doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.017

UV 胶包覆固定切口式瓜类嫁接装置设计与试验

姜　凯[1,2]　王志豪[1,2]　龚科建[2]　冯青春[2]　韩长杰[1]　陈立平[2]
(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对嫁接机使用塑料夹固定易伤苗和塑料夹回收难、污染种植环境的问题,本文设计一种以 UV 胶包覆固定切口的嫁接装置,可自动完成上苗夹持、同步切削、对接喷胶、拢苗固化和柔性下苗等作业。首先,阐述了嫁接装置的结构组成和工作原理,设计了夹持、切削、搬运、喷胶、固化和下苗等关键机构及作业参数;其次,为确定最优胶嫁接参数、提高嫁接成功率,以白籽南瓜(砧木)和西瓜(接穗)种苗为对象,选取雾化压力、供胶压力和喷胶距离为影响因素,嫁接成功率为试验指标,开展三因素三水平响应面试验,得出影响嫁接成功率的显著性由大到小为雾化压力、供胶压力、喷胶距离;最后,利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行方差分析、响应曲面分析和参数优化及试验验证,获得最佳参数组合条件。试验结果表明,在雾化压力为 0.22 MPa、供胶压力为 0.35 MPa 和喷胶距离为 4.33 mm 条件下,平均嫁接成功率为 97.34%,与理论值相差 1.15 个百分点,平均生产效率 576 株/h,满足机械嫁接作业质量要求。研究结果为胶嫁接机器人的设计开发提供理论基础和技术支撑。

关键词:瓜类种苗;嫁接装置;UV 胶嫁接;参数优化
中图分类号:S233.74　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)06-0177-10　　**OSID**:

Design and Test of Melon Grafting Device Based on UV Adhesive Coating and Fixation

JIANG Kai[1,2]　WANG Zhihao[1,2]　GONG Kejian[2]　FENG Qingchun[2]　HAN Changjie[1]　CHEN Liping[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Intelligent Equipment Technology Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: In view of the problem that the grafting machine uses plastic clips to fix vulnerable seedlings and the plastic clips are difficult to recycle and pollute the planting environment, a grafting device based on UV glue coating and fixation was designed, which can automatically complete the operations of seedling clamping, synchronous cutting, butt glue spraying, seedling solidification and flexible seedling lowering. Firstly, the structural composition and working principle of the grafting device were expounded, and the key mechanisms and operating parameters such as clamping, cutting, handling, glue spraying, curing and seedling setting were designed; Secondly, in order to determine the optimal glue grafting parameters and improve the grafting success rate, taking white-seeded pumpkin (rootstock) and watermelon (scion) seedlings as the object, the atomization pressure, glue supply pressure and glue spraying distance were selected as the influencing factors, and the grafting success rate as the test index, the three-factor and three-level response surface test was carried out, and the significant ranking of the grafting success rate was as follows: atomization pressure, glue supply pressure, and dispensing distance; Finally, the Design-Expert 13 software was used to analyze the variance, respond surface and parameter optimization of the test results, and verify the test results to obtain the best parameter combination conditions. The test results showed that under the conditions of atomization pressure of 0.22 MPa, glue supply pressure of 0.35 MPa and spraying distance of 4.33 mm, the average grafting success rate was 97.34%, the error from the theoretical value was 1.15 percentage points, and the average production

收稿日期:2025-03-24　修回日期:2025-05-06
基金项目:国家自然科学基金面上项目(32171898)、国家重点研发计划项目(2024YFD2000604)、2025 年度农业智能装备技术北京市重点实验室建设项目(PT2025-44)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-25-07)
作者简介:姜凯(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事设施园艺智能装备技术研究,E-mail:jiangk@nercita.org.cn
通信作者:陈立平(1973—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业智能装备技术与应用研究,E-mail:chenlp@nercita.org.cn

efficiency was 576 plants/h, which met the quality requirements of mechanical grafting operation. The research results can provide a theoretical basis and technical support for the design and development of glue grafting robots.

Key words: melon seedling; grafting device; UV adhesive grafting; parameter optimization

0 引言

我国是全球最大的蔬菜生产与消费国,蔬菜产量和种植面积均居世界首位[1]。据统计,2023 年全国蔬菜种植面积达 2.288 4 × 10^7 hm^2,总产量达 8.28 × 10^8 t,年需种苗量超 7 000 亿株,其中嫁接苗约 1 000 亿株[2-3]。蔬菜嫁接育苗能够有效克服土壤连作障碍和病虫害并提高产量,其规模化应用对保障蔬菜产能和品质至关重要[4]。人工嫁接存在技术依赖性强、作业效率低和质量难保证等问题,制约育苗产业规模化发展,因此,机械化嫁接技术已成为提升蔬菜产业现代化水平的迫切需求[5-6]。

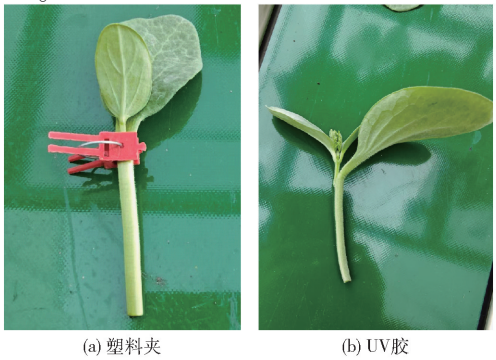
国外嫁接机技术研究起步较早,目前已形成较为完善的嫁接装备。日本井关公司[7]推出的 GRF800 - U 型瓜类全自动嫁接机,开发了一种自动上苗装置代替人工,仅需 1 人供应穴盘,生产效率 800 株/h,由于缺乏对种苗形态识别,上苗装置对种苗的适应性不高,存在伤苗问题。韩国 Helper Robotech 公司[8-9]开发的 AFGR - 800CS 型瓜类半自动嫁接机,利用机器视觉技术识别种苗切口中心位置,提高了砧木和接穗切口对接精度,将成功率提升至 98%。西班牙 Conic System 公司[10]开发的 EMP300 型茄果类半自动嫁接机,采用硅胶夹固定嫁接苗,需 1 人辅助上苗,生产效率 300 株/h 左右,成功率 98%。荷兰 ISO Group 公司[11-12]开发出 Graft 1200 型套管式茄果类全自动嫁接机,适用于小苗龄番茄苗,设计了砧穗一体式同步切削机构,保证二者切口角度的一致性,利用四轴机械臂与嫁接机构相结合实现了快速拢苗定位、切口对接、上夹及搬运作业,生产效率 1 200 株/h,成功率 99%,但对砧穗茎粗匹配度要求较高。国内研发机构主要集中在高校和研究所,嫁接机仍处于试验推广阶段。文献[13 - 19]开发了瓜类贴接式和插接式嫁接机,设计出单爪和四夹爪夹持搬运机构,构建了砧木内部髓腔的精准切削模型,明确了不同苗龄砧木安全切削角度,生产效率 600 ~ 1 052 株/h,成功率 89% ~ 96.67%。文献[20 - 27]开发出茄果类全自动嫁接机,采用穴盘供苗,实现 1 株或 6 株同步自动嫁接作业,生产效率 700 ~ 1 000 株/h,成功率 89% ~ 97.1%。医用 UV 胶具有高强度、快速固化、高精度和低毒性等优点,在医用器材粘接方面得到了广泛应用。ZHANG 等[28]利用喷阀和紫外固化机测试了 UV 胶的雾化和固化特性,在西瓜嫁接苗外部能够形成固定胶膜,证实了 UV 胶代替塑料夹嫁接的可行性,而 UV 胶嫁接参数优化与控制模型有待深入研究。

