doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.022

茄果类蔬菜立式半自动嫁接机设计与试验

周海丽[1,2]　廖荣强[1]　陈佳峰[3]　章飞杰[4]　童俊华[1,2]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018;
3.杭州赛得林智能装配有限公司,杭州 311418;4.杭州市富阳区农业技术推广中心,杭州 311400)

摘要:目前适于我国生产的蔬菜种苗高效嫁接机型较匮乏。设计了一种茄果类蔬菜立式半自动嫁接机。机器由六工位旋转工作台、同步切削、对苗上夹、回栽等关键机构组成,砧穗木在上苗工位采用上下叠层垂直布局,单人进行上苗操作后,机器自动完成切削、上夹和回栽。通过 ADAMS-ABAQUS 建立了砧穗木夹持机构的刚柔耦合模型,仿真结果表明,相较于刚性夹持,柔性夹持能有效降低对苗的夹持力,夹持力最大降幅为 84.5%。进一步开展夹持机构的三因素三水平正交优化试验,得出影响嫁接成功率最优结构参数组合为:夹持弹片厚度 0.6 mm、工作气压 0.3 MPa、弹片连接长度 10 mm;此时,嫁接机平均成功率为 97.3%,平均嫁接效率为 717 株/h,是人工嫁接效率的 2 倍,满足工厂化茄果类蔬菜育苗自动化嫁接作业需求。

关键词:茄果类蔬菜;嫁接机;立式嫁接;低损夹持;多工位

中图分类号:S233.74　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0236-09　　**OSID**:

Vertical Semi-automatic Grafting Machine Design and Test for Solanaceae Vegetables

ZHOU Haili[1,2]　LIAO Rongqiang[1]　CHEN Jiafeng[3]　ZHANG Feijie[4]　TONG Junhua[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Perception and Robotics, Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Hangzhou Sedlin Intelligent Assembly Co., Ltd., Hangzhou* 311418, *China*
4. *Hangzhou Fuyang District Agricultural Technology Extension Centre, Hangzhou* 311400, *China*)

Abstract: At present, vegetable seedling grafting labor problems highlighted, and efficient grafting model which is suitable for our production was more scarce, thus a tomato vegetable vertical semi-automatic grafting machine was innovatively designed. The machine consisted of a six-station rotary table, synchronized cutting, seedling clamping, back to planting and other key institutions, scion and rootstock seedling position by using the upper and lower stacked vertical layout, a single person can be on the anvil scion seedling, the machine can automatically complete the seedling clamping cutting, clamping and back to planting into the hole operations. The rigid-flexible coupling model of the grafted seedling flexible clamping hand was established by ADAMS - ABAQUS, and the simulation analysis showed that the designed flexible clamping mechanism can effectively reduce the stress on the clamped seedling compared with the rigid clamping, and the maximum clamping force was reduced by 84.5%, which helped to realize low-loss clamping. Further three-factor and three-level orthogonal optimization test of the clamping end was carried out, and the optimal structural combination of parameters affecting the grafting success rate of the clamping end was found to be as follows: the thickness of the clamping shrapnel was 0.6 mm, the working air pressure was 0.3 MPa, and the length of the shrapnel connection was 10 mm. At this time, the average success rate of the grafting machine was 97.3%, and the average grafting efficiency was 717 plants/h, which was twice as much as that of the manual grafting efficiency, and it can meet the requirements for the automated planting of eggplant and fruit vegetables in the factory. It met the demand for automated grafting in factory planting of eggplant and fruit vegetables.

Key words: solanaceae vegetable; grafting machine; vertical grafting; low-loss clamping; multi-station

收稿日期:2025-05-15　修回日期:2025-06-05

基金项目:中央农机研发制造推广应用一体化试点项目和浙江理工大学科研业务费专项资金项目(24242118-Y)

作者简介:周海丽(1989—),女,副教授,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,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与数字农业技术研究,E-mail:jhtong@zstu.edu.cn

0　引言

嫁接作为一种有效的种植管理方法，是减轻生物胁迫、应对环境胁迫的可行策略[1]，已在蔬菜栽培领域得到了广泛应用。目前，我国蔬菜嫁接工作主要依赖于人工完成，存在嫁接生产调度难、效率低、嫁接质量难保证、劳动强度大等问题[2-3]，严重影响了嫁接苗的供应和蔬菜嫁接育苗的规模化生产。嫁接机器人能提高种苗质量和生产效率，保障嫁接时效，市场潜力巨大，应用前景广阔[4-5]。

日本在茄果类蔬菜嫁接机研究方面起步较早，自 20 世纪 80 年代便正式开启相关研究，以井关农机株式会社研制的最为典型，研发的 GR800T 型茄果类半自动嫁接机，通过两人进行上苗操作，人均机器效率 400 株/h，成功率为 95%，但对种苗标准化程度要求较高[6]。韩国 GR－800CS 型半自动嫁接机，设计了上苗、切削及对接 3 个工位，无回栽装置，通过两人上苗，人均机器效率 400 株/h[7]，后又升级研制了 AFGR－800CS，通过机器视觉技术可实时分析切口角度偏差并反馈调整，但对弯曲种苗的切削精度提升效果有限[8]。西班牙 EMP－300 型半自动嫁接机，通过单人工手持上苗，机器操作简单，作业效率为 300 株/h[9]。荷兰 ISO 公司开发了多种蔬菜嫁接机型，最新推出的高速茄果类蔬菜嫁接机，采用机器视觉技术，并通过机械臂进行多株上苗嫁接，作业效率达 4 000 株/h，但其价格昂贵[10]。国内对嫁接机研究起步滞后，大多机型仍处于试验样机阶段[11-16]。尽管一些国外全自动嫁接机具备较高的生产能力，但其价格昂贵且对嫁接苗木的形态一致性要求苛刻，也无法适应我国种苗的育苗农艺；相比之下，半自动机型对苗木形态适应性更强，现有大多半自动嫁接机仍需依赖 2 名熟练工人持续供苗，人均机器嫁接效率为 300～500 株/h，相较于手工嫁接作业并没有显著的效率优势，经济价值也难以体现，难以满足国内育苗企业生产需求。

