

无纺布容器苗自动换钵移盆二次移栽机设计与试验

王寒松¹ 杨自栋^{1,2} 韩党威¹ 姚自立¹ 陈佳峰³

(1. 浙江农林大学光机电工程学院, 杭州 311300;

2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 311300;

3. 杭州赛得林智能装备有限公司, 杭州 311400)

摘要: 针对无纺布容器苗在换钵移盆过程中存在的基质填充不完善导致根系过浅裸露, 移栽机自动化程度过低导致移栽效率过慢等现象, 设计了一种基于无纺布容器苗的全自动二次移栽机。对柔性机械爪的关键部件进行参数设计以及受力分析, 结合 RecurDyn 刚柔耦合仿真对移栽机械臂运动状态进行优化设计, 通过运动学分析进行优化。综合考虑影响移栽成功率的关键因素, 确定以二次填土作用力率、苗体基质含水率、夹取针间距为试验因素, 以 60 穴香榧幼苗为试验对象, 通过正交试验确定最佳工作参数。试验结果表明: 当二次填土机构作用力率为 83.51%、夹取针间距为 19.66 mm、苗体基质含水率为 33.45% 时, 移栽成功率为 95.29%, 与验证性试验的 95.33% 基本一致, 满足高速、高效移栽要求, 为林木无纺布容器苗二次移栽领域提供参考。

关键词: 无纺布容器苗; 移栽机械臂; 柔性机械爪; 刚柔耦合

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0084-09

Design and Experiment of Automatic Bowl Changing and Pot Shifting Secondary Transplanting Machine for Non-woven Container Seedlings

WANG Hansong¹ YANG Zidong^{1,2} HAN Dangwei¹ YAO Zili¹ CHEN Jiafeng³
(1. College of Optical and Mechanical Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China
2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 311300, China
3. Hangzhou Sedlin Intelligent Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311400, China)

Abstract: Aiming at the phenomena of imperfect filling of substrate leading to shallow and exposed root system during potting and transplanting of non-woven containers, and slow transplanting efficiency due to low automation degree of transplanting machine, a fully automated secondary transplanting device based on non-woven containers was designed in combination with the growth characteristics of young forest seedlings. The mechanical claw installed on the transplanting arm realized XYZ three-dimensional space transplanting operation without dead angle, and the transplanting efficiency was improved by alternately picking up seedlings through the two-way assembly line platform. Through the design and force analysis of the key components of flexible gripper, the influence of deformation coefficients of seedling substrate under different gripper pin spacings was explored, and the motion state of transplanting arm was optimized through kinematic analysis by combining the RecurDyn rigid-flexible coupling simulation. Considering the key factors affecting the success rate of transplanting, the secondary filling force rate, moisture content of seedling substrate and clamping pin spacing were determined as the test factors. Taking 60-pin capillary seedlings as the test object, the relevant parameters were derived from a one-factor test, and a multifactor orthogonal test was conducted to determine the optimal operating parameters of the automatic secondary transplanting device for non-woven container seedlings. The test results showed that when the force rate of the secondary filling mechanism was 83.51%, the needle spacing was 19.66 mm, and the water content of the seedling substrate was 33.45%, the transplanting success rate was 95.29%, which was basically

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 浙江省尖兵领雁计划项目(2022C02042)

作者简介: 王寒松(1997—),男,硕士生,主要从事智能农林装备及信息化技术研究, E-mail: 573415637@qq.com

通信作者: 杨自栋(1970—),男,教授,博士,主要从事智能农林装备及信息化技术研究, E-mail: yzd66@126.com

the same as the results of validation test (95.33%), and the requirements of high-speed and high-efficiency transplanting were met, which provided a reference for the field of secondary transplanting of non-woven containerized seedling in forest trees.

Key words: non-woven container seedlings; transplanting robot arm; flexible mechanical jaws; rigid-flexible coupling

0 引言

目前浙江省的造林经济树种主要有山核桃、香榧、楠木、喜树以及樟树等^[1],在育苗阶段主要使用无纺布育苗袋进行幼苗培育,相对于传统的育苗容器,无纺布育苗袋培育的幼苗减少了窝根、偏根、稀根以及弱根等营养不良的现象^[2]。但随着林木幼苗的成长,需要将无纺布育苗袋移栽至填充基质的软塑营养钵之中,以此来保证林木幼苗更好的成长。但是目前林木幼苗的移栽过程中存在人工作业劳动强度大、成本支出费用高、移栽质量难以保证等问题^[3]。因此,市场对于自动化程度高、性能可靠且性价比高的移栽机构需求与日俱增,为无纺布容器苗的移栽生产提供技术条件^[4-8]。

目前国外对于移栽机的研究较为成熟,其中 KUTZ 等^[9]基于 Puma560 机械臂设计制造了苗圃移栽机器人,可以将 96 穴穴盘苗移栽至 36 穴的育苗营养生长盘之中;TING 等^[10]采用视觉传感器检测移栽穴苗的位置,力度传感器检测取苗器移栽的力度大小,防止出现穴盘苗的移栽损伤情况,提高了移栽成功率;澳大利亚的 Transplant Systems 公司研制出一款 XT616 型移栽机,其设计的机械臂可以采用不同规格移栽手爪替换使用,满足不同植物幼苗的移栽作业,另外该机器采用了 PLC 控制系统,用户可以根据使用需求进行程序编写,保证移栽机的使用可靠性^[11]。国外对于移栽机的现阶段研究主要以全自动化为发展方向,所以设计的机器普遍存在结构复杂、价格高且后续的维修保养繁琐,与我国的育苗技术不配套等问题^[12-15]。