综上,现有嫁接机普遍采用塑料夹固定嫁接苗,自动上夹过程的冲击力过大导致伤苗,影响愈合效率;并且塑料夹回收难度大、成本高,育苗企业和农户放弃回收塑料夹,长年使用造成种植环境污染加剧,已成为制约育苗产业发展的瓶颈问题。因此,本文提出利用可降解医用 UV 胶在嫁接苗外部形成包覆层代替塑料夹,实现嫁接苗切口的柔性固定。设计 UV 胶嫁接装置及关键部件,以西瓜苗为嫁接对象,进行喷胶嫁接性能试验、参数优化及试验验证。以期为胶嫁接机器人研制提供理论基础和技术支撑。

1 整机设计方案

1.1 嫁接方法对比

传统塑料夹与 UV 胶嫁接效果对比如图 1 所示。二者优缺点为:①在嫁接机自动上夹过程中由于瞬间释放塑料夹对嫁接苗产生的夹持冲击力较大,易造成瓜类种苗夹持损伤,且塑料夹刚性夹持嫁接苗影响愈合速率。而 UV 胶嫁接形成的胶膜质量轻,对嫁接苗包覆效果更加柔性化。②塑料夹材料为聚丙烯(PP)或聚乙烯(PE),难以降解污染种植环境。医用级 UV 胶具有快速固形特性,在嫁接苗愈合后随苗茎增粗胶膜可自动脱落。③塑料夹成本 0.05 元/个,实施回收作业难度大,经测算,使用 UV 胶嫁接成本仅为塑料夹的 20% 左右,生产成本优势显著[28]。



(a) 塑料夹 (b) UV胶

图 1 嫁接方法对比

Fig. 1 Comparison of grafting methods

1.2　整机结构与工作原理

根据瓜类贴接法嫁接农艺和胶嫁接机作业要求，嫁接装置主要包括夹持机构、切削机构、旋转搬运机构、对接喷胶机构、拢苗固化机构、柔性下苗机构以及控制系统等，如图 2 所示。

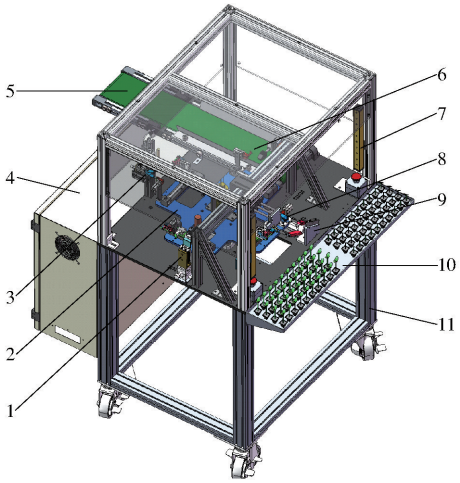


图 2　UV 胶嫁接装置结构示意图

Fig. 2　Schematic of UV adhesive grafting device

1. 喷胶机构　2. 旋转搬运机构　3. 固化机构　4. 控制箱　5. 输送带　6. 下苗机构　7. 安全光栅　8. 夹持机构　9. 切削机构　10. 工作台　11. 机架

在旋转搬运机构转台上以间隔 90°圆周对称分布安装 4 组夹持机构，将切削、喷胶、固化和下苗机构与 4 组夹持机构一一对应安装于机架上，实现各机构同步连续作业，旋转搬运机构每旋转 90°完成 1 株嫁接苗。工作过程为：①人工将砧木水平方向放入茎托和定位块中，对其轴向和径向实施定位，踩下脚踏开关，平行手指气缸驱动砧木夹爪闭合，完成砧木夹持定位作业。②人工将接穗水平方向放置定位夹内，二次踩下脚踏开关，平行手指气缸驱动定位夹和接穗夹爪同时闭合，完成接穗夹持定位作业。此时，切削气缸驱动切刀从下至上快速移动通过定位块和定位夹的内刀槽，完成砧木和接穗的同步切削。定位块、定位夹、切削机构等依次复位。③旋转搬运机构顺时针旋转 90°，将切削后的砧木和接穗搬运至喷胶机构下方，由步进电机带动砧木移动与接穗切口对接，喷雾阀垂直向下移动对嫁接苗外部进行喷胶作业。④旋转搬运机构再次顺时针旋转 90°将嫁接苗搬运至固化机构下方，拢苗夹对砧穗切口进行压紧定位，固化灯向下移动并开启，对胶膜进行照射固化作业。⑤旋转搬运机构继续顺时针旋转 90°，将嫁接苗搬运至下苗机构处，柔性夹爪伸出夹持住砧木茎秆，此时砧木和接穗夹爪同时张开，柔性夹爪缩回向下旋转 90°并释放嫁接苗至输送带上，输送带将其输出并进行回栽作业，完成 1 个嫁接作业循环。

2　关键部件设计

2.1　夹持机构

夹持机构是砧(穗)苗夹持固定和定位的重要部件，以保证切削时苗茎的稳定性和安全性，结构包括砧木夹爪、接穗夹爪、茎托、平行手指气缸、定位块、定位夹、连接板等，如图 3 所示。

