

温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验

周海丽^{1,2} 刘珂¹ 童俊华^{1,2} 李振¹ 饶益成¹

(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: 温室穴盘钵苗成苗后需要从穴盘移植到培养槽孔,但因人工作业效率低,限制了其规模化生产。为实现高效、高质量自动化移栽作业,本文设计一种用于温室穴盘钵苗高速取、放苗移栽作业的爪片插入式成排移植手部件,分析取苗作业过程移植手的受力及取放苗过程移植手的变形,结合 ADAMS 刚柔耦合仿真试验开展植苗手优化设计,确定爪片尖点拟合曲线及移植手抓取穴盘钵苗的运行轨迹。以移植手取苗深度、基质含水率、升降速度和水平横移速度为试验因素,开展成排移植手部件取、放苗正交试验,并确定最佳参数组合。结果表明,当取苗深度 48 mm、基质含水率 69.9%、升降速度 0.24 m/s 和水平横移速度 0.35 m/s 时,取放苗成功率为 97.9%,效率 10 322 株/h,满足高速、高效移栽要求。该研究为温室穴盘钵苗高速移栽部件的国产化开发提供参考。

关键词: 移栽机; 穴盘钵苗; 移植手; 设计

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0082-09

OSID:



Design and Test of Row Picking End-effectors for Potted Seedlings in Greenhouses

ZHOU Haili^{1,2} LIU Ke¹ TONG Junhua^{1,2} LI Zhen¹ RAO Yicheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Potted seedlings need to be transplanted from the plug tray to the cultivation slot in greenhouses, while the inefficient manual operation limits the large-scale production. In order to achieve efficient and high-quality automatic transplanting operation, a kind of row picking end-effectors with plug-in claws was designed for high-speed transplanting operation of greenhouse pot seedlings. The stress and the deformation of the transplant effector during taking and releasing seedlings were analyzed. Combined with ADAMS rigid-flexible coupling simulation, the optimization design of the transplant effector was carried out to determine the fitting curve of the claw tip point and the gripping trajectory for the pot seedling. Taking the main factors affecting the success rate of taking and releasing seedlings, such as grasping seedling depth, substrate moisture content of matrix, lifting speed and horizontal speed, as the variables, the orthogonal test was carried out, and the optimal parameter combination was determined. Based on the results of examination, it can be found that the best parameter combination was the grasping seedling depth of 48 mm, moisture content of matrix of 69.9%, lifting speed of 0.24 m/s and horizontal speed of 0.35 m/s. Under the optimal condition, the success rate of taking and releasing seedlings was 97.9%, and the efficiency reached 10 322 plants/h, which can meet the requirements of high-speed and efficient transplanting. The research result can provide a reference for the domestic development of high-speed pot seedlings transplanter in greenhouses.

Key words: transplanter; potted seedlings; end-effectors; design

收稿日期: 2022-10-28 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000702)、国家自然科学基金项目(32201676)、浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C02026)和浙江理工大学科研启动基金项目(19022456-Y)

作者简介: 周海丽(1989—),女,讲师,博士,主要从事农业机器人技术研究,E-mail: zhouhl@zstu.edu.cn

通信作者: 童俊华(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业装备智能化技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn

0 引言

温室蔬菜、花卉等穴盘钵苗培育技术与传统农业技术相比具有苗株生长品质好、产量高等多种优点。温室穴盘钵苗成苗后,需进一步移植分栽到生长空间更大的培育盆或槽孔中,该过程工作任务繁重,研发相应移栽机具有重要意义^[1-3]。

国外对穴盘钵苗移栽技术研究起步早,文献[4-7]以工业机器人为主体,驱动移植手进行移栽作业,实现穴盘苗移栽到目标容器中;文献[8-10]设计了一种工业用的 SCARA 四自由度机器人,在此基础上进一步设计了一种具有专用传感器 Sliding-needleswith sensor(SNS)的末端执行器,并通过试验验证了其可行性,该机器最高移栽效率为 2.62 s/株,整体成功率为 50%~95%;CHOI 等^[11]设计一种简单、高效的五连杆取苗机构,搭配一个末端执行器,曲柄转速为 30~40 r/min,移栽效率为 30 株/min,成功率为 97%;VIKAS 等^[12]基于 3-DOF 串行机械臂设计出一款自动移栽纸钵机,通过传感器检测是否存在纸钵,进行移栽作业,其移栽效率为 20 株/min。近年,国内学者也加强对移栽器械的研究,针对移栽作业情况研发了多种移栽机。周婷等^[13-14]设计了一种斜楔杠杆式末端执行器,适用于多规格穴盘钵苗的移栽,移栽成功率为 76.11%;韩绿化等^[15-16]设计了一种轻简型自动移栽机,采用两指四针式移植手,分别对 72 孔和 128 孔穴盘进行移栽试验,移栽效率分别达到 1 025、1 221 株/h,平均移栽成功率为 90.70%;崔永杰等^[17]设计了一种基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器,可适应多种穴盘苗间距的稀植移栽作业,移栽成功率为 93.33%,移栽效率为 22 株/min。上述国内外研究主要针对移栽可行性进行研究,所设计的大多数移栽机械搭配单末端执行器。针对目前农业机械高速、高效作业要求,学者提出采用多末端执行器进行分栽,然而,由于目前的单末端执行器普遍结构复杂且体积较大,简单配置多个单末端执行器无法适用于目前的高速、高效作业环境。