基于以上分析，本文设计一种茄果类蔬菜立式半自动嫁接机，采用旋转多工位布局，由一人实现砧穗木上苗，接穗与砧木在上苗位采用上下叠层垂直布局，以便接穗与砧木切削面在垂直方向精准对位，以提升嫁接作业效率；进一步开展嫁接夹持机构的夹苗性能仿真和正交优化试验，以提高机器嫁接成功率。

1　半自动立式嫁接机组成与原理

茄果类蔬菜贴接式嫁接工艺如图 1 所示，以此为基础，拆分人工贴接式嫁接流程，设计了一种由上苗工位、同步切削工位、对接上夹工位与回栽工位组成的茄果类蔬菜立式半自动嫁接机，如图 2 所示。

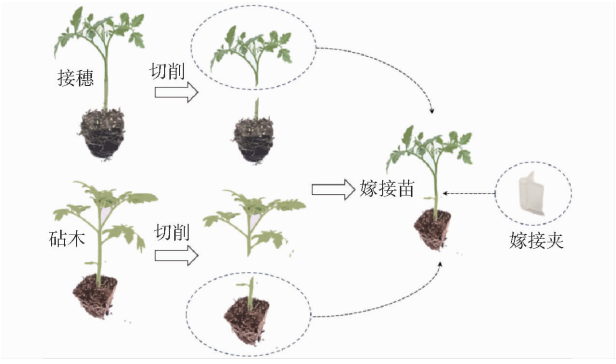

图 1　茄果类蔬菜贴接式嫁接工艺示意图

Fig. 1　Schematic of paste grafting process for eggplant and fruit vegetables

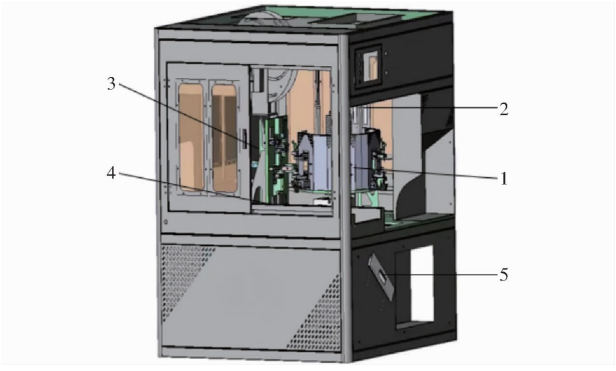

图 2　茄科立式半自动嫁接机整机结构图

Fig. 2　Vertical semi-automatic grafting machine of Solanaceae family

1. 六工位旋转工作台　2. 同步切削装置　3. 上夹装置　4. 回栽装置　5. 放苗台

整机结构主要由六工位旋转工作台、同步切削装置、上夹装置、回栽装置和 PLC（可编程逻辑控制器）控制单元组成。上苗工位人工上苗后，在 PLC 控制单元的协调下，同步切削工位对砧穗木进行精准同步切削；上夹工位完成切削面贴合与固定；回栽工位则将嫁接完成的嫁接苗移栽入穴，4 个工位协同循环作业，具体作业流程如下：

（1）工作时，操作人员位于人工上苗工位，将经过预处理的接穗苗（去除带有基质的下半部分）和砧木苗（去除切割点上方的茎叶部分）先后喂入相对应的夹持末端，此后，六工位旋转工作台在凸轮分割器的驱动下精确旋转，将夹持着苗木的工位转运至同步切削工位。

（2）进入同步切削工位后，切削装置依据预设的 30° 切削角度，对砧穗木同时进行切削，使两者均形成光滑的 30° 截面。切削完成后，接穗在上下对接气缸的作用下向下移动，与砧木苗的切削面实现精准贴合，随即被送入对接上夹工位。

(3)在上夹工位,上夹装置同步启动,先将长条料夹切割成适配长度的嫁接夹,再将其撑开,递送至指定位置。当贴合后的接穗与砧木到达时,嫁接夹闭合将切削口夹紧固定,随后上夹后的嫁接苗被送入回栽工位。

(4)回栽工位通过机械臂搭配回栽末端,抓取嫁接苗并按照预设路径将其回栽至穴盘的指定孔穴中。至此,嫁接机完成从人工上苗、同步切削、对接上夹到回栽的一个完整的工作循环。

2 关键机构设计

2.1 六工位旋转工作台

设 6 个嫁接工位,每个嫁接工位的零部件相同,如图 3 所示。该工作台由基质支撑台、电气滑环、砧木夹持机构、接穗夹持机构等关键部件构成。工作时,首先由人工在上苗工位依次将接穗与砧木放置于相应的夹持机构中,夹持动作与工作台旋转均由操作人员踩下脚踏开关来触发启动。随后,六工位旋转工作台逆时针旋转 60°,此时已完成上苗的嫁接工位转移至切削工位进行后续处理,同时下一个嫁接工位转至上苗位置,供操作人员继续上苗。其中,结合预切割后的砧木苗和接穗苗长度,上下对接气缸工作行程为 100 mm,型号为亚德客 MAJ20 × 100 - 50S。