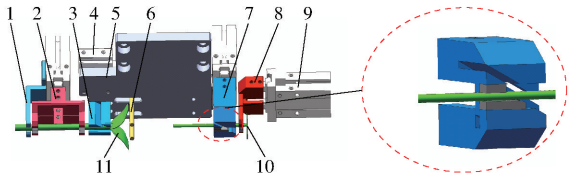


图 3　夹持机构结构图

Fig. 3　Structure drawing of clamping mechanism

1. 茎托　2. 砧木夹爪　3. 定位块　4. 压苗气缸　5. 连接板　6. 压苗杆　7. 定位夹　8. 接穗夹爪　9. 平行手指气缸　10. 接穗　11. 砧木

为配合竖直方向喷胶作业，砧木和接穗均采用水平方向上苗夹持。砧木夹爪设计为苗茎两端夹持方式，以便于嫁接苗的自动取出。利用茎托和定位块内设弧形凹槽，实现砧木上苗径向定位；同时调整砧木两子叶交点与定位块侧面重合，实现砧木轴向定位。通过定位夹和接穗夹爪配合完成接穗径向定位与夹持，以保证接穗切削稳定性。

结合茎托、下苗柔性夹爪、定位块以及手持上苗等尺寸及作业空间要求，砧木夹爪结构布局如图 4 所示。

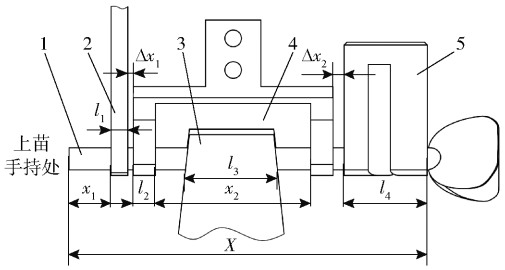


图 4　砧木夹爪结构布局

Fig. 4　Rootstock clamping structure layout

1. 砧木　2. 茎托　3. 下苗柔性夹爪　4. 砧木夹爪　5. 定位块

为保证砧木夹持更加稳定，茎托宽度 l_1 为 3 mm，砧木夹爪两端宽度 l_2 为 4 mm，柔性夹爪宽度 l_3 为 20 mm，定位块宽度 l_4 为 15 mm，砧木夹爪内部间距 x_2 取 28 mm 满足安全取苗，上苗手持长度 x_1 为 5 mm，茎托与砧木夹爪左侧间距 Δx_1 取 1 mm，定位块与砧木夹爪右侧间距 Δx_2 取 2 mm。

适合上苗作业的砧木苗茎长度 X 为

$$X = x_1 + l_1 + \Delta x_1 + 2l_2 + x_2 + \Delta x_2 + l_4 \qquad (1)$$

将以上数据代入式(1)，得出 $X \geqslant 62$ mm，满足

砧木嫁接标准苗生长参数要求。

为确定适合上苗作业的接穗苗茎长度及切削后苗茎长度是否符合嫁接要求,接穗夹持机构布局如图 5 所示。

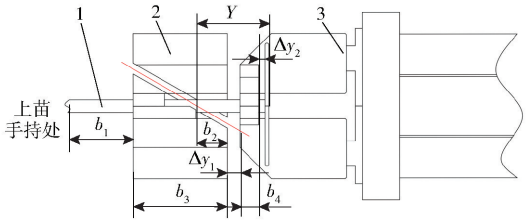


图 5 接穗夹持机构布局

Fig. 5 Scion clamping structure layout

1. 接穗 2. 定位夹 3. 接穗夹爪

在保证接穗能被稳定夹持的前提下尽可能减小夹持距离,接穗夹爪宽度 b_4 为 3 mm,定位夹宽度 b_3 为 15 mm,接穗切口中心至定位夹右侧距离 b_2 为 5 mm,定位夹与接穗夹爪间距 Δy_1 为 2 mm,接穗子叶与接穗夹爪间距 Δy_2 为 1 mm,手持上苗长度 b_1 应大于10 mm。

接穗切削后苗茎长度 Y 为

$$Y = b_2 + \Delta y_1 + b_4 + \Delta y_2 \tag{2}$$

将以上数据代入式(2),得出 Y 为 11 mm,满足嫁接农艺要求的 10 ~ 15 mm。适合上苗作业的接穗苗茎长度大于等于 31 mm,满足接穗嫁接标准苗生长参数要求。

砧木茎粗 3 ~ 5 mm、接穗茎粗 2 ~ 3 mm,砧木和接穗夹爪驱动选取亚德客 HFZ10 型手指气缸,其最大行程为 11. 5 mm,并在夹爪内表面粘贴厚度 2 mm 的 EVA 缓冲材料,夹爪间距 7. 5 mm,满足砧木和接穗上苗作业。

2. 2 切削机构

切削机构由切刀模块和辅助切削模块组成,其中,切刀模块包括切刀、切削气缸、移动气缸、刀架、压板和连接块等;辅助切削模块包括辅助气缸、定位块、定位夹、压苗杆和安全光栅等,如图 6 所示。

在完成砧木与接穗上苗后,压苗杆对砧木两子叶进行压持,确保顺利完成上子叶和生长点的切除,以免切伤下子叶。由于切削机构与夹持机构设计在同一个工位,在工作台两侧安装光栅传感器,保证人工上苗过程的安全作业。刀架与切削气缸呈 30°安装于移动气缸,刀架可平行安装砧木和接穗切刀,通过切削气缸带动砧木和接穗切刀实现同角度同步,确保二者切口对接贴合的紧密性。选取不锈钢刀片厚度为 0. 2 mm、长度为 50 mm、宽度为 8 mm。