为满足高速移栽作业需求,国外学者开展了上游分栽环节搭配多末端执行器的移栽器械研究,并且实现了移栽机产品化。荷兰 Visser 公司^[18]研制的 PIC-O-Mat BL 型移栽机主要用于将钵苗移栽至花盆内,结构紧凑,适应多种穴盘和花盆尺寸,移栽效率可达 10 000 株/h;意大利 Urbinati 公司^[19]研制的 RW64 型自动移栽机搭配多种控制程序,可实现对穴盘钵苗的整排移栽,最大移动距离为 2 100 mm,移植手最小移栽间距为 21 mm,通过无线控制电机动

作,可搭配双排共 80 个移植手同时作业,其最高效率达到 56 000 株/h,但该移栽机主要是适应本国作物种植模式及其农艺要求,与中国的农艺国情不相适应且价格昂贵。为了设计适合我国园艺生产的移栽器械,国内研究人员开展了研究。TIAN 等^[20]设计一种搭配 4 移植手工作的移栽机,移栽效率为 1 800~2 400 株/h,移栽成功率为 81.2%;文献[21-22]设计一种 8 个手爪的高效钵苗移栽机,最佳移栽效率为 80 株/min,移栽成功率达到 94.1%;黎波等^[23-24]针对椰糠基质,分别设计了一种 4 伸缩针式移植机械手和一种片式收缩移植手,试验发现最佳参数组合下取苗成功率为 100%,爪片收缩 3.2 mm、根系分布率为 92%,成功率为 96.67%;俞高红等^[25]设计了一种八行同步取苗机构,适用于密植移栽农艺,移栽成功率为 95%;孟青新^[26]研制了一种小空间二次夹紧取苗移植手,移栽平均效率为 4 320 株/h,移栽成功率可达 97.22%。

本文基于温室穴盘钵苗高速移栽作业需求,设计一种可在小空间成排取放苗的爪片插入式末端执行机构,基于 ADAMS 开展刚柔耦合仿真、力学分析,以及移植作业参数正交分析,以期成排取苗移植手部件的设计提供参考。

1 成排取苗移植手部件设计

1.1 部件结构设计

穴盘钵苗成排取苗移植手部件需要将穴盘中穴盘钵苗成排取出,分栽至栽培槽内进行后续培育,设计的成排移植手部件结构如图 1 所示。移植部件主要由机架、穴盘安装定位板、左右横移模组、同步轴、步进电机、升降气缸、升降导杆、成排移植手等组成。

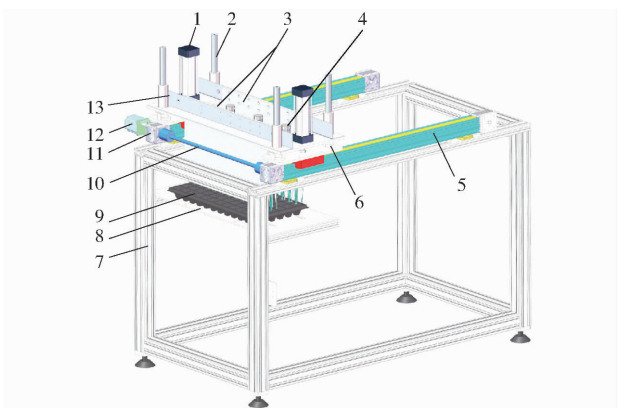


图 1 成排取苗移植手部件示意图

Fig. 1 Component diagram of row picking end-effectors

1. 升降气缸 2. 升降导杆 3. 成排移植手 4. 移植气缸 5. 右横移模组 6. 滑块固定板 7. 机架 8. 穴盘安装定位板 9. 穴盘 10. 同步轴 11. 左横移模组 12. 步进电机 13. 成排移植手固定板

1.2 工作原理

成排取苗移植手部件工作原理:穴盘放在穴盘安装定位板上固定位置,升降气缸下降(气缸升降速度通过气流调节阀控制进气量来调节),通过升降导杆进行垂直方向导向进而带动成排移植手整体下降,移植气缸伸出取苗,然后升降气缸上升,左右横移模组通过步进电机驱动整体横向移动到固定位置,移植气缸收缩、放苗。整体反向横移到下一列穴盘钵苗位置,复位,以此类推直到穴盘中穴盘钵苗全部移栽完为止,更换穴盘实现循环移栽作业。

2 爪片式移植手设计与分析

2.1 穴盘钵苗物理特性

穴盘钵苗选用杭州市萧山区萧苗农场培育的“浙茄一号”茄子里苗,基质块由泥炭、蛭石与珍珠岩基质配比 6:3:1 组成^[27],种植于 72 孔 PVC 材质专用穴盘内,育苗穴盘如图 2 所示。穴盘上口径 38 mm,底部 18 mm,高度为 55 mm,6×12 孔穴盘,单容积 40 mL。穴盘钵苗如图 3 所示,结构尺寸如表 1 所示。