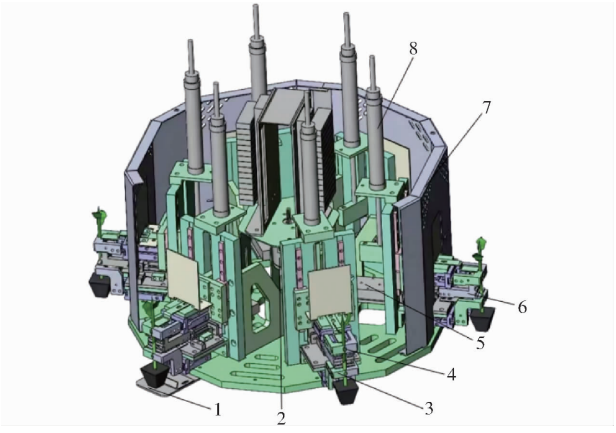

图 3 六工位旋转工作台

Fig. 3 Six-position rotary table

1. 基质支撑台 2. 电气滑环 3. 砧木夹持机构 4. 接穗夹持机构 5. 拢苗双轴气缸 6. 拢苗限位末端 7. 防护罩 8. 上下对接气缸

接穗苗和砧木苗茎秆的低损夹持是保证嫁接质量的关键。本文提出一种柔性夹持装置,如图 4 所示,由手指气缸、安装板、夹苗限位片、左右连接手、左右夹持手指、夹持弹片等组成。工作时,人工将苗喂入夹持机构且茎秆与夹苗限位板接触时,踩动脚踏开关,触发手指气缸驱动左、右夹持手指相向移动,将茎秆包裹在夹苗口中。夹苗限位片限位作用使得接穗与砧木共线,保证了后续对接要求。夹持弹片选用 65Mn 材质并经热处理,其优良的弹性与韧性,能够在夹持手指闭合时缓冲夹持冲击,使茎秆始终处于安全稳定的夹持状态。

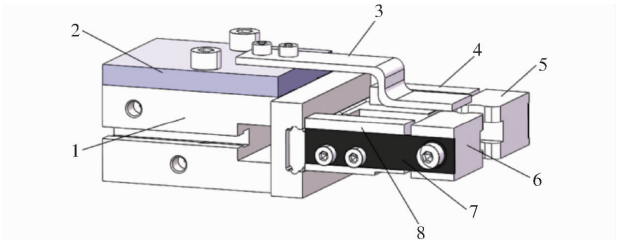

图 4 上苗柔性夹持装置

Fig. 4 Flexible clamping end

1. 手指气缸 2. 安装板 3. 夹苗限位片 4. 右连接手 5. 右夹持手指 6. 左夹持手指 7. 夹持弹片 8. 左连接手

2.2 同步切削装置

同步切削装置如图 5 所示,主要由 X 轴位移气缸、Y 轴位移气缸、拢苗气缸、拢苗末端、砧木切削气缸、砧木限位块、接穗切削气缸、接穗限位块、切刀、气吹装置等部件组成。工作时,能同时对接穗苗和砧木苗完成精准切削,并保证切削面平整,使两者后续能互相贴合。当接穗和砧木抵达切削工位时,X 轴位移气缸与 Y 轴位移气缸工作,实现接穗和砧木的初步定位调整;拢苗气缸工作,使得接穗、砧木分别进入相应的限位块凹槽中,到达切削位置;接穗切削气缸和砧木切削气缸同步启动,完成对苗株的精准切削。其中,气吹装置通过吹出稳定且适宜流量的气流,既能防止切削后茎秆堵塞砧木限位块凹槽,又能有效清除对接伤口处的杂质、碎屑等,提高嫁接苗成活率。

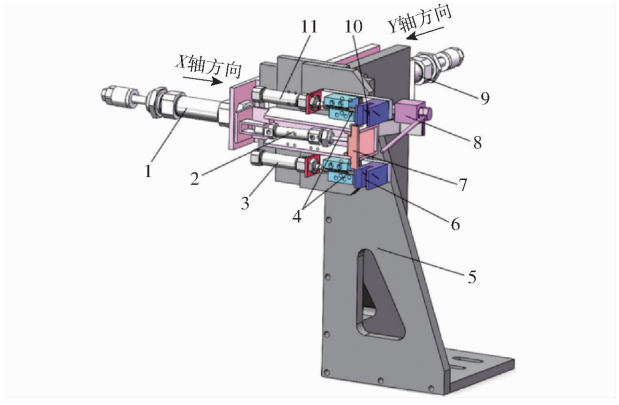

图 5 同步切削装置

Fig. 5 Synchronised cutting device

1. X 轴位移气缸 2. 拢苗气缸 3. 砧木切削气缸 4. 切刀 5. 安装板 6. 砧木限位块 7. 拢苗末端 8. 气吹装置 9. Y 轴位移气缸 10. 接穗限位块 11. 接穗切削气缸

限位块凹槽通过稳定支撑砧穗木确保切削过程的精确性,凹槽尺寸直接影响切削效果:过小会导致

直径较大的苗木无法进入切削位置，过大则削弱对苗茎的支撑，造成切口不平整。茄果类蔬菜苗径呈正态分布，不同品种中平均苗径最大为 3.93 mm[17]，但考虑到种苗存在局部弯曲现象，本文取限位凹槽宽度为 6 mm。

切削高度受茎秆强度限制，过高且接穗冠幅大易导致支撑不足而嫁接失败[18]。砧穗木切削模型如图 6 所示。

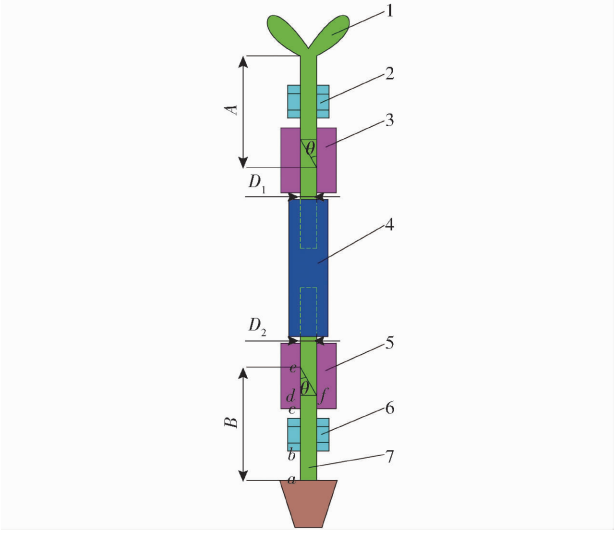

图 6　砧穗木切削模型

Fig. 6　Rootstock cutting model

1. 接穗苗　2. 接穗夹持机构　3. 接穗限位块　4. 拢苗末端　5. 砧木限位块　6. 砧木夹持机构　7. 砧木苗

由砧木切削过程的理论分析可知，切口长度和切削后砧木长度分别为

$$l_{ef}=\frac{D_2}{\sin\theta} \tag{1}$$

$$B=\frac{D_2}{\tan\theta}+l_{ab}+l_{bc}+l_{cd} \tag{2}$$

式中　l_{ef}——切口长度，mm

B——切削后砧木长度，mm

D_2——砧木苗茎，mm

θ——切削角度，(°)