根据切削动作建立砧木和接穗切口中心几何模型,如图 7 所示。图中红色虚线为切刀轨迹,为保证

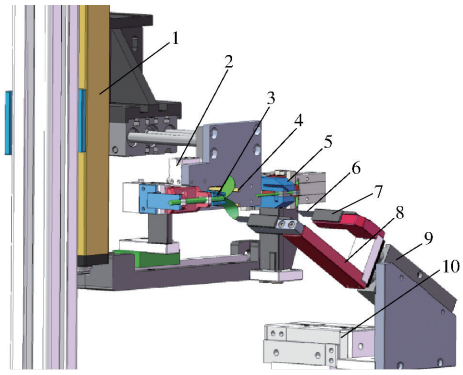


图 6 切削机构结构图

Fig. 6 Structure drawing of cutting mechanism

1. 光栅传感器 2. 压苗气缸 3. 定位块 4. 压苗杆 5. 定位夹 6. 切刀 7. 压板 8. 刀架 9. 切削气缸 10. 移动气缸

切刀伸出后能完全通过定位块和定位夹内刀槽实现砧穗切削,确定切削行程为 50 mm,切削机构完成切削工作后需向外侧移动 30 mm,将切削机构与夹持机构分离便于搬运机构旋转作业。选取切削气缸和移动气缸型号分别为亚德客 TN - 10X50 - S 和 HLQ12X30S。

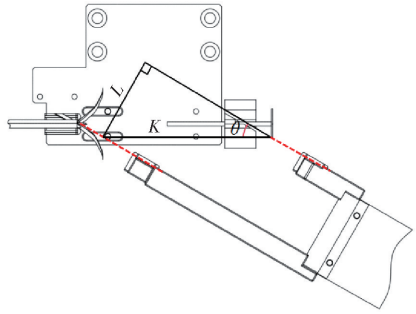


图 7 切口中心距几何模型

Fig. 7 Geometric model of center distance

砧木和接穗切口水平中心距 K 为

$$K = \frac{L}{\sin\theta} \tag{3}$$

式中 L——两切刀垂直距离,mm

θ——切削角度,(°)

已知砧穗切削角度 θ 为 30°,两切刀垂直距离 L 为 40 mm,将以上数据代入式(3),得出 K 为 80 mm,即二者切口对接的移动距离。

2. 3 旋转搬运机构

旋转搬运机构包括 4 组对接模块、转动底盘、伺服电机、中空旋转平台减速机和气电滑环等,如图 8 所示。

4 组对接模块以间距 90°圆周对称分布安装于转动底盘上,为保证对接移动稳定性,选取步进电机驱动的直线模组作为对接模块,其结构包括移动滑块、同步带和步进电机,砧木夹爪安装于移动滑块上。

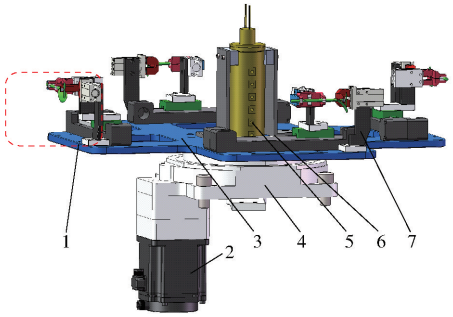


图 8　旋转搬运机构结构图

Fig. 8　Structure drawing of rotating handling mechanism

1. 对接模块　2. 伺服电机　3. 转动底盘　4. 中空旋转平台减速机　5. 气电滑环　6. 移动滑块　7. 步进电机

选取 28HB50－402A 型步进电机驱动移动滑块完成砧穗切口对接作业，其步距角为 1.8°，扭矩为 0.18 N·m，同步带轮导程为 40 mm，额定转速为 300 r/min，则对接速度为

$$v = \frac{dn}{1\,000} \tag{4}$$

式中　d——导程，mm

v——对接速度，m/s

n——额定转速，r/min

将以上数据代入式(4)，得出 v 为 0.2 m/s，根据对接距离 80 mm 得出对接移动耗时 0.4 s，满足对接作业速度要求。

旋转搬运机构负载扭矩计算式为

$$T_1 = J\alpha \tag{5}$$

其中

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \tag{6}$$

$$m = 4(m_1 + m_2 + m_3) + m_4 + m_5 + m_6 \tag{7}$$

$$\alpha = \frac{2\pi n}{t} \tag{8}$$

式中　T_1——旋转搬运机构负载扭矩，N·m

J——转动惯量，kg·m^2

α——角加速度，rad/s^2

r——转动半径，取 0.3 m

m——转动底盘总负载，kg

t——时间，s

砧木夹爪和接穗夹爪结构质量分别为 m_1 和 m_2、直线模组质量为 m_3、转动底盘质量为 m_4、气电滑环质量为 m_5、其他固定件质量 m_6 为 6.11 kg。设计要求旋转搬运机构旋转 90°耗时 0.25 s，将以上数据代入式(5)～(8)，得出旋转搬运机构负载扭矩 T_1 为 9.45 N·m。选取 750 W 交流伺服电机，额定转速 3 000 r/min，额定扭矩为 2.39 N·m；选取减速比为 10∶1的中空旋转平台减速机增加扭矩，T_2(23.9 N·m)远大于 T_1，满足旋转搬运机构负载的驱动扭矩需求。

2.4　喷胶机构

喷胶机构包括喷雾阀、胶管、安装板、移动气缸、XY 调节滑台和限位销等，如图 9 所示。喷雾阀通过安装板和移动气缸安装于 XY 调节滑台，通过限位销与移动气缸的位置调整喷胶距离。旋转搬运机构将切削后的砧木和接穗苗搬运至喷胶工位，移动气缸带动喷雾阀下移，将 UV 胶雾化喷至嫁接苗切口外部形成胶膜包覆层。

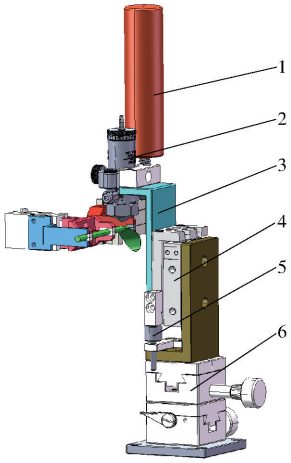


图 9　喷胶机构结构图

Fig. 9　Structure drawing of spraying mechanism

1. 胶管　2. 喷雾阀　3. 安装板　4. 移动气缸　5. 限位销　6. XY 调节滑台

喷胶作业如图 10 所示。选取 Nordson EFD 公司的 781Mini 喷雾阀，需要接入驱动压力、雾化压力和供胶压力 3 路正压气源。驱动压力用于驱动撞针与喷嘴之间形成空腔，供胶压力使胶液进入喷嘴，在雾化压力作用下在喷嘴内部形成压降使胶液雾化成细小液滴，雾化质量影响胶液流动形成的包覆效果。