近年来,我国学者对移栽机进行了深入的研究,其中郁玉峰等^[16]设计了一款移栽机器人,其主要特点是拥有 3 个末端取苗器可以同时进行移栽工作,但整体设计结果过于庞大,移栽效率不高;张丽华等^[17]设计一款多功能移栽机,通过两条并列传送带同时传输穴盘苗与花盆,实现不同规格穴盘苗的移栽工作;冯青春等^[18]通过设计视觉传感器检测幼苗的生长情况,在移栽的过程中对生长不合格的幼苗进行剔除,提高了移栽的成功率;韩绿化等^[19]改进了末端取苗器的设计结构,采用两指四针式结构,提高了夹持苗坨的稳定性。

目前我国对于移栽机的研发还处于初期阶段,其中研制的移栽机的移栽精度、移栽成功率都有提升的空间。因此针对林木无纺布容器幼苗钵换盆中存在的基质填充不完善所导致的根系过浅以及移栽机自动化程度过低所导致的移栽效率不高等现象,本文通过设计一款基于无纺布容器苗二次移栽机,以期实现林木幼苗的全自动移栽工作,提高移栽效率,解决根系裸露问题^[20-23]。

1 整机结构与工作原理

本文设计的基于无纺布容器苗二次移栽机主要包括花盆输送带机构、转盘机构、剥离机构、回收上土机构、移栽机械臂、出料输送带机构等。图 1 所示为设计的移栽机结构示意图,其设计的移栽效率预计可以达到 5 000 株/h。

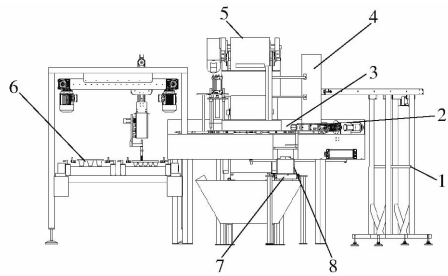


图 1 无纺布容器苗二次移栽机结构示意图
Fig. 1 Schematic of structure of non-woven container seedling secondary transplanting machine

- 1. 花盆输送带机构 2. 剥离机构 3. 转盘机构 4. 花盆导体
- 5. 回收上土机构 6. 移栽机械臂 7. 出料输送带机构 8. 花盆导下管

无纺布容器苗二次移栽机控制系统主要采用 PLC 控制,通过控制移栽机上所安装的传感器完成气缸伸缩运动以及电机的启动停止、正反转运动等,以此实现无纺布容器苗移栽自动化,保证移栽的精度以及成功率,实现无纺布容器苗移栽的机械化作。其基本工作过程为:花盆输送带机构、转盘机构、剥离机构、回收上土机构等完成花盆的输送、剥离、填土、冲压工作;移栽机械臂通过电机以及气缸驱动皮带以及齿轮齿条传动机构完成取苗、栽苗工作;完成移栽工作后通过转盘机构中的二次填土装置进行泥土基质的巩固,提高移栽的成功率。本次设计的二次填土机构主要采用曲柄滑块凸轮机构,其作用力大小与偏心距、偏心角有关,其运动角度范

围为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$,力的变化趋势符合正弦函数结构。因此需要保证二次填土机构在使用时处于最佳角度范围,保证足够的作用力。

相对于传统的移栽机,通过机械臂代替人工进行插苗工作,减少了劳动成本,并且对移栽幼苗进行二次填土,减少林木幼苗根系过浅、倾斜等现象,从而影响林木幼苗的成活率。二次移栽机主要用于无纺布容器苗育种作业,其移栽使用的苗钵码盘以及软塑营养钵的结构如图2所示。

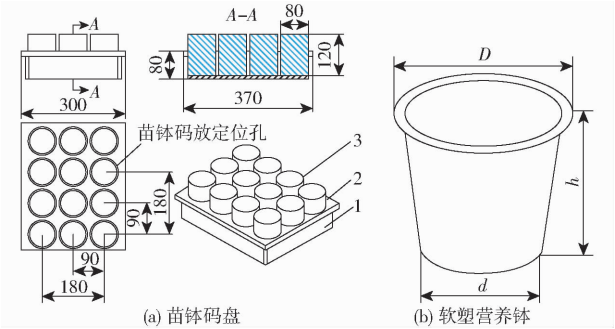


图2 育苗穴盘以及软塑营养钵结构示意图
Fig.2 Schematics of seedling hole tray and soft plastic flower pot structure

1. 育苗平盘 2. 镀锌盖板 3. 无纺布苗钵

使用的软塑营养钵尺寸为 $130\text{ mm}\times 97\text{ mm}\times 116\text{ mm}^{[24]}$,苗钵码盘使用规格为12孔 $(3\times 4)^{[25]}$,其苗钵码盘规格参数包括:钵体高度120 mm,钵体孔径80 mm,孔深120 mm,穴孔中心距90 mm以及穴盘尺寸 $370\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 。