图 2 育苗穴盘
Fig.2 Seedling cavity trays

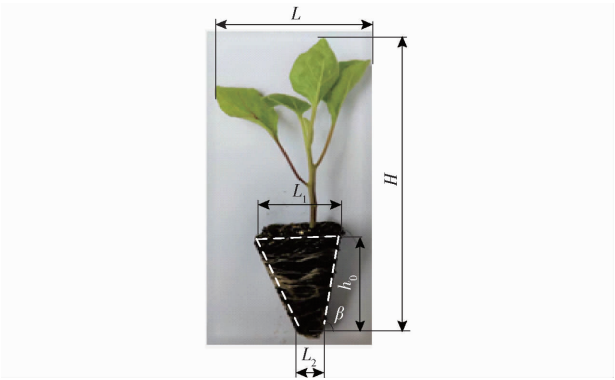


图 3 茄子植株结构尺寸
Fig.3 Structure and size of eggplant seeding

表 1 苗株结构尺寸

参数	数值
穴盘钵苗高度 H/mm	110 ~ 125
基质块上边长 L_1/mm	37.56 ~ 38.75
基质块下边长 L_2/mm	17.84 ~ 18.23
基质块高度 h_0/mm	50.01 ~ 50.45
穴盘倾角 $\beta/(\text{^\circ})$	78.19 ~ 79.15

2.2 移植手结构设计

移植手爪片直接与穴盘钵苗基质接触,其结构形状和夹紧力直接反映取放苗质量。目前,国内移植手主要采用斜插入结构和斜插入夹紧式结构。相对于斜插入结构,斜插入夹紧式结构在斜向下插入时同步向内收缩,对穴盘钵苗形成预紧力,可提高移栽稳定性。同时,从爪片形式看,相比于 2 爪式、3 爪式结构,4 爪式移植手的 4 个苗爪片抓取时对基质的包裹性更强,取苗更可靠。综上,为了实现稳定、高效移栽作业,本文确定移植手结构为 4 苗爪片插入式夹紧取苗结构,进而设计了一种爪片插入式夹紧成排移植手。

成排移植手结构如图 4 所示,主要由固定背板、移植气缸、固定座、爪座、苗爪片、导向板、撑开固定座和撑开片等组成。移植气缸缸体和固定背板通过固定座固连,移植气缸推杆与均匀分布的 4 个苗爪片通过爪座固连,苗爪片从导向板的导向孔穿入,导向板与固定背板下端固连,撑开片与导向板通过撑开固定座固连,撑开片下部焊接撑开片导向孔,并保证苗爪片在撑开片导向孔内部运动。该装置相邻两移植手中心距与 72 孔穴盘相邻穴孔中心距一致,均为 42.5 mm。

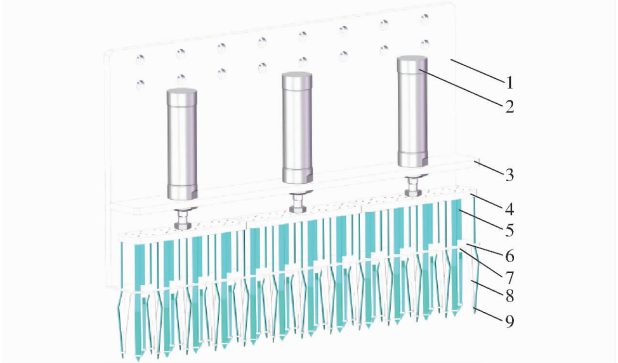


图 4 成排移植手结构
Fig.4 Structures of transplant effectors

1. 固定背板 2. 移植气缸 3. 固定座 4. 爪座 5. 苗爪片 6. 导向板 7. 撑开固定座 8. 撑开片 9. 撑开片导向孔

取苗工作时,移植部件为初始状态(图 5a),移植气缸处于收缩状态,4 个苗爪片由于撑开固定座的限位,苗爪片端部张开;当移植部件整体在穴盘正上方下降到最佳取苗位置(图 5b)时,移植气缸推杆伸出,推动爪座与 4 个苗爪片一起向下运动,苗爪片向内折弯并合拢,完成取苗(图 5c);移植部件整体上升,将穴盘钵苗取出且上升高度大于穴盘钵苗最大高度,不影响其他穴盘钵苗(图 5d);钵苗被取出穴盘后到达预定高度,水平移动到预定位置,整体下降至最佳放苗高度(图 5e);移植气缸收缩,在撑开片辅助下带动苗爪片张开、回位,在撑开片导向孔的

