J]. 农业机械学报,2014,45(4):123-127.
Zhao Xiong, Chen Jianneng, Yang Maoxiang, et al. Seedling pick-up mechanism of planetary gear train with two-order general non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):123-127. (in Chinese)

- 13 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 70–78.
Ye Bingliang, Li Li, Yu Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 70–78. (in Chinese)
- 14 张丽华, 邱丽春, 田素博, 等. 指针夹紧式穴盘苗移栽爪设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 235–237.
Zhang Lihua, Qiu Lichun, Tian Subo, et al. Design of a needle clamping claw for plug seedling transplanting[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 235–237. (in Chinese)
- 15 孙国祥, 汪小昆, 何国敏, 等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 47–53.
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, He Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 47–53. (in Chinese)
- 16 韩绿化, 毛罕平, 缪小花, 等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 260–265.
Han Lühua, Mao Hanping, Miao Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260–265. (in Chinese)
- 17 冯青春, 王秀, 姜凯, 等. 花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 21–27.
Feng Qingchun, Wang Xiu, Jiang Kai, et al. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 21–27. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24–28.
Han Lühua, Mao Hanping, Hu Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24–28. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 毛罕平, 韩绿化, 胡建平, 等. 一种两指四针穴盘苗自动移栽取放苗装置: 中国, ZL201210477010.5[P]: 2012–11–22.
- 22 胡敏娟. 穴盘苗自动移栽关键技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
Hu Minjuan. Research on the key technology for automatic plug seedling transplanting[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 23 Choi W C, Kim D C, Ryu H L, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13–19.
- 24 Yang Y, Ting K C, Giacomelli G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(4): 493–498.
- 25 Shaw L N. Removing and handling modular vegetable seedling from nursery trays[J]. Proc. Fla. State Hort Soc., 1999, 112: 153–155.
- 26 Ryu K H, Kim G, Han J S. Development of a robotic transplanter for bedding plants[J]. Automation and Emerging Technologies, 2001, 78(2): 141–146.
- 27 杜林峰, 孙向阳, 陈建武, 等. 国内外泥炭基质养分比较研究[J]. 北方园艺, 2008(7): 55–57.
Du Linfeng, Sun Xiangyang, Chen Jianwu, et al. Comparisons of nutrient of peat growing mediums by domestic and foreign manufacturers[J]. Northern Horticulture, 2008(7): 55–57. (in Chinese)
- 28 Mao H, Han L, Hu J, et al. Development of a pincette type pick-up device for greenhouse seedling automatic transplanting[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(4): 547–556.
- 29 金鑫. 蔬菜穴盘苗自动移栽技术与装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- 30 NY/T 2119—2012 蔬菜穴盘育苗 通则[S]. 2012.
- 31 Ting K C, Giacomelli G A, Shen S J. Robot workcell for transplanting of seedlings part II—End-effector development[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 1013–1017.
- 32 倪纪恒, 付卫国, 毛罕平, 等. 一种提高移栽机取苗成功率的育苗方法: 中国, 201310479467.4[P]. 2013–10–15.
- 33 毛罕平, 韩绿化, 胡建平, 等. 一种穴盘苗移栽机自动取苗机械手: 中国, 201310595017.1[P]. 2013–11–25.