2 移栽机械臂结构与优化

2.1 移栽机械臂结构组成

设计的移栽机械臂采用龙门结构,主要包括步进电机、同步带、铝材外机架、流水线导轨、限位杆、XYZ轴导轨以及柔性机械爪等零部件,其结构如图3所示。移栽机械臂上安装4个柔性机械爪,主要安装在X轴导轨上的滑板上,滑板通过步进电机驱动齿轮齿条机构在X轴导轨完成X方向的移动,最后每个柔性机械爪都搭配独立的气缸,在气缸的驱动下,实现无纺布容器苗的全自动化抓取移栽。

移栽机械臂的Y轴导轨安装在外机架的顶部,凹槽板套装在Y轴导轨之上,完成Y方向的移动;Z方向主要是Z轴导轨安装在滑块之上,滑块安装在凹槽板之上,完成Z方向的移动。Y、Z方向的移动主要依靠外机架顶部安装的两个步进电机,当其中一个电机提供动力时,通过单向拉紧第三胶带连接两侧的滚动轮、主动轮、滚轮,带动凹槽板在Y轴导轨上实现前后运动;当两个电机同时提供动力时,通过双向拉紧第三胶带连接两侧的滚动轮、主动轮、滚

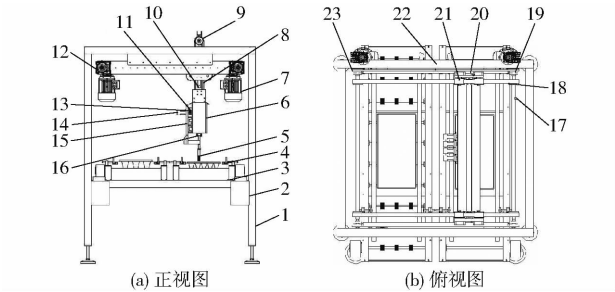


图3 移栽机械臂结构示意图

Fig.3 Schematics of transplanting robotic arm structure

1. 外机架 2. 第一伺服电机 3. 流水线平台 4. 限位杆 5. 柔性机械爪 6. 连接板 7. 第三伺服电机 8. Z轴导轨 9. 滚轮 10. 滑块 11. 齿轮齿条传动机构 12. 第四伺服电机 13. X轴导轨 14. 第五伺服电机 15. 滑板 16. 第三气缸 17. 滚动轴 18. 第三胶带 19. 第一主动轮 20. 凹槽板 21. 滚动轮 22. Y轴导轨 23. 第二主动轮

轮,带动滑块在Z轴导轨上实现上下运动,因此实现移栽机械臂的三维空间的移动。移栽机械臂抓取无纺布容器苗过程是苗钵码盘通过流水线平台进行传递,设计的流水线平台呈对称形式,保证码盘可以交替进行运输移栽,增强移栽效率。在运输过程中通过位移传感器到达指定位置,限位杆则夹紧穴盘防止其继续前进,机械臂通过移动到达穴盘苗上方。气缸控制柔性机械爪进行无纺布袋苗的抓取,通过将夹取针插入苗体并提起来,到达软塑营养钵位置将其放入到冲压的穴孔中。

2.2 柔性机械爪结构与受力分析

柔性机械爪在进行无纺布容器苗抓取过程中需要保证末端的夹取针具备一定的刚性,保证苗体可以顺利夹起,又要对其进行一定的弹性设计,保证苗体不会被夹取力度破坏。本次设计的柔性机械爪由4根夹取针、固定板以及气缸等零件所组成,其结构如图4a所示。在夹取钵苗的过程中,气缸推动连接件将夹取针以一定的角度插入到苗坨之中,然后以角度 α 进行夹取,苗体在夹取过程中的受力分析如图4b所示。

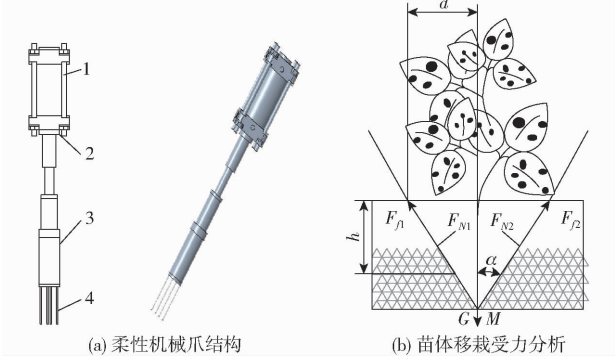


图4 柔性机械爪结构和苗体移栽受力分析

Fig.4 Transplanting force analysis

1. 气缸 2. 固定板 3. 气缸与夹取针的连接件 4. 夹取针

图 4b 中, d 为夹取针在移栽苗体时与幼苗中心的距离, h 为夹取针插入苗体基质中的深度, α 为夹持角。本次设计的柔性机械爪具备 4 个夹取针, 设计结构为对称形式。

当夹取针插入到苗体基质中时, 夹取针与基质之间产生的摩擦力 F_{f1} 、 F_{f2} 与夹持力 F_{N1} 、 F_{N2} 关系为

$$F_{f1} = F_{f2} = \mu F_{N1} = \mu F_{N2} \quad (1)$$

式中 μ ——夹取针与基质之间摩擦因数

在夹取针将无纺布容器苗从码盘上提起时, 夹取针需要克服的力 F_A 主要包括钵苗的重力 G 以及苗体从穴盘离开时的阻力 M , 因此此时的受力公式为

$$F_A = G + M = 2[(F_{f1} + F_{f2}) \cos \alpha + (F_{N1} + F_{N2}) \sin \alpha] \quad (2)$$