l_{ab}——栽培基质至砧木夹持机构下表面的距离，mm

l_{bc}——砧木夹持机构下表面至砧木限位块下表面的距离，mm

l_{cd}——砧木限位块下表面至切削刃下侧的距离，mm

通过对切削部件与苗木茎秆位置关系的分析，确定切削角度为 30°。为满足零件可靠性要求，取 l_{cd} 为 2 mm。已知砧木夹持机构上表面至砧木限位块下表面距离 3 mm，夹持机构厚度取 10 mm，夹持机构下表面至栽培基质的距离为 30 mm，砧木苗平均直径为 3 mm，代入式(2)可得切削后砧木长度为 50 mm，满足常规嫁接机对嫁接苗的切口高度要求。接穗与砧木的切削位置关系一致。

2.3　上夹装置

2.3.1　整体结构

上夹装置的核心功能是将长条料夹切削成单个符合嫁接要求的等长度嫁接夹，实现嫁接夹打开与闭合动作，并将其精确固定于砧穗木切口贴合部位。上夹装置整体结构如图 7 所示，主要由供料盘、料夹推送气缸、切削机构等组成。

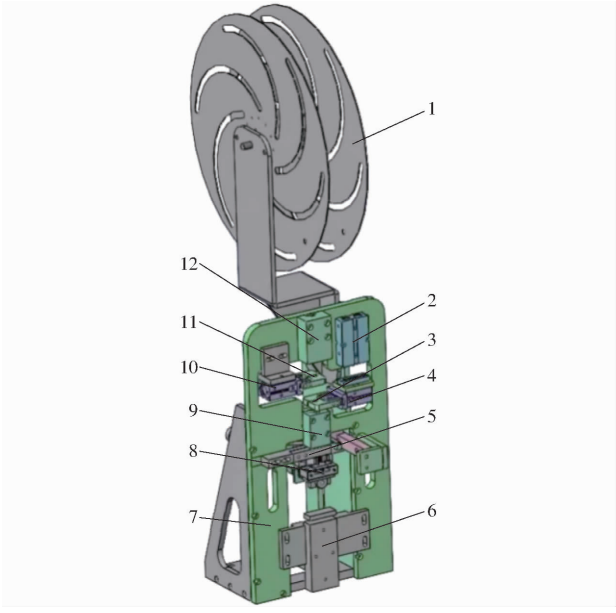

图 7　上夹装置

Fig. 7　Clamping device

1. 供料盘　2. 料夹推送气缸　3. 夹紧块　4. 送夹夹紧气缸　5. 切削机构　6. 顶针限位气缸　7. 机架　8. 送夹气缸　9. 第二送夹通道　10. 防退夹紧气缸　11. 防退夹紧块　12. 第一送夹通道

上夹装置具体工作流程如下：①送料准备阶段，需人工将长条嫁接物料夹螺旋缠绕在供料盘上，并引导料夹的一端依次通过第一送夹通道、防退夹紧块、夹紧块直至进入第二送夹通道。②送料定位阶段，送夹夹紧气缸驱动夹紧块夹持料夹，送夹气缸驱动其下移特定长度(设定为 17 mm)，使料夹穿出第二通道出口(防退夹紧块同步夹持料夹)。随后，送夹夹紧气缸松开料夹，送夹气缸退回，同时顶针定位气缸驱动定位针上移等待料夹，完成切料工序的递进式定位。③切夹阶段，切削机构驱动刀片对料夹进行切割，切断后刀片退回，生成独立的单体嫁接夹。④捏夹阶段，重复送夹定位与切料阶段，使嫁接夹套于定位针上，捏夹爪气缸控制捏夹手指夹住嫁接夹两翼端并打开，顶针限位气缸使定位针退回。⑤上夹阶段，对接后的嫁接苗移至上夹位置后，推送气缸驱动捏夹手指将打开状态的嫁接夹移至上夹位

置,随后捏夹爪气缸松开,嫁接夹恢复闭合,固定在砧穗木切口贴合位置。

2.3.2 对接拢苗限位机构

在砧穗对接工序中,接穗的理想位置处于砧木正上方,但茄果类蔬菜茎秆易弯曲,切削时施力不均会导致切削面角度偏差,造成不同程度错位对接[19]。针对上述情况,在六工位旋转工作台中设计了对接拢苗限位机构,通过左右拢苗限位末端的相向闭合运动,配合送夹动作,引导切削对接后的砧穗木同步向中心对齐,实现对接位置纠偏。对接拢苗过程如图 8 所示,左右拢苗块向前移动,使接穗和砧木进入作业区域内;紧接着,左右拢苗限位末端相向靠拢,捏夹手使嫁接夹打开并进行递送,使接穗和砧木向中心靠拢;最后,捏夹手指松开,嫁接夹对砧木和接穗进一步归正,完成拢苗上夹作业。