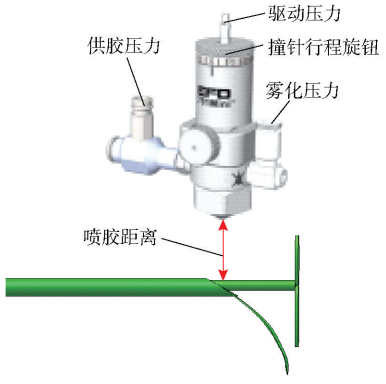


图 10　喷胶示意图

Fig. 10　Schematic of spraying

喷雾阀控制接线包括 3 路调压阀、2 组电磁阀、喷雾阀和控制器等，如图 11 所示。喷雾阀控制器型号为 ValveMate 8040，可精准控制喷胶时间(精度 0.1 s)和 4 路电磁阀输出，并与 PLC 控制器进行 I/O 通讯。2 路调压阀和 2 组电磁阀分别与喷雾阀的驱动压力和雾化压力入口相连，1 路调压阀与胶管相

连。经前期测试,选取医用级别 LOCTITE AA3321 UV 固化胶,其雾化及流动效果较好,为中等粘度透明状液体,密度 1.08×10^3 kg/m^3,布氏粘度 5.5 MPa·s,固化后包裹层具有一定柔韧性,安全性更高。

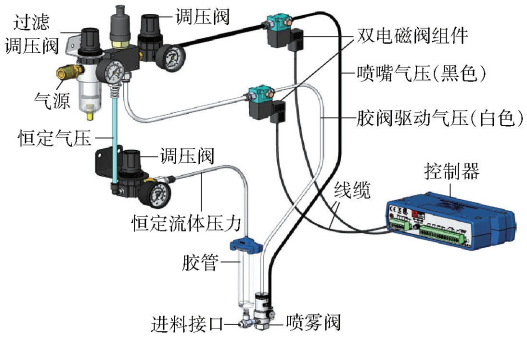


图 11 喷雾阀控制接线图

Fig. 11 Control wiring diagram for spray valve

2.5 固化机构

固化机构包括固化灯、拢苗夹、手指气缸、水平移动气缸和上下移动气缸等,如图 12 所示。固化原理是 UV 胶中的光引发剂吸收紫外光发生化学反应,使其在数秒内由液态转化为固态。固化速度受光强度、波谱分布、照射时间等因素影响。选取 UV 固化灯型号为 HY - UV0003UV,可产生高纯度 365 nm 单色紫外光,照射距离 10 mm,光照强度达 6 000 mW/cm^2,使胶膜在 2 s 内完成快速固化。

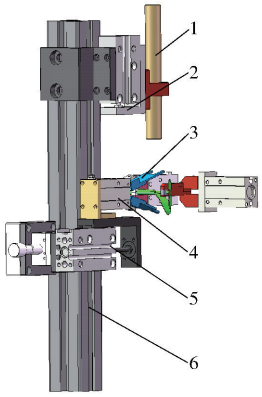


图 12 固化机构结构图

Fig. 12 Schematic of curing mechanism

1. 固化灯 2. 上下移动气缸 3. 拢苗夹 4. 手指气缸 5. 水平移动气缸 6. 支架

由于接穗苗茎并非完全直立,在砧木和接穗切口对接及固化作业时,二者贴合不紧密会影响胶膜固形效果,导致嫁接苗愈合成活率降低。因此,增加了拢苗夹对砧穗切口对接进行压实处理,拢苗上夹对二者施加压力,拢苗下夹托住砧木下部形成压紧力。拢苗过程如图 13 所示。当旋转搬运机构将完成切口对接的嫁接苗搬运至固化工位,拢苗夹伸出并夹持拢住嫁接苗的切口对接外部,确保固化灯开启时对接切口能够紧密贴合,有助于提升胶膜固形稳定性。

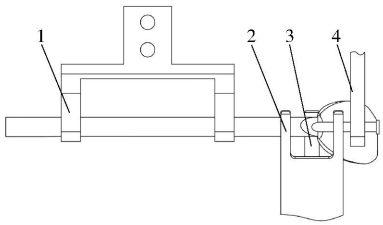


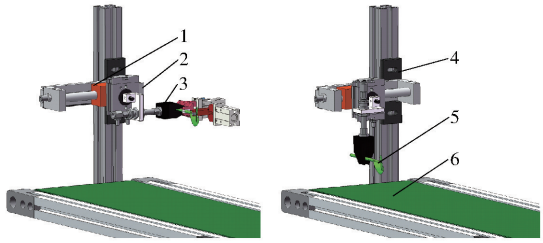
图 13 拢苗过程示意图

Fig. 13 Schematic of holding seedling process

1. 砧木夹爪 2. 拢苗上夹 3. 拢苗下夹 4. 接穗夹爪

2.6 下苗机构

下苗机构包括柔性夹爪、旋转气缸、滑台气缸、连接板和输送带等,如图 14 所示。柔性夹爪与旋转气缸安装在可水平移动的滑台气缸上,当嫁接苗被搬运至下苗工位时,滑台气缸带动张开的柔性夹爪进入砧木夹爪中间茎秆处,柔性夹爪接通负压闭合完成嫁接苗茎部夹持,如图 14a 所示;接着滑台气缸复位旋转气缸顺时针旋转 90°,柔性夹爪接通正压张开释放嫁接苗至输送带,完成下苗作业,如图 14b 所示。



(a) 取苗动作 (b) 下苗动作

图 14 下苗机构结构图

Fig. 14 Schematics of picking seedling mechanism

1. 滑台气缸 2. 旋转气缸 3. 柔性夹爪 4. 连接板 5. 嫁接苗 6. 输送带

瓜类嫁接苗柔嫩、质量轻,下苗机构设计时要求各部件动作柔和,确保对嫁接苗无较大扰动。选取 MC - 20005V 型柔性夹爪,为硅胶材质,内部有花纹可增加摩擦力,提高夹持稳定性。柔性夹爪通过接通气压控制夹指间距,当接通气压在 - 20 ~ 80 kPa 时,夹指间距为 0 ~ 27 mm,可依靠硅胶夹爪的弹性对嫁接苗安全夹持。砧木茎粗范围为 3 ~ 5 mm,柔性夹爪满足取苗要求。