通过式(2)可以得知, 本次移栽工作中需要克服的力 F_A 主要受夹持力 F_N 、摩擦因数 μ 以及夹持角 α 的影响。其中夹持力 F_N 与基质之间的关系公式为

$$F_N = \sigma A_N \quad (3)$$

$$\text{其中 } \sigma = \frac{F}{A_y} \quad (4)$$

式中 σ ——基质的抗压强度, Pa

A_N ——夹取针与基质的接触面积, mm^2

F ——基质抗压力, N

A_y ——基质在受到挤压时的压缩面积, mm^2

本次移栽的林木幼苗为香榧幼苗, 对使用的 12 (3×4) 穴盘香榧幼苗进行含水率检测, 结果为 36%, 对幼苗进行拉拔试验, 得出香榧幼苗的平均拉力为 3 N。因此集合上述的公式, 建立穴盘苗基质抗压力 F 与变形量 x 非线性曲面, 其关系式为

$$F = 0.0573x^3 - 0.6105x^2 + 3.082x - 0.2731 \quad (5)$$

将公式(1)~(5)进行整合, 得到

$$F_A = \frac{4FA_N(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{A_y} \quad (6)$$

通过公式(6)可以得知, 本次设计的柔性机械爪在进行无纺布容器苗移栽的工作中拉拔力 F_A 主要与摩擦因数 μ 、夹持角 α 、夹取针接触面积 A_N 以及基质的压缩面积 A_y 有关。因此在进行夹持力设计时需要注意基质的抗压变形系数, 防止出现夹持力过大导致基质松散脱落的现象。在进行无纺布容器苗移栽的过程中, 其基质的变形系数主要与设计的柔性机械爪末端的夹取针间隙有关, 因此使用 SolidWorks Motion 研究不同间距的夹取针的运动轨迹, 由于基质受到夹取针的压力, 导致内部出现压缩现象, 所以压应力为负值, 如图 5 所示。

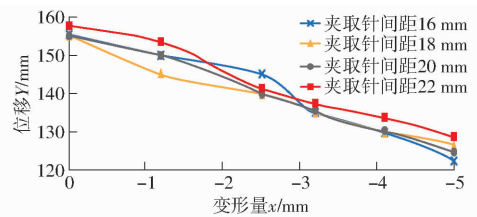


图 5 苗体基质变形量变化曲线

Fig. 5 Change curves of seedling substrate deformation

通过图 5 可以得知, 当柔性机械爪所安装的夹取针间距为 20 mm 时, 无纺布袋苗所填充的基质变形量最小, 避免了基质太少脱落以及太多难以移栽的现象。因此选取夹取针的间距在 20 mm 左右, 提高移栽效率。

2.3 柔性机械爪运动状态优化设计

柔性机械爪的移栽运动轨迹是移栽机械臂的设计关键, 移栽运动轨迹如图 6 所示: AB 阶段轨迹是柔性机械爪插入到苗钵码盘中的无纺布袋苗基质内进行夹紧; BC 阶段轨迹是柔性机械爪进行提取离开码盘; CD 阶段轨迹是将苗体进行高度提升, 防止苗体底部碰到其余苗体端部; DE 阶段轨迹是将苗体移栽至转动机构上的软塑营养钵内; EF 阶段轨迹是完成移栽工作后, 柔性机械爪回到等待移栽的无纺布容器苗正上方; FA 阶段轨迹是回到开始的取苗位置, 开启下一阶段的移栽取苗动作。

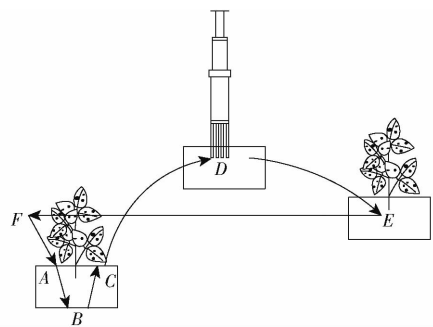


图 6 移栽运动轨迹

Fig. 6 Transplanting movement trajectory

通过图 6 可知, 移栽机械臂在进行移栽作业时由于使用同步带进行无纺布容器苗的动力传输, 因此在 CDE 阶段中若是机械臂瞬间加速度过快出现振动, 将会导致苗体在空中出现脱落现象或者影响其在软塑营养钵中的移栽精度。产生这一现象则是因为同步带在动力传输中存在多边形效应, 带与带轮之间的理论接触情况与实际接触情况存在差异性。

使用 RecurDyn 软件建立移栽机械臂的刚柔耦合仿真模型, 通过对机械臂机构在移栽过程中所使用的运动学规律进行讨论。本次的运动学分析将取苗过程中的垂直运动、水平运动都考虑进去, 将等加速等减速运动规律 (IF 函数实现)、三次多项式运动

规律 (STEP 函数实现) 以及五次多项式运动规律 (STEP5 函数实现) 作为移栽机构的运动规律进行动力学仿真分析。

等加速等减速运动规律模型为

$$\begin{cases} s = m_0 + \frac{1}{2}m_1t^2 \\ v = m_1t \\ a = m_1 \end{cases} \quad (7)$$

三次多项式运动规律模型为

$$\begin{cases} s = m_0 + m_1t + m_2t^2 + m_3t^3 \\ v = m_1 + 2m_2t + 3m_3t^2 \\ a = 2m_2 + 6m_3t \end{cases} \quad (8)$$