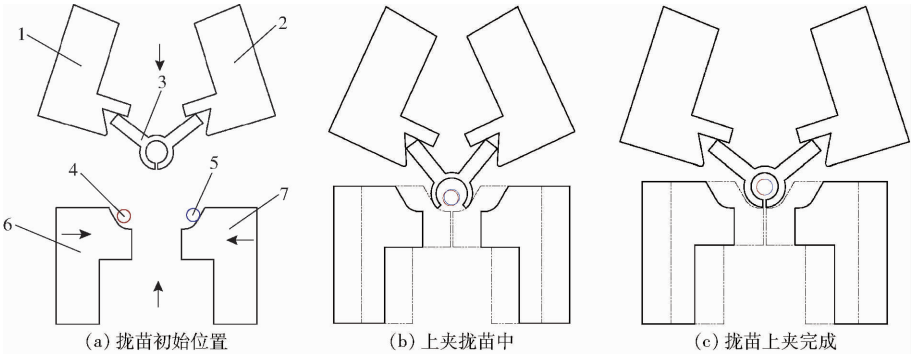

图 8 对接拢苗过程示意图

Fig. 8 Schematics of docking furrowing process

1. 左捏夹手 2. 右捏夹手 3. 嫁接夹 4. 接穗苗 5. 砧木苗 6. 左拢苗限位末端 7. 右拢苗限位末端

2.4 回栽装置

基于茄果类蔬菜生长特性,采用夹取砧木基质的方式进行嫁接苗的回栽,能够有效避免对茎秆造成机械损伤,有利于提高成活率[20]。嫁接苗回栽装置如图 9 所示,由机械臂、夹持机构、安装板等组成。工作时机械臂的各个关节协同作用使得回栽机构到达嫁接苗夹取位置,接着回栽机构夹持气缸控制夹爪夹取砧木基质,与机械臂协同运动,将嫁接苗回栽至传送带上的穴盘中,回栽路径整体呈 S 型。

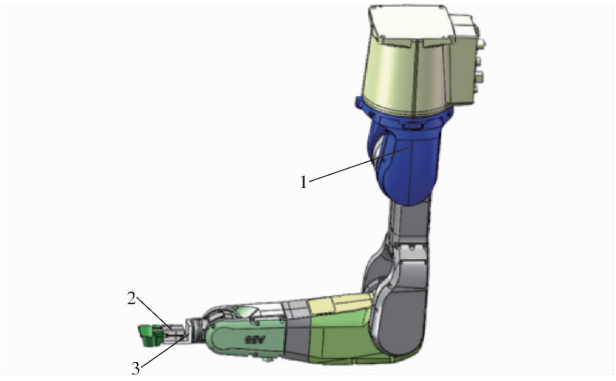

图 9 嫁接苗回栽装置

Fig. 9 Grafting seedling replanting robot

1. 机械臂 2. 夹持装置 3. 安装板

3 上苗夹持装置性能验证

上苗夹持装置作为茄果类蔬菜嫁接机的关键部件之一,其对种苗的安全稳定夹持是嫁接成功的关键。本文提出的夹持装置(图 4)基于夹持弹片的弹性与韧性实现柔性夹持,缓冲夹持冲击。为验证该装置的有效性,下文开展茎秆-夹持机构刚柔耦合仿真。

由于番茄种苗茎秆较茄子、辣椒等更为柔软,在外部夹持力作用下更易受损,故以番茄接穗茎秆为研究对象。

3.1 刚柔耦合仿真模型

采用 Solidworks 建立夹持机构和茎秆三维模型,茎秆模型采用圆棒形状[21]。考虑到计算效率和实际工程应用,对模型进行必要简化得到简化模型,将简化模型导入 ADAMS,形成初始模型,如图 10 所示。将简化模型导入 ABAQUS 中,划分网格,定义夹持机构、茎秆材料属性,计算有限元模型模态,将计算结果保存为 MNF 文件导入到 ADAMS 中,替换初始模型,由此形成可实现夹持弹片和茎秆柔性化设置的刚柔耦合仿真模型。为呈现夹持机构和茎秆相互作用力,选择 Impact 函数法[22]计算接触力,根据文献[23 - 26]设置仿真模型中的材料参数和接触参数,如表 1 所示。

3.2 柔性夹持的有效性验证

在刚柔耦合模型中,对弹片、茎秆都进行柔性化设置开展柔性夹持仿真,仅对茎秆柔性化设置开展刚性夹持仿真。参考实际嫁接过程中手指气缸的夹持过程,将手指气缸夹持运动参数设计为 STEP(time,0,0.6,12),采集夹持末端-茎秆接触力,对比两种夹持方式下的茎秆受力,结果如图 11 所示。

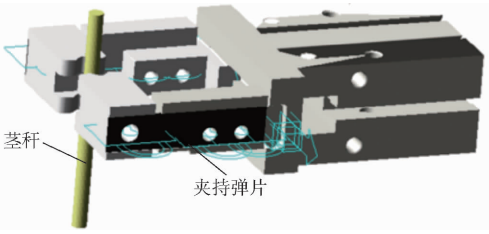

图 10　初始模型

Fig. 10　Initial model

表 1　材料参数和接触参数

Tab. 1　Material parameters and contact parameters

	参数	数值
夹持末端(铝型材)	密度/(g·cm^{-3})	2.7
	弹性模量/MPa	7×10^4
	泊松比	0.33
弹性片(65Mn 热处理)	密度/(g·cm^{-3})	7.85
	弹性模量/MPa	1.98×10^5
	泊松比	0.3
番茄茎秆	密度/(g·cm^{-3})	1.3
	弹性模量/MPa	34.92
	泊松比	0.35
茎秆-夹持末端接触参数	刚度/(N·mm^{-1})	3.38×10^5
	应力指数	1.5
	穿透深度/mm	0.1
	动摩擦因数	0.25
	静摩擦因数	0.30
	静平移速度/(mm·s^{-1})	0.1
	摩擦平移速度/(mm·s^{-1})	10