3 试验

3.1 试验材料与设备

选取京欣砧 2 号白籽南瓜(砧木)、京欣 4 号西瓜(接穗)为试验对象。育苗过程为:①浸种催芽。将白籽南瓜种子放入 50℃左右温水中浸泡约 24 h,然后用纱布覆盖种子放入 25℃恒温箱,2 d 后进行播种,接穗浸种方式同砧木。②穴盘播种。砧木和

接穗播种分别选用 50(5×10)和 72(6×12)孔的标准穴盘，将草炭、蛭石、珍珠岩按照比例 1∶1∶1混合搅拌并浇透水，装入穴盘备用，播种深度 10 mm 左右。播种后进行覆土，用于遮光、保湿和保持种子的稳定，覆土后再次浇透水并放入培养箱，温度为 25～28℃，相对湿度为 70%～80%。为保证砧木与接穗嫁接匹配性，接穗比砧木提前 3 d 播种。培育 10～13 d 后，砧木生长至两子叶展平，生长点长度为 10 mm 左右，株高为 65 mm、茎粗为 3 mm 左右；接穗两子叶展平，茎秆直立度较好，株高为 40 mm、茎粗为 2 mm 左右。完成嫁接装置的机械结构组装、调试以及控制系统集成，整体运行状态良好，如图 15 所示。

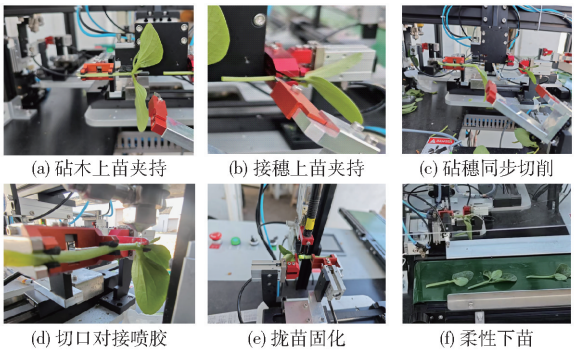


(a) 砧木苗　(b) 接穗苗　(c) 嫁接装置

图 15　试验材料与设备

Fig. 15　Test materials and equipment

嫁接试验流程依次为砧木上苗夹持、接穗上苗夹持、砧穗同步切削、切口对接喷胶、拢苗固化和柔性下苗等，如图 16 所示。



(a) 砧木上苗夹持　(b) 接穗上苗夹持　(c) 砧穗同步切削

(d) 切口对接喷胶　(e) 拢苗固化　(f) 柔性下苗

图 16　嫁接试验流程

Fig. 16　Grafting test process

3.2　试验方法

根据预试验得知雾化压力、供胶压力和喷胶距离是影响喷胶效果的主要因素，通过单因素试验确定了各因素取值范围分别为雾化压力 0.15～0.25 MPa、供胶压力 0.30～0.40 MPa、喷胶距离 2～8 mm。为确定上述三因素对嫁接成功率的影响，利用 Design-Expert 13 软件进行三因素三水平响应面试验设计，共计 17 组试验，每组完成嫁接苗 20 株，统计嫁接成功率。对试验结果进行方差分析、响应面分析、参数优化与试验验证。

试验指标包括嫁接成功率和生产效率。嫁接成功率 Q 是成功完成嫁接苗的数量与嫁接苗作业总数量的比值，即

$$Q=\frac{w_1}{w_2}\times 100\% \tag{9}$$

式中　w_1——嫁接成功苗株数，株

w_2——嫁接苗总株数，株

完成整套嫁接作业流程后，在砧木和接穗切口外部形成固定胶膜，使二者紧密贴合成为一体视为嫁接成功，反之视为嫁接失败。生产效率 η 是在单位时间内完成嫁接苗的数量，即

$$\eta=\frac{w_2}{T} \tag{10}$$

式中　T——嫁接耗时，s

试验各因素编码如表 1 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Test factors and coding

编码	因素		
	雾化压力 x_1/MPa	供胶压力 x_2/MPa	喷胶距离 x_3/mm
-1	0.15	0.30	2
0	0.20	0.35	5
1	0.25	0.40	8

3.3　结果与分析

试验方案与结果统计如表 2 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test protocol and results

试验序号	因素			Q/%
	X_1	X_2	X_3	
1	0	1	1	65
2	0	-1	-1	60
3	-1	1	0	70
4	0	0	0	100
5	1	0	-1	90
6	0	0	0	90
7	0	0	0	95
8	0	0	0	100
9	0	0	0	95
10	-1	0	-1	65
11	-1	-1	0	55
12	0	-1	1	55
13	-1	0	1	70
14	1	1	0	80
15	1	-1	0	70
16	1	0	1	75
17	0	1	-1	75

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行多元回归拟合分析，建立雾化压力 X_1、供胶压力 X_2 和

喷胶距离 X_3 对嫁接成功率 Q 的数学回归模型，二次回归方程为

$$Q = 96 + 6.87X_1 + 6.25X_2 - 3.13X_3 - 1.25X_1X_2 - 5X_1X_3 - 1.25X_2X_3 - 8X_1^2 - 19.25X_2^2 - 13X_3^2 \quad (11)$$

由表 3 可知，嫁接成功率模型 $P < 0.0001$，表明试验数据与模型高度相关，可以运用回归模型来分析试验指标随各因素的变化趋势。模型失拟项 $P > 0.05$，说明模型拟合效果显著、可信度高，可用来预测试验指标。模型的决定系数 R^2 为 0.9797，说明拟合程度较好，校正决定系数调整 R^2 为 0.9536，说明预测值与实际值具有高度相关性。

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 676.69	9	408.52	37.50	<0.0001 **
X_1	378.13	1	378.13	34.71	0.0006 **
X_2	312.50	1	312.50	28.69	0.0011 **
X_3	78.13	1	78.13	7.17	0.0316 *
X_1X_2	6.25	1	6.25	0.5738	0.4735
X_1X_3	100.00	1	100.00	9.18	0.0191 *
X_2X_3	6.25	1	6.25	0.5738	0.4735
X_1^2	269.47	1	269.47	24.74	0.0016 **
X_2^2	1 560.26	1	1 560.26	143.24	<0.0001 **
X_3^2	711.58		711.58	65.33	<0.0001 **
残差	76.25	7	10.89		
失拟项	6.25	3	2.08	0.119	0.9442
纯误差	70.00	4	17.50		
总和	3 752.94	16			