五次多项式运动规律模型为

$$\begin{cases} s = m_0 + m_1t + m_2t^2 + m_3t^3 + m_4t^4 + m_5t^5 \\ v = m_1 + 2m_2t + 3m_3t^2 + 4m_4t^3 + 5m_5t^4 \\ a = 2m_2 + 6m_3t + 12m_4t^2 + 20m_5t^3 \end{cases} \quad (9)$$

式中 s ——位移, m v ——速度, m/s
 a ——加速度, m/s²
 t ——时间, s

$m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ ——系数

本次设计的移栽机械臂水平方向最大运动距离为 1 m, 垂直方向最大运动距离为 200 cm, 分别使用 IF 函数、STEP 函数以及 STEP5 函数作为实现运动的驱动函数, 对机械臂移栽无纺布容器苗的运动轨迹进行仿真分析。本次设计的同步带轮节圆直径为 44.56 mm, 所以在移栽工作时, 当机械臂水平移动位移 $s = 1$ m, 则同步带轮旋转角 θ 为 $\frac{360s}{\pi d_0}$, 计算得带轮旋转角 θ 为 2 571.6°。本次设计移栽机械臂取苗周期为 4 s, 其中单向水平运动时间为 0.8 s, 垂直运动时间为 0.4 s, 夹取袋苗及植苗停留时间为 0.1 s。水平方向的运动规律主要由等加速等减速运动规律、三次多项式运动规律以及五次多项式运动规律组成。

其中等加速等减速运动规律函数为

IF (time - 1: 0, 4 456.70 d, IF (time - 1.4: 4 456.70 d, 4 456.70 d, IF (time - 1.8: -4 456.70 d, -4 456.70 d, IF (time - 2.8: 0, 0, IF (time - 3.2: -4 456.70 d, -4 456.70 d, IF (time - 3.6: 4 456.70 d, 4 456.70 d, 0))))))

三次多项式运动规律函数为

STEP (time, 1.0, 0, 1.8, -2 571.6, d) + STEP (time, 2.8, 0, 3.6, 2 571.6, d)

五次多项式运动规律函数为

STEP5 (time, 1.0, 0, 1.8, -2 571.6, d) + STEP5 (time, 2.8, 0, 3.6, 2 571.6, d)

垂直方向的运动规律主要由三次多项式运动规律函数组成

STEP (time, 0, 0, 0.4, -200) + STEP (time, 0.5, 0, 9, 200) + STEP (time, 1.9, 0, 2.3, -200) + STEP (time, 2.4, 0, 2.8, 200)

将上面的运动驱动函数添加至移栽机械臂的刚柔耦合性模型之中, 如图 7 所示, 进行运动学仿真模拟分析, 以柔性机械爪的夹取针末端作为标记点, 生成 3 种运动规律的速度曲线以及加速度曲线, 如图 8 所示。

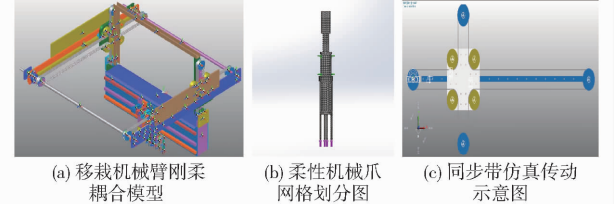


图 7 移栽机械臂仿真

Fig. 7 Simulation diagrams of transplanting robot arm

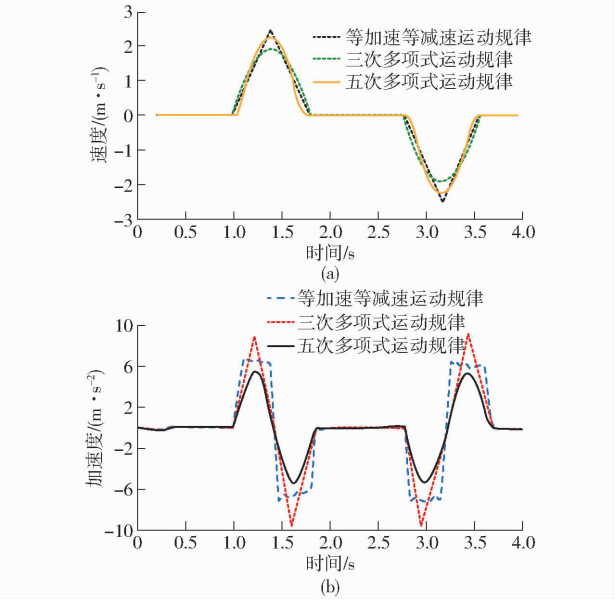


图 8 移栽机械臂仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of transplanting robot arm

通过图 8 可知, 3 种运动规律的速度曲线以及加速度曲线呈现不同的状态。由图 8a 可知, 等加速等减速运动规律最大移动速度可以达 2.53 m/s, 三次多项式运动规律最大移动速度可以达到 1.92 m/s, 五次多项式运动规律最大移动速度可以达到 2.31 m/s。由图 8b 可知, 等加速等减速运动规律最大加速度可以达到 6.43 m/s², 三次多项式运动规律最大加速度可以达到 9.38 m/s², 五次多项式运动规律最大加速度可以达到 5.61 m/s²。为了避免在移栽过程中出现振动场景, 则需要选择位移速度较快且加速度较小的运动规律函数驱动移栽机械臂的运行。因此本次设计的移栽机械臂采用五次多项式运