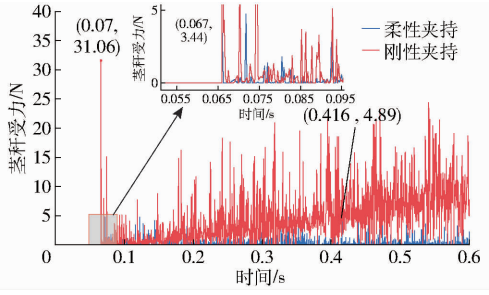

图 11　夹持特性仿真曲线

Fig. 11　Clamping characteristics simulation curves

分析可知，刚性夹持下，接触力出现高频剧烈的尖峰波动，振动强度显著更高，在夹持瞬间产生最大夹持力 31.06 N；相比之下，柔性夹持最大夹持力仅为 4.89 N，相较于刚性夹持下降 84.5%，表明其具有更好的夹持效果。

文献[27]研究表明，当番茄苗茎秆压缩变形不超过 20%时，对嫁接苗后续生长影响较小，此时接穗茎秆的临界压缩载荷为 7.35 N。本文所提出的柔性夹持接触力低于临界压缩载荷，满足低损夹持需求。

由于嫁接过程中切削工序接穗茎秆受外力最为显著，为验证柔性夹持机构的夹持稳定性，仿真分析切削时茎秆质心位移。在接穗苗切削位置添加 2 N 切削力，持续作用时间为 0.2 s[28]，此过程中，接穗茎秆质心位移如图 12 所示。0～0.1 s，茎秆被夹持，质心产生小范围波动；0.1～0.3 s，稳定夹持阶段，质心位置基本不变；0.3～0.5 s，切削力作用于茎秆，质心最大位移 1.11 mm，且随着切割完成而逐渐恢复；0.5 s 后，茎秆质心位置逐渐趋于稳定。上述结果表明，柔性夹持机构在切削过程中也能保持较好的夹持稳定性。

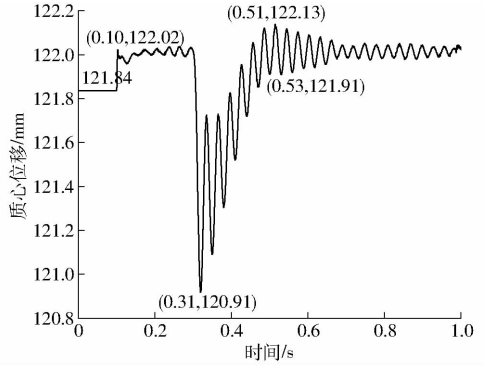

图 12　接穗茎秆质心位移变化曲线

Fig. 12　Variation curve of scion stem center of mass displacement

4　上苗夹持机构参数优化

为进一步优化柔性夹持机构夹持效果，采用正交试验法开展夹持机构关键参数多因素优化试验。

4.1　试验材料

以处于嫁接期、由 50 孔标准穴盘培育的番茄苗作为试验对象，砧木品种选定为“爱好”，接穗品种采用“安纳西”，用于试验测试的样机见图 13。图 14 为嫁接中各流程效果图。



图 13　试验样机

Fig. 13　Experiment prototype

4.2　试验方案设计

通过初步试验发现，夹持弹片厚度、弹片连接长度和工作气压是影响夹持成功率的主要因素。根据实验室预研结果，正交试验因素水平如表 2 所示。



图 14 嫁接机流程效果

Fig. 14 Effect of grafting machine process

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	夹持弹片厚度/mm	弹片连接长度/mm	工作气压/MPa
1	0.3	5	0.3
2	0.6	10	0.4
3	0.9	15	0.5

开展 9 组试验,每组试验选用番茄接穗苗和砧木苗各 50 株(共 100 株)进行嫁接。

4.3 试验评价指标

综合考虑茎秆夹持稳定性和夹持部位损伤,建立夹持合格评价标准:嫁接苗在夹持后能稳定地固定在预定位置,且后续嫁接作业不会出现晃动、移位等情况;夹持部位无表皮破裂、局部凹陷或汁液渗出等损伤现象。同时满足上述要求判定为夹持合格;反之则视为不合格。以夹持合格率为评价指标,计算公式为

$$Q_\varepsilon = \frac{P_t}{P} \times 100\% \tag{3}$$

式中 Q_ε——夹持合格率,%

P_t——夹持合格总数,株

P——嫁接总数,株

4.4 结果与分析

柔性夹持效果正交试验结果如表 3 所示,其中 X_1、X_2、X_3 表示夹持弹片厚度、弹片连接厚度、工作气压水平。

分析 3 个因素的极差 R,确定试验因素影响从大到小的顺序为:夹持弹片厚度、工作气压、弹片连接长度。弹片厚度对夹持效果显著影响,弹片厚度过薄会致夹持力较弱,过厚则弹性恢复差,夹持力得不到精准控制,番茄苗茎秆易出现表皮破裂等现象。工作气压过低会导致动力欠缺、夹持力不稳,气压过高会导致冲击过大,柔性缓冲失效,损伤茎秆。合理的范围内,弹片连接长度影响较小,但当弹片连接长度过大时,会影响夹持定位精度,导致夹持接触点偏差。根据 K 值确定最优组合为 $X_{12}X_{22}X_{31}$,即弹片厚度为 0.6 mm,弹片连接长度为 10 mm,工作气压为 0.3 MPa。

表 3 正交试验结果与极差分析

Tab. 3 Experimental results and extreme variance analysis

试验序号	因素			夹持合格率/%
	X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	88
2	1	2	2	84
3	1	3	3	76
4	2	1	2	94
5	2	2	3	96
6	2	3	1	98
7	3	1	3	86
8	3	2	1	90
9	3	3	2	82
K_1	82.67	89.33	92.00	
K_2	96.00	90.00	86.67	
K_3	86.00	85.33	86.00	
R	13.33	4.67	6.00	