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

各因素对嫁接成功率影响的显著性由大到小为雾化压力 X_1、供胶压力 X_2、喷胶距离 X_3。回归模型中 X_1、X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2 影响极显著，X_3、X_1X_3 影响显著，其他影响不显著。

为进一步探究各因素间的交互作用对嫁接成功率的影响，绘制各因素对嫁接成功率影响的响应曲面，如图 17 所示。当一个因素为定值时，其他两因素交互作用对响应值的响应曲面均为开口向下的凸面，则嫁接成功率存在最大值。交互项中只有 X_1X_3 显著，因此仅就雾化压力与喷胶距离二者的交互作用对嫁接成功率的影响响应曲面进行分析。供胶压力为 0.35 MPa 时，雾化压力与喷胶距离的交互作用对嫁接成功率的响应曲面如图 17b 所示。

雾化压力一定时，嫁接成功率随喷胶距离的增加先缓慢增大后快速减小，变化幅度明显，喷胶距离 3 ~ 6 mm 时，嫁接成功率相对较高。喷胶距离对嫁接成功率的影响程度随雾化压力的增加而增大。原因是随着喷胶距离增加，胶液从喷嘴至嫁接苗的时间增加，致使胶液有充分的雾化时间增大包覆面积，所以嫁接成功率增大。当喷胶距离过大时，雾化范围过大导致胶膜厚度减小不足以固定嫁接苗，所以嫁接成功率下降。

喷胶距离一定时，嫁接成功率随雾化压力的增加而增大，增长逐渐平缓后出现减小趋势，变化幅度较为明显且雾化压力显著性大于喷胶距离，二者交互作用显著，雾化压力 0.19 ~ 0.23 MPa 时，嫁接成功率相对较高，原因是随着雾化压力增加，喷嘴雾化范围增大致使胶膜覆盖率增加，所以嫁接成功率升高。但随着雾化压力不断增加，雾化范围过大致使胶膜厚度减小，包覆稳定性降低，导致嫁接成功率下降。雾化压力对嫁接成功率的影响程度随喷胶距离增加而减小。结合图 17a、17c，当供胶压力 0.34 ~ 0.38 MPa 时，嫁接成功率存在最大值。

3.4 优化与验证

为了获得最佳喷胶参数组合，利用 Design-Expert 13 中 Optimization 模块对上述二次回归模型进行分析与优化求解，优化目标是提高嫁接成功率，目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Q(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

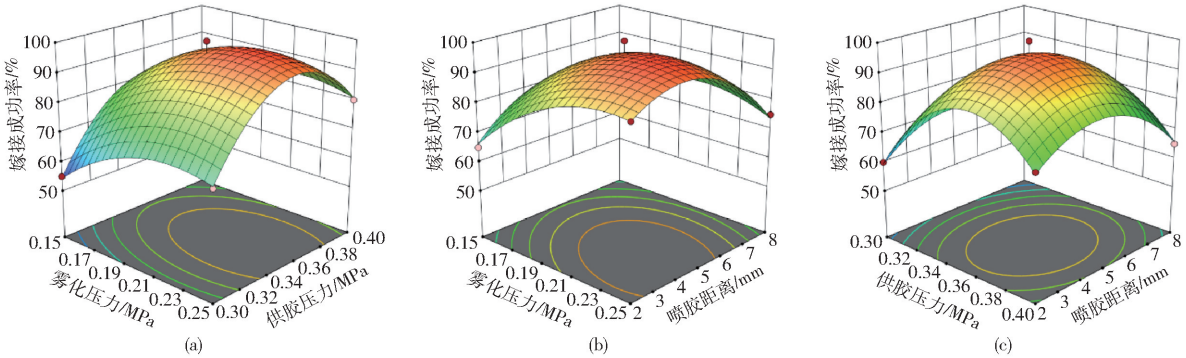


图 17 各因素间交互作用对嫁接成功率的影响

Fig. 17 Effects of interaction between various factors on grafting success rate

优化结果显示，当雾化压力为 0.22 MPa、供胶压力为 0.35 MPa、喷胶距离为 4.33 mm，能够获得最高嫁接成功率，为 98.49%。为检验上述试验优化结果的实际应用效果和准确性，进行 3 组验证试验，每组完成嫁接苗 25 株，统计嫁接成功率和生产效率，如表 4 所示。

表 4　验证试验结果

Tab. 4　Verification test results

序号	数量/株	嫁接成功率/%	嫁接耗时/s	生产效率/(株·h^{-1})
1	25	96	155.5	578
2	25	100	159.7	563
3	25	96	152.6	589
平均值	25	97.34	155.93	576

在最优组合参数下实际平均嫁接成功率为 97.34%，与理论值相差 1.15 个百分点，二者基本吻合，模型预测结果准确。平均生产效率达 576 株/h，符合机械嫁接生产要求。表 4 中试验 1、3 的嫁接成功率均未达 100%，原因是个别砧木和接穗形态尺寸不标准导致二者切口对接发生错位，使胶膜固化包覆效果下降。另外，本文设计的嫁接装置仅需 1 人完成砧木和接穗上苗作业，上苗耗时约 6 s，对接喷胶、拢苗固化和下苗作业耗时均小于 3 s，因此，通过增加 1 组夹持机构与对接模块，将 1 人上苗改进为双工位 2 人上苗，能够实现砧木和接穗同步上苗，生产效率可提高至 1 200 株/h 左右，达到国内外同类设备技术水平。

4　结论

(1)提出了一种 UV 胶包覆固定切口式嫁接装置及方法，设计了夹持机构、切削机构、旋转搬运机构、喷胶机构、固化机构以及下苗机构等关键部件，并确定了各机构结构参数，实现了上苗切削、对接喷胶、拢苗固化和下苗工序同步自动作业。

(2)选取白籽南瓜(砧木)与西瓜(接穗)为嫁接试验对象，以雾化压力、供胶压力和喷胶距离为影响因素，嫁接成功率为试验指标，进行三因素三水平响应面试验，得出各因素对嫁接成功率影响由大到小为雾化压力、供胶压力、喷胶距离，回归模型拟合度较好。

(3)以嫁接成功率最高为优化目标，对试验结果的回归模型进行优化求解，得出最优喷胶参数组合为雾化压力 0.22 MPa、供胶压力 0.35 MPa 和喷胶距离 4.33 mm，理论嫁接成功率为 98.49%。验证试验结果表明，平均嫁接成功率为 97.34%，与理论值相差仅为 1.15 个百分点，理论与实际基本吻合，平均生产效率为 576 株/h，能够满足机械嫁接作业质量要求。

参　考　文　献

[1] CHEN S, FENG Q, KAN Z, et al. Achieving optimal cutting results for melon rootstock: precision linear cutting and parameter simulation optimization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109883.