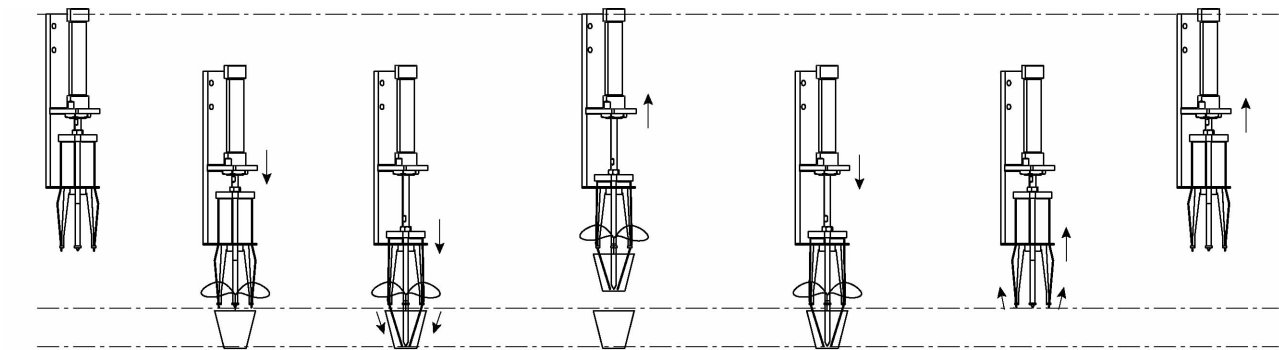


图 5 移植手取苗动作图

Fig. 5 Diagram of end-effectors picking action

辅助下实现苗爪片与钵苗分离,完成放苗动作(图 5f);移植部件整体上升,返回钵苗正上方复位(图 5g),进入下一次取苗循环。

2.3 移植手取苗受力分析

移植手在取苗过程中,苗爪片直接与基质接触,苗爪片对基质的受力情况直接影响移植成功率。本文在移植手安装空间和动力气缸推力相对较大情况下,初步确定移植手插入角 α_1 为 80° ,使得移植时穴盘钵苗损伤较小,且保证钵苗基质抓取完整性。

取苗时,移植手在穴盘钵苗正上方通过 4 个苗爪片斜插入进行作业,对移植手提取苗株过程进行受力分析,如图 6 所示。图中 α_1 为插入角, F_f 为苗爪片对基质的摩擦力, F_n 为苗爪片对基质的法向支撑力, F_g 为穴盘-基质块间黏附力的竖直分力与钵苗重力的合力, M 为基质块重心, O 为坐标轴原点。

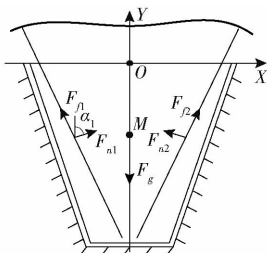


图 6 移植手取苗作业受力分析

Fig. 6 Force analysis of end-effectors pick-up operation

为保证移植手成功夹取穴盘钵苗,取苗作业时各作用力应满足

$$\begin{cases} 2(F_{f1} + F_{f2})\sin\alpha_1 + 2(F_{n1} + F_{n2})\cos\alpha_1 \geq F_g \\ F_{f1}\sin\alpha_1 - F_{f2}\sin\alpha_1 = F_{n1}\cos\alpha_1 - F_{n2}\cos\alpha_1 \\ F_{f1} = \mu F_{n1} \\ F_{f2} = \mu F_{n2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 μ ——基质与苗爪片间摩擦因数

忽略基质和穴盘钵苗根的影响,可得钵苗在两侧受到对称力作用,即

$$\begin{cases} F_{n1} = F_{n2} \\ F_{f1} = F_{f2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、(2)得出,移植手取苗作业时所受作用力应满足

$$4F_{f1}\sin\alpha_1 + 4F_{n1}\cos\alpha_1 \geq F_g \quad (3)$$

F_f 与 F_n 的计算式为

$$\begin{cases} F_f = F_T\sin\alpha \\ F_n = F_T\cos\alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_T ——移植手动力气缸推力

本文选用亚德客 MA25 型移植手气缸,缸径为 25 mm,行程为 50 mm。取苗移植气缸推力为

$$F_T = 0.85pD^2\pi/4 \quad (5)$$

式中 p ——输入气体平均压力,取 0.7 MPa

D ——气缸缸径,mm

根据式(5)可求出 F_T 为 291.9 N,由此可求出 F_f 为 286.58 N, F_n 为 50.53 N,由式(3)左侧可知取苗手拉拔力总和为 1 164 N。根据课题组前期试验研究,竖直方向穴盘钵苗重力以及黏附力之和不大于 10 N,因此所设计结构满足移栽要求。

2.4 移植手弯曲变形分析

穴盘钵苗移植作业时,采用固定角度斜插入进行移植作业。当成排移植手并行作业时,则在相同取苗深度下,若移植手苗爪片垂直插入基质块中,易发生基质块破损、移栽输送过程穴盘钵苗掉落等现象。因此移植手设计时,需优先考虑苗爪片插入角度接近穴盘倾角。本文选取插入角为 80° 。

本文所设计的苗爪片一端固定,中间受到导向板控制并保持相同位置导向,另一端受撑开片导向孔挤压作用,因此,苗爪片初始动作类似外伸梁的弯曲变形^[28]。移植手放苗和取苗的结构简图如图 7 所示。分析可知,苗爪片折弯在撑开片导向孔作用下张开,此时苗爪片变形最大。随着苗爪片伸出扎取穴盘钵苗的过程,苗爪片在折弯恢复变形作用下对穴盘钵苗产生收缩夹紧作用,以保证取苗过程中移植手的稳定性。