5 整机效率与性能验证

5.1 整机效率

整机嫁接作业采用多工位循环嫁接模式,嫁接效率由人工上苗操作与机器作业时间协同配合决定,图 15 为整机作业时序图。

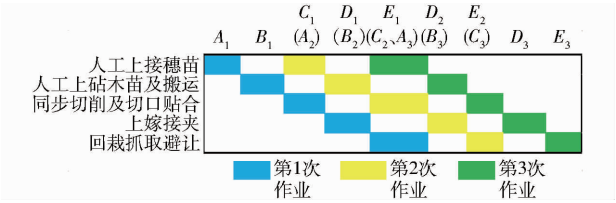

图 15 立式半自动嫁接机作业时序图

Fig. 15 Sequence of grafting machine operations

分析第 i 轮嫁接过程,A_i、B_i 分别为人工上接穗苗、上砧木苗及搬运所需的时间;C_i 为同步切削及切口贴合所需的时间;D_i 为上嫁接夹所需时间;E_i 为回栽机械手抓取避让的时间。其中 A_i、B_i 时间长短由人工熟练度决定,其余时间均特定。

一次嫁接循环作业时间为

$$T_1 = A_1 + B_1 + C_1 + D_1 + E_1 \tag{4}$$

式中 T_1——一次嫁接循环作业时间,s

3 次循环时间为

$$T_3 = T_1 + D_2 + E_2 + D_3 + E_3 \tag{5}$$

式中　T_3——3 次嫁接循环作业时间，s

机器嫁接效率为

$$\eta = \frac{3\,600}{T_3} \times 3 \tag{6}$$

式中　η——机器嫁接效率，株/h

其中，为减少时间因素导致的机器结构碰撞，并最大程度减少机器操作时长，将 C_1、D_1、E_1 分别设定为 1.4、1.2、0.5 s，转盘搬运时间为 0.5 s。当人工上接穗苗和砧木苗均为理想时间 4 s 时，效率为 720 株/h。

5.2　整机性能验证

将夹持机构最优参数组合应用于整机，同时确保各部件安装精度，以辣椒、番茄、茄子等茄果类蔬菜作为试验对象，开展整机性能验证试验。

试验采用分组对照，按作物种类划分 3 组试验：第 1 组，“红火 2 号”辣椒砧木苗-“萧新 218”接穗苗；第 2 组，“爱好”番茄砧木苗-“安纳西”接穗苗；第 3 组，“博喜”茄子砧木苗-“良峰 4 号”接穗苗。嫁接合格标准为：砧木和接穗的切削面之间无缝隙，能够有效贴合，嫁接夹能够将贴合后的砧木、接穗固定为一体。每组随机抽取砧木与接穗各 100 株进行嫁接作业，根据嫁接合格数量计算嫁接成功率，统计单位时间作业量计算嫁接效率，结果如表 4 所示。

表 4　嫁接性能试验结果

Tab. 4　Results of performance tests

类别	数量/株	总耗时/s	效率/(株·h^{-1})	成功率/%
番茄	100	508.2	708	98.0
辣椒	100	492.3	731	98.0
茄子	100	505.6	712	96.0
平均值	100	502.0	717	97.3

试验结果表明，番茄、辣椒和茄子种苗嫁接作业均具备较高的嫁接成功率和相对稳定的嫁接效率，平均嫁接成功率为 97.3%，平均嫁接效率为 717 株/h，是熟练人工（350 株/h）嫁接效率的 2 倍。

不同品种嫁接效率出现轻微波动，主要原因：一是砧木和接穗形态存在差异，需要人工进行不断调整；二是人工熟练程度不同，机械性重复易出现上苗动作失误或遗漏。嫁接失败的主要原因是由于部分接穗苗和砧木苗茎秆弯曲过大，难以通过人工上苗进行调整，导致切削及上夹失败；尤其在茄子嫁接中，由于品种特性，局部弯曲发生率较高。因此，提升苗场规范化育苗标准与加强操作人员培训对提高机械化嫁接效率和成功率至关重要。

6　结论

（1）设计了一种茄果类蔬菜立式半自动嫁接机，阐述了六工位旋转工作台、同步切削装置、上夹装置及回栽等关键机构结构组成与工作原理。

（2）提出了一种基于夹持弹片的上苗柔性夹持机构，仿真结果表明，相较于刚性夹持，柔性夹持的最大夹持力降低了 84.5%。样机正交试验表明，影响夹持成功率的因素排序为：夹持弹片厚度、工作气压、弹片连接长度；最优参数组合为：夹持弹片厚度 0.6 mm、工作气压 0.3 MPa、弹片连接长度 10 mm，验证了夹持机构的有效性。

（3）以番茄、辣椒、茄子为对象，开展整机嫁接性能样机试验。结果表明，3 种种苗平均嫁接成功率为 97.3%，平均嫁接效率为 717 株/h，为熟练人工的 2 倍，机器作业质量满足嫁接作业要求。

参　考　文　献

[1] KUBOTA C, MCCLUREM A, KOKALIS-BURELLE N, et al. Vegetable grafting: history, use, and current technology status in North America[J]. HortScience, 2008, 43(6):1664 - 1669.

[2] MAHBOU S T G, NTSOMBOH-NTSEFONG G, AMINATOU M F, et al. Effect of grafting on growth and shelf life of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) grafted on two local *Solanum* species[J]. Bioscience and Biotechnology, 2022, 13(9):401 - 418.

[3] 辜松，江林斌. 国内外蔬菜嫁接机的发展现状[J]. 东北农业大学学报，2007, 38(6):847 - 851.
GU Song, JIANG Linbin. Development of domestic and foreign vegetable grafting robot[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(6):847 - 851. (in Chinese)

[4] 刘明池，季延海，武占会，等. 我国蔬菜育苗产业现状与发展趋势[J]. 中国蔬菜，2018(11):1 - 7.
LIU Mingchi, JI Yanhai, WU Zhanhui, et al. Current situation and development trend of vegetable seedling industry in China [J]. China Vegetables, 2018(11):1 - 7. (in Chinese)

[5] 张凯良，褚佳，张铁中，等. 蔬菜自动嫁接技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2017，48(3):1 - 13.
ZHANG Kailiang, CHU Jia, ZHANG Tiezhong, et al. Development status and analysis of automatic grafting technology for vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):1 - 13. (in Chinese)

[6] 大越崇博，小林研. ウリ科接ぎ木装置用自動給苗装置の開発(第 1 報——台木用自動給苗装置の性能評価)[J]. 農業機械学会誌，2013，75(2)：100 - 107.