动规律,保证移栽平台的速度、加速度以及减速度处于较为平稳的运行状态,可以有效提高机械臂的移栽精度以及稳定性。

3 样机试验

3.1 试验条件

选取苗钵码盘型号为 3×4 的香榧幼苗作为本次试验对象,按照试验规定条件以及试验需求对苗钵码盘进行管理。试验样机如图 9 所示。



图 9 试验样机
Fig.9 Test prototype

3.2 试验因素与指标

本次试验因素主要包括二次填土机构作用力、无纺布容器苗基质含水率以及夹取针间距。其中二次填土机构作用力对幼苗根系的发育影响较大,当二次填土机构作用力不足时,基质进入软塑营养钵则会减少,容易导致在后续的生长中出现根系过浅的情况,影响移栽效果;袋苗基质含水率对基质的抗压能力有影响,其中含水率过高,则会导致基质抗压能力弱,影响柔性机械爪的移栽取苗过程,若是含水率过低,则会导致基质过于坚硬,不利于林木幼苗的生长;若是夹取针之间的间距太小则会使得夹取针之间出现互相干扰,影响导致移栽中所夹取的基质太少,出现中途脱落的现象;若是间距太大则会导致移栽工作完成后无法及时脱落,影响移栽整体效率。

选择试验指标为移栽成功率,移栽成功的标准是将无纺布容器苗从苗钵码盘中夹取出来,保证整体的完整性,准确移栽至软塑营养钵之中。移栽成功率 η 计算公式为

$$\eta = \frac{W - M - N - V}{W} \times 100\%$$

(10)

- 式中
- W——试验幼苗总株数

M——夹取困难株数

N——无纺布破裂基质松散株数

V——未移栽至软塑营养钵株数

3.3 多因素试验

选取香榧幼苗作为试验对象,根据机器的实际

情况,二次填土机构作用力率根据正弦函数计算公式将力分别设置成 80%、90%、100%,可以避免出现作用力不足的现象;对应无纺布容器苗基质含水率为 25%、35%、45%,可以避免出现苗体夹取困难或者因为水分较少导致无纺布容器苗存活率低的现象;对应夹取针间距为 18、20、22 mm,可以避免出现夹取脱落或者夹取力过大的现象。

基于单因素试验分析结果,为获取无纺布容器移栽机较优工作参数组合,试验以二次填土机构作用力率、夹取针间距、苗体基质含水率为试验因素,以移栽成功率 Y 为评价指标,使用 Design-Expert 13 软件进行三因素两次回归正交组合试验。根据单因素试验结果,设置因素编码如表 1 所示,试验方案与结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值,方差分析如表 3 所示。

表 1 因素编码
Tab.1 Factors and codings

编码	因素		
	二次填土机构 作用力率/%	夹取针间距/ mm	苗体基质含 水率/%
-1	80	18	25
0	90	20	35
1	100	22	45

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Experimental scheme and results

试验序号	因素			成功率 Y/%
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	90.92
2	1	-1	0	91.16
3	0	0	0	95.03
4	-1	0	-1	90.38
5	1	0	-1	86.55
6	0	0	0	94.17
7	0	1	1	87.90
8	0	-1	-1	82.60
9	0	0	0	96.18
10	0	-1	1	87.15
11	0	1	-1	87.90
12	1	1	0	93.16
13	-1	1	0	92.40
14	-1	0	1	87.85
15	0	0	0	95.05
16	0	0	0	95.09
17	1	0	1	91.16

根据表 2 的试验数据,通过 Design-Expert 13 软件得到移栽成功率 Y 的回归方程为

$$Y = 95.10 - 0.06X_1 - 1.02X_2 - X_3 + 1.79X_1X_2 + 0.13X_1X_3 - 1.14X_2X_3 - 0.2983X_1^2 - 5.82X_2^2 - 2.90X_3^2$$

(11)

表 3 方差分析
Tab.3 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	222.88	9	24.76	39.04	<0.000 1**
X_1	0.028 8	1	0.028 8	0.045 4	0.837 3
X_2	8.26	1	8.26	13.02	0.008 6**
X_3	8.06	1	8.06	12.71	0.009 2**
X_1X_2	12.74	1	12.74	20.09	0.002 9**
X_1X_3	0.067 6	1	0.067 6	0.106 6	0.753 6
X_2X_3	5.18	1	5.18	8.16	0.024 5*
X_1^2	0.374 5	1	0.374 5	0.590 4	0.467 4
X_2^2	142.66	1	142.66	224.89	<0.000 1**
X_3^2	35.31	1	35.31	55.65	0.000 1**