2.5 移植手放苗过程刚柔耦合仿真分析

移植手苗爪片材质为 65Mn 钢,苗爪片固定连接

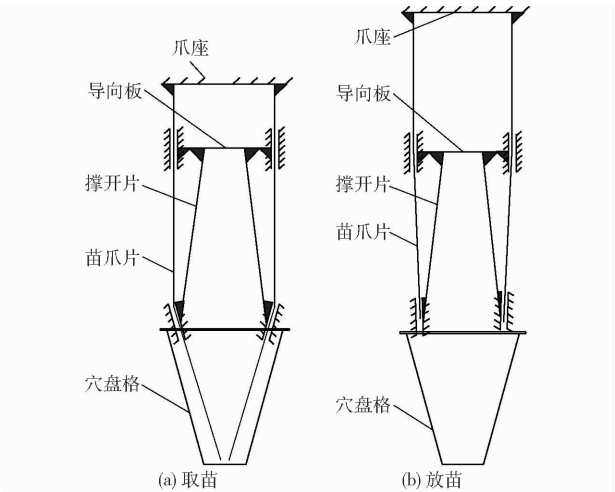


图 7 移植手取、放苗结构简图

Fig. 7 Picking and releasing structure sketch of end-effectors

折弯至 90°;再向内折弯一定角度后,经过 900℃ 淬火和 8 h 中温回火热处理,从而提高苗爪片韧性,并保持表面硬度及耐磨性,不改变折弯件形状。厚度为 1 mm 的弹簧钢苗爪片折弯后热处理的弯曲效果符合取苗移栽要求,因此选择苗爪片厚度为 1 mm。

针对苗爪片宽度,选取宽度 2、4、6 mm 苗爪依次安装于移植手爪座上,开展钵苗移栽试验,试验对象为一般状态的钵苗。试验结果表明,2 mm 苗爪片易弯曲,刚性差,易断折,接近爪针移植手取苗效果,不利于稳定抓取种苗;宽 4 mm 苗爪片移植手无法对基质形成包裹性抓取,导致基质易破损掉落。考虑到苗爪片采用螺栓固定时安装孔位置的强度,本文移植手初选用宽度 6 mm 苗爪片。根据韦康成^[29]穴盘苗夹持装置综合性能指标研究,发现钵苗茎叶正好位于末端执行器下落轨迹处时,钵苗的茎和叶会产生弹性变形而滑开,因此爪片对于苗株移栽存活率影响不大。在后续整机试验测试中,6 mm 爪片对苗叶和钵体根系的损伤率并没有明显提高,因此确定苗爪片宽度为 6 mm。

成排移植手取苗过程中,通过撑开片向外撑开苗爪片变形,撑开片下方苗爪片由于自身折弯角度向内弯曲变形,当到达预定位置时,苗爪片不产生刚性变形,因此考虑苗爪片柔性变形,对移植手进行刚柔耦合分析有实际工程意义。

在 SolidWorks 中建立苗爪片三维模型,并输出为 x_t 格式文件,将其导入到 ANSYS 中,设置材料属性:材质 65Mn 钢,密度 ρ 为 7 810 kg/m³,弹性模量 E 为 2.1×10^{11} Pa,泊松比 ν 为 0.288。实现爪片柔性化,并导出中间 MNF 格式文件,如图 8 所示。

在 ADAMS 中对移植气缸推杆添加驱动,推杆移动距离为 50 mm,对移植手刚柔耦合模型进行仿

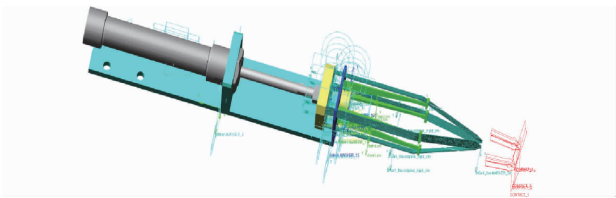


图 8 刚柔耦合仿真模型

Fig. 8 Rigid-flexible coupling simulation model

真。由于 4 个苗爪片和撑开片均相同,故隐藏其他 3 个,仅对其中一个进行显示。在苗爪片尖点添加一个标记点,如图 9 所示,其中红色箭头显示接触力大小。

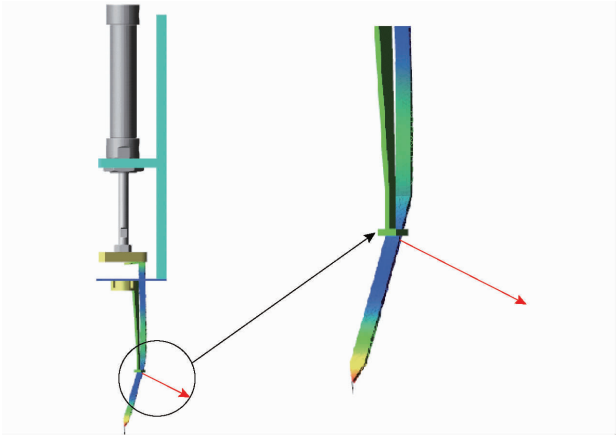


图 9 移植手仿真效果

Fig. 9 End-effectors simulation effect

对苗爪片取苗过程进行仿真分析,结果如图 10 所示。在取苗过程中,苗爪片向内平稳收缩。取苗深度为 0 时,单苗爪片挠度为 -7.5 mm。到达取苗深度时,苗爪片挠度接近 0,表明此过程中两个苗爪片向内运动的水平距离略小于 15 mm。上述两个位置对应的穴盘钵体上下边长之差为 19.33 mm。表明苗爪片运动轨迹始终在钵体内,未扎到穴盘侧壁,符合使用要求。