[7] SUN Q, ZHAO D J, WANG C, et al. Design of a sapling branch grafting robot[J]. Journal of Robotics, 2014(1):604746.

[8] 姜凯,冯青春,王秀,等. 国外蔬菜嫁接机器人研究动态[J]. 农业工程技术,2020, 40(4):10 - 17.
JIANG Kai, FENG Qingchun, WANG Xiu, et al. Research trends of vegetable grafting robots abroad[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(4):10 - 17. (in Chinese)
[9] Conic System Inc. EMP - 300[S/OL]. http: //www. conic-system. com/wp/gallery/51 - 2? lang = en,2016.
[10] ISO Group, Inc. ISO high speed grafter[S/OL]. https://www. isohorti. com/en/iso-high-speed-grafter/,2025.
[11] 张铁中. 2JSZ600 型蔬菜自动嫁接机[J]. 农村百事通,2000(21):42.
[12] 辜松. 2JC - 350 型蔬菜插接式自动嫁接机的研究[J]. 农业工程学报,2006, 22(12):103 - 106.
GU Song. Research on 2JC - 350 automatic vegetable grafting machine of plug-in type[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12):103 - 106. (in Chinese)
[13] 刘宝伟,辜松. 2JC - 500 型自动嫁接机接穗夹持与切削机构[J]. 农机化研究,2008,30(2):119 - 120.
LIU Baowei, GU Song. Scion clamping and cutting mechanism of 2JC - 500 automatic grafting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(2):119 - 120. (in Chinese)
[14] XIE Z, GU S, CHU Q, et al. Development of a high-productivity grafting robot for solanaceae[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 82 - 90.
[15] 姜凯,郑文刚,张骞,等. 蔬菜嫁接机器人研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(4):8 - 14.
JIANG Kai, ZHENG Wen'gang, ZHANG Qian, et al. Development and experiment of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4):8 - 14. (in Chinese)
[16] 王家胜,李洋鹏,高春风,等. 对称式蔬菜单株自动嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025, 56(1):141 - 150.
WANG Jiasheng, LI Yangpeng, GAO Chunfeng, et al. Design and test of symmetrical structure vegetable grafting robot for single plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):141 - 150. (in Chinese)
[17] 辛璐,高春凤,张梅,等. 茄果蔬菜六株同步嫁接双向夹持定位装置设计[J]. 农机化研究,2024, 46(3):133 - 138.
XIN Lu, GAO Chunfeng, ZHANG Mei, et al. Design of bidirectional clamping and positioning device for synchronous grafting of six seedlings of solanaceae vegetables[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(3):133 - 138. (in Chinese)
[18] 辜松. 蔬菜种苗嫁接机与嫁接苗规模化生产的融合[J]. 现代农业装备,2024, 45(3):2 - 9.
GU Song. Adaptation of automated grafting machines to large scale of grafted seedlings production[J]. Modern Agricultural Equipment, 2024, 45(3):2 - 9. (in Chinese)
[19] 谢忠坚. 茄果类高效嫁接机关键技术研究[D]. 广州:华南农业大学,2021:1 - 128.
XIE Zhongjian. Experimental study on the key techniques of high-productivity grafting robot for solanaceous[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021:1 - 128. (in Chinese)
[20] 吕亚军. 茄果类半自动高速嫁接机关键机构设计与试验[D]. 广州:华南农业大学,2018:1 - 64.
LÜ Yajun. Design on key institutions of high speed and semi-automatic grafting robot for solanaceous[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018:1 - 64. (in Chinese)
[21] 韩明兴,李淼,段宏兵,等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(2):109 - 118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):109 - 118. (in Chinese)
[22] 邱述金,郭玉明,郑德聪. 柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化[J]. 农业机械学报,2014, 45(8):72 - 79.
QIU Shujin, GUO Yuming, ZHENG Decong. Dynamic simulation and parameter optimization of disc saw cutting system for caragana harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):72 - 79. (in Chinese)
[23] 曾正明. 实用钢铁材料手册(第 3 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
[24] 马晓晓,李华,葛云,等. 番茄钵苗茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究,2020, 42(8):161 - 167.
MA Xiaoxiao, LI Hua, GE Yun, et al. Experimental study on mechanical properties of tomato seedling stem[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8):161 - 167. (in Chinese)
[25] 周海丽,熊宵,陈佳峰,等. 茄果类种苗嫁接整盘预切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025, 56(4):231 - 240.
ZHOU Haili, XIONG Xiao, CHEN Jiafeng, et al. Design and experiment of pre-cutting device for entire trays of solanaceae seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4):231 - 240. (in Chinese)
[26] 谭理,纪爱敏,黄继承,等. 基于 ADAMS 的工业大麻输送机构参数优化[J]. 中国农机化学报,2023, 44(5):42 - 47.
TAN Li, JI Aimin, HUANG Jicheng, et al. Parameter optimization of industrial hemp conveying mechanism based on ADAMS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5):42 - 47. (in Chinese)
[27] 李军. 茄科整排全自动蔬菜嫁接机的研究[D]. 北京:中国农业大学,2016:1 - 128.
LI Jun. Study on a full automatic grafting machine for solanaceae vegetable seedlings[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016:1 - 128. (in Chinese)
[28] 段玉振,王家胜,张峰峰,等. 茄科蔬菜嫁接秧苗几何及力学特性试验研究[J]. 农业工程,2018, 8(1):89 - 92.
DUAN Yuzhen, WANG Jiasheng, ZHANG Fengfeng, et al. Experimental research on geometrics and mechanics of solanceous vegetable seedlings for grafting[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(1):89 - 92. (in Chinese)