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

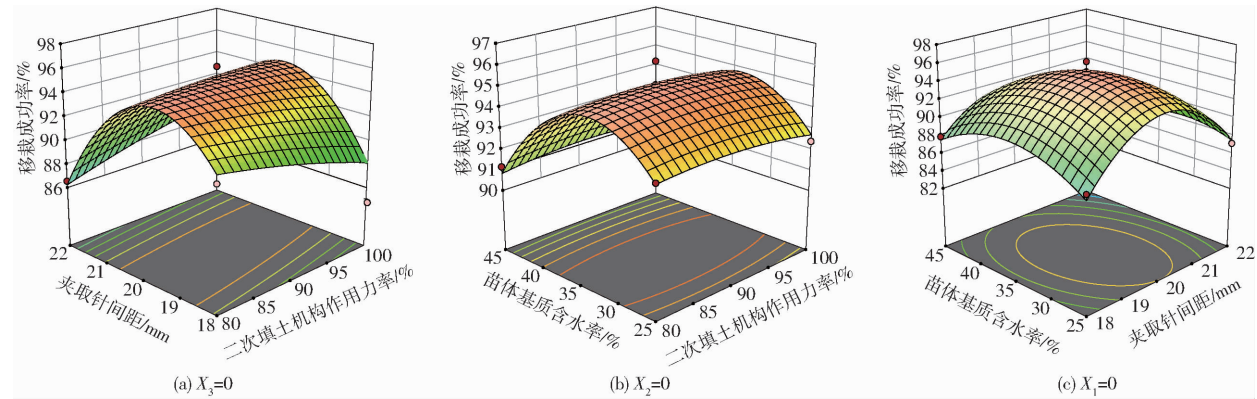


图 10 移栽成功率响应曲面
Fig.10 Response surfaces for transplanting success

与夹取针间距之间直接存在交互作用,对移栽成功率有显著的影响。由图 10a 可知,当夹取针间距为定值时,移栽成功率随着二次填土机构作用力率的增加先增加后减小;当二次填土机构作用力率为定值时,移栽成功率随着夹取针间距的增加先增加后减小,夹取针间距的变化区间较大且对移栽成功率影响更为显著。由图 10b 可知,当苗体基质含水率为定值时,移栽成功率随着二次填土机构作用力率的增加先增加后减小;当二次填土机构作用力率为定值时,移栽成功率随着苗体基质含水率的增加先增加后减小,苗体基质含水率的变化区间较大且对移栽成功率影响更为显著。由图 10c 可知,当苗体基质含水率为定值时,移栽成功率随着夹取针间距的增加先增加后减小;当夹取针间距为定值时,移栽成功率随着苗体基质含水率的增加先增加后减小,夹取针间距的变化区间较大且对移栽成功率影响更为显著。因此可以得知,移栽成功率指标影响显著性由大到小为:夹取针间距、苗体基质含水率、二次填土机构作用力率。

根据无纺布容器苗移栽机械机的设计要求,以移栽成功率为目标函数,求二次填土机构作用力率、夹取针间距、苗体基质含水率的最佳组合,目标函数

对回归模型进行显著分析表明,在 $\alpha = 0.05^\circ$ 之下,由方差分析结果可以得知,回归模型 $P < 0.000 1$,说明设计的回归方程极显著。另外失拟项 $P = 0.328 2$,则表示该方程无失拟因素存在,表示本次设计的回归方程可以用作移栽成功率的预测。对于目标函数成功率 Y ,因素 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2^2 、 X_3^2 极显著,因素 X_2X_3 显著。影响成功率 Y 的主次因素排序为:夹取针间距 X_2 、苗体基质含水率 X_3 、二次填土机构作用力率 X_1 。其中因素交互影响的响应曲面图如图 10 所示。

根据回归方程以及响应曲面可以得知,夹取针间距与苗体基质含水率以及二次填土机构作用力率

和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y = f(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

使用 Design-Expert 13 软件进行优化求解,得到最佳参数组合:二次填土机构作用力率为 83.51%、夹取针间距为 19.66 mm、苗体基质含水率为 33.45%,在此组合下移栽成功率为 95.29%。

对优化结果进行验证性试验,利用无纺布容器苗自动移栽机进行 3 组试验,每组抓取 10 次 (60 株),得到的移栽成功率为 95%、96%、95%,平均移栽成功率为 95.33%,与预测的 95.29% 之间差距很小,表明试验分析结果与实际工作结果效果相符合。本次进行的 3 组试验所使用时间为 41.8、43.5、43.8 s,移栽效率可以达到 5 000 株/h。

4 结论

(1) 根据实际生产需求,设计了一款无纺布容器苗二次移栽机。通过对移栽取苗过程进行受力分析,得出夹取针在进行移钵换盆时其夹持力主要受夹取针与基质压缩面积的影响,保证移栽稳定性。

(2)设计了一款柔性机械爪;通过对移栽机械臂在水平以及垂直运动状态进行分析,通过刚柔耦合仿真对比不同的运动规律所产生的速度以及加速度曲线,优化了移栽机械臂的运动状态,保证移栽机的精确性以及稳定性。

(3)选取 12 穴规格的香榧幼苗作为试验对象,进行多组试验,主要包括单因素试验以及多因素正交试验,以夹取针间距、苗体基质含水率、二次填土机构作用力率为试验因素,探究无纺布容器苗自动移栽机装置最佳工作参数。通过试验表明,当二次填土机构作用力率为 83.51%、夹取针间距为 19.66 mm、苗体基质含水率为 33.45%,在此组合下移栽成功率为 95.29%。该优化结果与验证性试验的移栽成功率基本一致,表明该装置满足设计需求。

参 考 文 献

[1] 刘璨,张永亮,刘浩. 国有林场改革目标实现面临的困境及对策建议——以江西、浙江、辽宁、云南 4 省区为例[J]. 林业经济,2019,41(7):10-15.
LIU Can,ZHANG Yongliang,LIU Hao. Difficulties and policy implications for the reform of the state-owned forest farms—the case study of Jiangxi,Zhejiang,Liaoning and Yunnan Provinces[J]. Forestry Economics,2019,41(7):10-15. (in Chinese)