[2] 安民,曹姗姗,孙伟,等. 我国蔬菜产业市场运行态势研究[J]. 中国蔬菜,2024(2):6-13.
AN Min, CAO Shanshan, SUN Wei, et al. Research on the market operation situation of China's vegetable industry[J]. China Vegetables, 2024(2): 6-13. (in Chinese)

[3] 张若愚,葛宜元,陈栋,等. 基于机器视觉的白籽南瓜种子几何特征识别方法[J]. 中国农机化学报,2024,45(12):175-180.
ZHANG Ruoyu, GE Yiyuan, CHEN Dong, et al. Geometric feature recognition method of white-seeded pumpkin seeds based on machine vision[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 175-180. (in Chinese)

[4] JIANG K, GUO W, CHEN L, et al. Design and experiment of automatic clip-feeding mechanism for vegetable-grafting robot [J]. Agriculture, 2022, 12: 346.

[5] CHEN S, LIANG H, ZHANG Q, et al. Melon robotic grafting: a study on the precision cutting mechanism and experimental validation[J]. Agriculture, 2023, 13: 2139.

[6] CHEN S, JIANG K, ZHENG W, et al. Adaptive precision cutting method for rootstock grafting of melons: modeling, analysis, and validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218:108655.

[7] KOBAYASHI K, FUJII M, OHKOSHI T. Development of automatic seedling feeding mechanism for grafting robot for cucurbits [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2011, 73(1): 57-64.

[8] KANG D H, LEE S Y, KIM J K, et al. Development of an automatic grafting robot for fruit vegetables using image recognition [J]. Prot. Hortic. Plant Fact, 2019, 28: 322-327.

[9] XU P, ZHANG T, CHEN L, et al. Study on the method of matched splice grafting for melon seedlings based on visual image [J]. Agriculture, 2022, 12: 929.

[10] 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.

[11] 赵春江,范贝贝,李瑾,等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. 智慧农业(中英文),2023,5(4):1-15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Progress, challenges and trends of agricultural robotics[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 1-15. (in Chinese)

[12] 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)
[13] 李军,张铁中,褚佳,等. 全自动整排蔬菜嫁接机嫁接夹输送机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):14 - 20.
LI Jun, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. Design and test of grafting clamp conveying mechanism of automatic whole row vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 14 - 20. (in Chinese)
[14] 杨丽,刘长青,张铁中. 双臂蔬菜嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(9):175 - 181.
YANG Li, LIU Changqing, ZHANG Tiezhong. Design and test of double-arm vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 175 - 181. (in Chinese)
[15] 杨艳丽,李恺,初麒,等. 斜插式嫁接机砧木子叶气吸夹结构及作业参数优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(4):25 - 31.
YANG Yanli, LI Kai, CHU Qi, et al. Air suction clamp structure of rootstock cotyledons for inclined inserted grafting machine and its optimized experiment of operation parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 25 - 31. (in Chinese)
[16] 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.
[17] 姜凯,张骞,陈立平,等. 砧木上苗定位机构吸附块仿真设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2020,36(18):73 - 80.
JIANG Kai, ZHANG Qian, CHEN Liping, et al. Simulation design and performance test of adsorption block of seedling positioning mechanism on rootstock[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 73 - 80. (in Chinese)
[18] JIANG K, ZHANG Q, CHEN L, et al. Design and optimization on rootstock cutting mechanism of grafting robot for cucurbit [J]. International Journal of Agricultural Biological Engineering, 2020, 13(5): 117 - 124.
[19] 姜凯,陈立平,张骞,等. 蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):63 - 71.
JIANG Kai, CHEN Liping, ZHANG Qian, et al. Design and test of flexible clamping and handling mechanism of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 63 - 71. (in Chinese)
[20] WU K, LOU J, LI C, et al. Experimental evaluation of rootstock clamping device for inclined inserted grafting of melons[J]. Agriculture, 2021, 11: 736.
[21] 楼建忠,吴康,陈骏炀,等. 瓜类蔬菜斜插式嫁接砧木子叶自适应压持机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18):76 - 82.
LOU Jianzhong, WU Kang, CHEN Junyang, et al. Design and experiment of adaptive pressing mechanism of cotyledons of melon and vegetable oblique grafting rootstock[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 76 - 82. (in Chinese)
[22] 楼建忠,李建平,朱盘安,等. 斜插式蔬菜嫁接机砧木夹持机构研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(7):30 - 35.
LOU Jianzhong, LI Jianping, ZHU Pan'an, et al. Development and test of rootstock clamping mechanism of oblique vegetable grafting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 30 - 35. (in Chinese)
[23] 杨安,童俊华,洋金辉,等. 瓜类嫁接机上苗定位夹持装置的设计[J]. 农机化研究,2017,39(6)129 - 134.
YANG An, Tong Junhua, PAN Jinhui, et al. Design of seedling positioning and clamping device on melon grafting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6): 129 - 134. (in Chinese)
[24] 童俊华,丁煜华,武传宇,等. 单人工上苗式半自动蔬菜嫁接机关键机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10): 65 - 72.
TONG Junhua, DING Yuhua, WU Chuanyu, et al. Design and test of key mechanism of single artificial seedling semi-automatic vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 65 - 72. (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 test 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] LIU Z, ZHOU W, WANG F, et al. Advanced design and performance evaluation of an automatic synchronized grafting machine for solanum vulgare[J]. Processes, 2025, 13: 131.
[27] 王家胜,张梅,高春凤,等. 茄科蔬菜多株同步自动嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6):38 - 45.
WANG Jiasheng, ZHANG Mei, GAO Chunfeng, et al. Design and test of multi-plant synchronous automatic grafting machine for solanaceae vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 38 - 45. (in Chinese)
[28] ZHANG X, KONG L, LU H, et al. An original UV adhesive watermelon grafting method, the grafting device, and experimental verification[J]. Horticulturae, 2024, 10: 365.