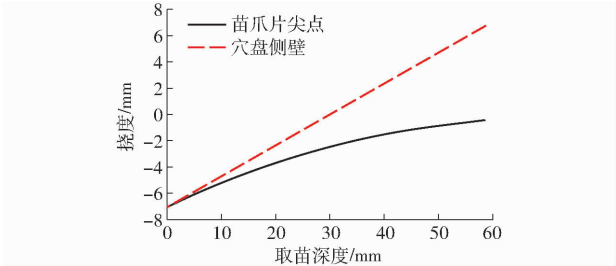


图 10 取苗过程中苗爪片尖点轨迹仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of claw point trajectory in process of picking seedlings

3 移植部件取放苗试验

3.1 成排取苗方案

穴盘钵苗移栽方式主要分为按行移栽和按列移栽。穴盘孔中心距较小,而栽培槽孔中心距较

大,且相邻两排栽培槽孔中心距相比相邻两排穴盘大很多。为减小移栽过程中钵苗之间间距频繁变换的位移,穴盘和栽培槽输送方向相同时,穴盘至栽培槽移栽方案选择按列移栽,此时移栽效率最高。

3.2 试验评价指标

成排移植手成功提取“浙茄一号”茄子苗,且穴盘钵苗不掉落,同时成排移植手放苗能够顺利推落穴盘钵苗,即为试验成功。移植部件取放苗成功率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{N - N_1 - N_2 - N_3}{N} \times 100\%$$

(6)

式中 N ——穴盘钵苗总数量
 N_1 ——未取和带出穴盘钵苗数量
 N_2 ——移栽过程中穴盘钵苗掉落数量
 N_3 ——基质块散落质量大于移植后基质质量 30% 的穴盘钵苗数量

3.3 试验方法

在穴盘钵苗发育状况和移植结构等条件相同的情况下,以移植手取苗深度 A 、基质含水率 B 、升降速度 C 和水平横移速度 D 为试验因素。以取放苗成功率为评价指标,开展正交试验。

移植手取苗深度越大,苗爪片向内运动位移越大,有利于提取穴盘钵苗,但取苗深度达到一定值时,基质压缩变形增加,整体横移运动时,易导致基质散落,影响移植手放苗作业。根据刚柔耦合仿真结果,选择取苗深度为 44、46、48 mm,通过调节移植气缸行程控制取苗深度。

基质含水率影响基质物理特性,当基质含水率过低时,基质孔隙相对较大、透气性好,基质较干燥,导致基质粘附力降低、蠕变性能小,在相同夹取力下基质易破损散落,不利于移植手夹取和投放,移植效果较差。反之,当基质含水率过大时,会导致基质软化,不利于基质固结,不利于移植手取放苗。根据前期研究,选择基质含水率为 59.9%、69.9%、80%。

移植部件在垂直方向移动过程中,升降气缸推动成排移植手整体向上运动时,开始为加速运动,接近预定高度开始减速运动,变加速变减速过程使穴盘钵苗与苗爪片间产生局部冲击振动,易导致基质散落。选取升降速度为 0.16、0.20、0.24 m/s。

移植部件水平方向移动过程中,步进电机驱动左右横移模组,带动移植部件水平移动至固定位置,变加速变减速过程使得在初始位置与放苗末位置,移植部件产生一定的碰撞冲击,易使穴盘钵苗掉落。选取水平横移速度为 0.30、0.35、0.40 m/s。

采用 Design-Expert 设计四因素三水平 BBD

(Box – Behnken design) 正交试验^[30],对移植部件进行移栽性能分析。正交试验因素编码如表 2 所示,试验结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 、 D 为编码值。

表 2 移植部件正交试验因素编码
Tab.2 Factor levels for orthogonal tests of transplanted components

编码	因素			
	取苗深度/ mm	基质含水 率/%	升降速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水平横移速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1	44	59.9	0.16	0.30
0	46	69.9	0.20	0.35
1	48	80.0	0.24	0.40

表 3 移植部件正交试验结果
Tab.3 Orthogonal test results of multi-ported hand parts

序号	取苗 深度 A	基质含 水率 B	升降 速度 C	水平横移 速度 D	移植手取放 苗成功率 $Y_1/\%$
1	-1	0	0	-1	87.5
2	0	-1	-1	0	85.4
3	1	-1	0	0	87.5
4	0	-1	0	1	83.3
5	0	-1	1	0	87.5
6	1	1	0	0	97.9
7	0	0	0	0	91.7
8	-1	-1	0	0	87.5
9	0	0	1	-1	85.4
10	1	0	0	1	87.5
11	-1	1	0	0	83.3
12	0	1	-1	0	95.8
13	-1	0	-1	0	83.3
14	0	0	1	1	83.3
15	0	0	0	0	91.7
16	0	0	-1	-1	93.8
17	0	-1	0	-1	83.3
18	0	1	0	1	85.4
19	1	0	0	-1	89.6
20	0	0	0	0	93.8
21	0	1	0	-1	91.7
22	1	0	-1	0	93.8
23	0	0	0	0	83.3
24	0	1	1	0	83.3
25	-1	0	1	0	87.5
26	1	0	1	0	85.4
27	0	0	0	0	91.7
28	0	0	-1	1	87.5
29	-1	0	0	1	83.3