[2] 邵青. 林木无纺布大小容器苗间移栽机设计与研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2021.
SHAO Qing. Design and research of forest tree non-woven size container seedling inter-planting machine[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021. (in Chinese)

[3] 周婷,汪小昆,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 transplanting machine[J]. Machine Design & Research, 2009, 25(2):121-124. (in Chinese)

[4] 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. Optimization experiment of parameters for automatic potted seedling transplanting robot grasping pointer clamping seedling pile[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):8-16. (in Chinese)

[5] 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 status and outlook of transplanting machinery development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):44-53. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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 of fully automatic greenhouse pot seedling transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):149-154. (in Chinese)

[8] 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 vegetables hydroponic leafy vegetables seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021. (in Chinese)

[9] KUTZ L J, MILES G E, HAMMER P A, et al. Robotic transplanting of bedding plants[J]. American Society Agricultural Engineers,1987,30(3):586-590.

[10] TING K C, CIACOMELLI G A, SHEN S J, et al. Robot workcell for transplanting of seedlings part II end effector development [J]. American Society Agricultural Engineers,1991,33(3):1013-1018.

[11] KUMAR G, RAHEMAN H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review[J]. International Journal of Vegetable Science, 2008, 14(3):232-255.

[12] 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.

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

[14] 崔源煥,土肥誠,石束宣明. レタニキュウ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.

[15] 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 denseplanting and transplanting of vegetable pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):95-102. (in Chinese)

[16] 郁玉峰,马履中,华希俊. 并联移栽机器人视觉的研究[J]. 农机化研究,2007,29(9):33-35.
YU Yufeng, MA Lüzhong, HUA Xijun. Research on vision of parallel transplanting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(9):33-35. (in Chinese)

[17] 张丽华,邱立春,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 pointer clamping type seedling transplanting claw for cavity tray

- [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 235–237. (in Chinese)
- [18] 冯青春, 马伟, 王秀, 等. 温室智能装备系列之三十六——花卉钵苗智能移栽末端执行器设计[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2012, 32(5): 44–46.
FENG Qingchun, MA Wei, WANG Xiu, et al. Design of end-effector for intelligent transplanting of flower pot seeding in greenhouse intelligent equipment series[J]. Agricultural Engineering Technology, 2012, 32(5): 44–46. (in Chinese)
- [19] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 温室穴盘苗自动移栽机设计与实验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 59–67.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and experiment of automatic transplanting machine for greenhouse cavity tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 59–67. (in Chinese)
- [20] 赵晨希. 生菜移栽机自动喂苗装置设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
ZHAO Chenxi. Design and experimental research of automatic seedling feeding device for lettuce transplanting machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [21] 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 cavity tray seedling transplanting machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 59–66. (in Chinese)
- [22] 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): 24–29.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experiment on the physical characteristics of automatic transplanting bowl for cavity tray seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24–29. (in Chinese)
- [23] 计东, 胡熙, 哲旋瑞, 等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 126–133, 146.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linked high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126–133, 146. (in Chinese)
- [24] 王留柱. 温室钵苗移栽机机构设计与移栽动平台研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
WANG Liuzhu. Research on mechanism design and transplanting dynamic platform of greenhouse pot seedling transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [25] 叶维超. 经济林木自动化育苗生产线关键设备设计与试验研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
YE Weichao. Design and experimental research of key equipment for automated seedling production line of economic forest trees[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2023. (in Chinese)

(上接第 83 页)

- [22] 朱利元. 2CM-2 马铃薯起垄覆膜播种机的研制与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
ZHU Liyuan. Development and experiment of 2CM-2 potato ridge and film mulching planter[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [23] 包攀峰, 吴明亮, 官春云, 等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 23–31.
BAO Panfeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23–31. (in Chinese)
- [24] 陈超鹏. 双翼铧式垄沟开沟器结构设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
CHEN Chaopeng. Structural design and experimental study of double-wing moldboard-style furrow opener[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [25] 刘齐卉. 犁铧式马铃薯中耕机关键部件设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
LIU Qihui. Design and experiment of key components of ploughshare potato tiller[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] 陈新予, 史宇亮, 陈明东. 基于离散元法的甘薯起垄机旋耕刀抛土性能仿真试验[J]. 农业工程, 2021, 11(2): 117–120.
CHEN Xinyu, SHI Yuliang, CHEN Mingdong. Simulation experiment on throwing performance of rotary blade of sweet potato ridger based on discrete element method[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(2): 117–120. (in Chinese)
- [27] 杨娜, 安宗文. 起垄机起垄过程仿真及分析[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(5): 41–43.
YANG Na, AN Zongwen. Simulation and analysis on ridging process of ridging machine[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(5): 41–43. (in Chinese)
- [28] 吴亚文. 烟草起垄施肥整形一体机的设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
WU Yawen. Design and experiment of an integrated machine for tobacco ridge raising, fertilization and shaping[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [29] 王玉萍, 周晓洁, 卢潇, 等. 土壤紧实度对马铃薯根系、匍匐茎、产量和品质的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1590–1596.
WANG Yuping, ZHOU Xiaojie, LU Xiao, et al. Effect of soil compaction on root, stolon, yield and quality of potato[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1590–1596. (in Chinese)