3.4 试验结果与分析

根据表 3 中试验结果,对移植部件取放苗成功率进行方差分析(表 4),回归模型极显著($P < 0.01$),拟合效果好。

对模型进行进一步分析,结果表明,对移植部件取放苗成功率回归方程影响成功率的主次顺序为

表 4 取放苗成功率试验结果分析
Tab. 4 Analysis of success rate of seedling test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
A	71.54	1	71.54	17.70	0.000 9 **
B	36.05	1	36.05	8.92	0.009 **
C	52.50	1	52.50	12.99	0.003 **
D	36.75	1	36.75	9.09	0.009 **
AB	53.29	1	53.29	13.19	0.003 **
AC	39.69	1	39.69	9.82	0.007 **
AD	1.10	1	1.10	0.27	0.61
BC	69.72	1	69.72	17.25	0.001 **
BD	9.92	1	9.92	2.46	0.14
CD	4.41	1	4.41	1.09	0.31
A ²	27.97	1	27.97	6.92	0.02 *
B ²	28.31	1	28.31	7.01	0.02 *
C ²	27.97	1	27.97	6.92	0.02 *
D ²	85.90	1	85.90	21.26	0.000 4 **
模型	490.57	14	35.04	8.67	0.000 1 **
失拟	34.31	10	3.43	0.62	0.76
残差	56.57	14	4.04		
误差	22.27	4	5.57		
总和	547.14	28			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$), * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

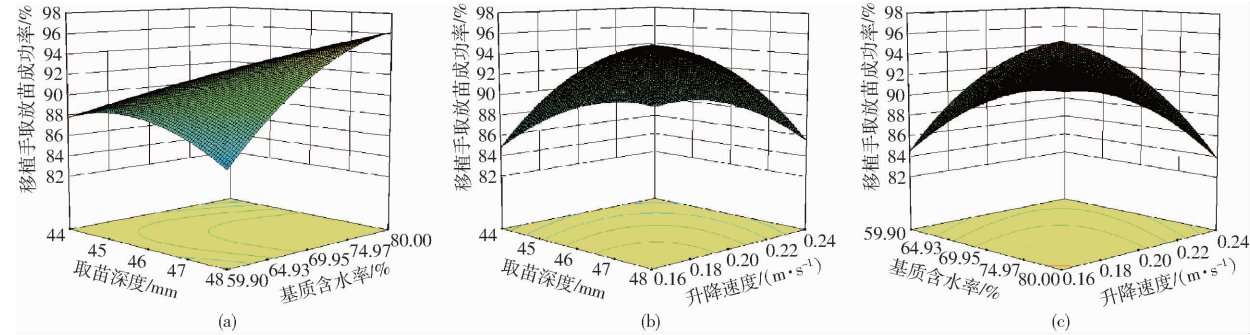


图 11 各因素对移植部件取放苗成功率的影响

Fig. 11 Effects of interactive factors on success rate

以移植部件最大取放苗成功率和表 2 中 4 个影响因素范围为约束条件,建立移植部件参数组合优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \\ -1 \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

综合考虑移栽效率,在对取放苗成功率影响不大的情况下,选择最优升降速度和水平横移速度。通过试验对比,得出最佳参数组合为:取苗深度 48 mm、基质含水率 69.9%、升降速度 0.24 m/s 和水平横移速度 0.35 m/s。图 12 为优化试验后的成

A、B、C、D、AB、AC、BC、D²,影响显著的为 A²、B²、C²,对移植部件取放苗成功率分析结果进行 F 检验,剔除不显著项 ($P > 0.05$),得到二次回归方程为

$$Y_1 = 92.52 + 2.44A + 1.73B - 2.09C - 1.75D + 3.65AB - 3.15AC - 4.17BC - 2.08A^2 - 2.09B^2 - 2.08C^2 - 3.64D^2 \quad (7)$$

图 11a 为升降速度为 0.20 m/s、水平横移速度为 0.35 m/s 时,取苗深度和基质含水率对取放苗成功率的影响。取苗深度较小,基质含水率较高时,基质不易抓取,成功率较低。取苗深度较大,基质含水率较低时,基质间粘结力弱,基质易破损,成功率亦较低。取苗深度和基质含水率最大时,成功率最高。

图 11b 为基质含水率为 69.9%、水平横移速度为 0.35 m/s 时,取苗深度和升降速度对取放苗成功率的影响。取苗深度一定时,成功率随升降速度增大而减小;升降速度一定时,成功率随取苗深度增大而增大。

图 11c 为取苗深度为 46 mm、水平横移速度为 0.35 m/s 时,基质含水率和升降速度对取放苗成功率的影响。基质含水率一定时,成功率随升降速度增大而减小;升降速度一定时,成功率随基质含水率增大而增大。

排移植手移栽作业过程。最佳参数组合时取放苗成功率为 97.9%,效率为 10 322 株/h。



图 12 成排移植手移栽作业过程

Fig. 12 Transplanting operation with optimum parameter combination

4 结论

- (1)根据穴盘钵苗移栽作业要求,设计了一种成排取苗移植手部件,可自动完成取苗、放苗作业环节。
- (2)设计了一种爪片插入式取苗移植手,并进行设计分析与刚柔耦合仿真,验证了移植手伸出抓取穴盘钵苗的轨迹符合使用要求。
- (3)以取苗深度、基质含水率、升降速度和水平

横移速度为试验因素,以取放苗成功率为试验指标,进行四因素三水平正交试验,并对结果进行分析和优化。影响成功率的因素主次顺序为取苗深度、基质含水率、升降速度和水平横移速度。对移植部件相关参数进行试验,得到最佳参数组合为取苗深度48 mm、基质含水率69.9%、升降速度0.24 m/s、水平横移速度0.35 m/s,最佳参数组合时取放苗成功率为97.9%,效率为10 322株/h,满足高速、高效移栽要求。

参 考 文 献

[1] 辜松,杨艳丽,张跃峰,等. 荷兰蔬菜水培叶菜苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报,2013,29(14):185-194.
GU Song, YANG Yanli, ZHANG Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 185-194. (in Chinese)

[2] 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)

[3] KHADATKAR A, MATHUR S M, GAIKWAD B B. Automation in transplanting: a smart way of vegetable cultivation[J]. Current Science, 2018,115(10):1884-1892.

[4] KUTZ L J. Robotic transplanting of bedding plants: simulation and validation[D]. West Lafayette: Purdue University,1985.

[5] KUTZ L J, MILES G E, HAMMER P A, et al. Robotic transplanting of bedding plants[J]. Transactions of the ASAE,1987,30(3):586-590.

[6] 崔源煥,土肥誠,石束宣明. レタンキューブ育苗方式を用いた幼苗の鉢上げ・移植ロボット[J]. 農業機械学会誌,2004,66(2):76-84.

[7] HEON H, FRED E S. A robotic pepper transplanter[J]. Applied Engineering in Agriculture,1986,2(1):2-5.

[8] TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J. Robot workcell for transplanting of seedlings part I—layout and materials flow[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3):1005-1010.

[9] TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J, et al. Robot workcell for transplanting of seedlings part II—end-effector development[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3):1013-1017.

[10] YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Applied Engineering in Agriculture,1991,7(4):493-498.

[11] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.

[12] VIKAS P, HIFJUR R, 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,2021,5:1-12.

[13] 周婷,汪小岳,王超群,等. 温室穴盘苗移栽机的设计与仿真分析[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):121-124.
ZHOU Ting, WANG Xiaochan, WANG Chaoqun, et al. Design and simulation analysis of greenhouse cavity tray seedling transplanter[J]. Mechanical Design and Research,2009,25(2):121-124. (in Chinese)

[14] 周婷. 温室穴盘苗移栽机的设计及试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2009.
ZHOU Ting. Design and experimental research of greenhouse cavity tray seedling transplanting machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):104-114,122.
CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xinting, et al. Design and experiments of a cylindrical cam-based end-effector with adjustable plant spacing for seedling picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):104-114,122. (in Chinese)

[18] <https://www.visser.eu/plug-transplanters/pic-o-mat-bl/>[EB/OL].

- [19] <https://www.urbinati.com/en/product/wireless-transplanter-rw64> [EB/OL].
- [20] TIAN Subo, LI C Q, NAOSHI K, et al. Development of automatic transplanter for plug seedling[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 79–82.
- [21] 严蕾, 毛罕平, 韩绿化, 等. 穴盘苗温室多末端移栽机运动定位装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 83–87.
YAN Lei, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Design and experiment of motion positioning device of multi-end transplanter in greenhouse for cavity tray seedlings[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 83–87. (in Chinese)
- [22] 胡建平, 张晨迪, 王留柱, 等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 149–154.
HU Jianping, ZHANG Chendi, WANG Liuzhu, et al. Design and experiment on automatic greenhouse seedling transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 149–154. (in Chinese)
- [23] 黎波, 辜松, 初麒, 等. 椰糠培育叶菜水培叶菜苗移植机械手设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 18–24.
LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 18–24. (in Chinese)
- [24] LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Development of transplanting manipulator for hydroponic leafy vegetables[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 38–44.
- [25] 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): 95–102.
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 seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 95–102. (in Chinese)
- [26] 孟青新. 水培叶菜水培叶菜苗变间距移植装备设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
MENG Qingxin. Design and experiment of variable spacing transplanting equipment for hydroponic leafy vegetable seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 吴晓, 张晓忠. 材料力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018.
- [29] 韦康成. 穴盘苗夹持装置综合性能指标研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
WEI Kangcheng. Study on the comprehensive performance index of transplanting grippers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [30] 金诚谦, 李庆伦, 倪有亮, 等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 26–34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experiment of double outlet multi-duct cleaning operation of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26–34. (in Chinese)

(上接第 58 页)

- [20] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 基于 DEM-MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91–104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91–104. (in Chinese)
- [21] 魏楷峰. 基于 DEM-MBD 双向耦合的履带车辆松软地面转向阻力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WEI Kaifeng. Research on steering resistance of tracked vehicle on soft ground based on DEM-MBD simulation[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [22] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49–56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49–56. (in Chinese)
- [23] 周华, 李栋, 刘政源, 等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69–77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69–77. (in Chinese)
- [24] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.
- [25] ZHAO L, ZHOU H, XU L, et al. Parameter calibration of coconut bran substrate simulation model based on discrete element and response surface methodology[J]. Powder Technology, 2022, 395: 183–194.