

茄果类蔬菜离盘式全自动嫁接机设计与试验

郇晓龙^{1,2} 王强¹ 陈佳峰³ 童俊华^{1,2} 廖荣强¹

(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. 杭州赛得林智能装备有限公司, 杭州 311418)

摘要: 针对人工嫁接效率低、成本高、市场上缺乏能满足国内生产要求的嫁接设备等问题, 本文设计一种茄果类蔬菜种苗离盘式全自动嫁接机, 可自动完成种苗上苗、接穗预切削、种苗夹持、种苗多株同步切削、对接上夹和种苗回栽等作业。阐述了嫁接机结构组成和工作原理, 设计了上苗、运输、预切削、夹持、切削、上夹等关键机构及作业参数; 为确定最佳工作参数提高嫁接成功率, 使用番茄、辣椒、茄子穴盘苗为试验对象, 选取预切削后砧木高度、接穗对接下降高度、接穗高度、接穗对接下降速度为试验因素, 以嫁接成功率为评价指标, 开展四因素三水平响应面试验, 得出接穗对接下降高度、接穗对接下降速度为影响嫁接成功率的显著因素。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。试验结果表明, 当预切削后砧木高度为 70 ~ 80 mm、接穗对接下降高度为 75 mm、接穗高度为 140 ~ 160 mm、接穗对接下降速度为 0.2 m/s 时, 平均嫁接成功率为 94.6%, 平均嫁接效率为 1 110 株/h, 满足茄果类蔬菜种苗批量化嫁接作业需求。

关键词: 茄果类蔬菜; 嫁接机; 全自动嫁接; 响应面分析

中图分类号: S233.74 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0099-11

OSID:



Design and Testing of Fully Automatic Disc-type Grafting Machine for Solanaceous Vegetables

HUAN Xiaolong^{1,2} WANG Qiang¹ CHEN Jiafeng³ TONG Junhua^{1,2} LIAO Rongqiang¹

(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 Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311418, China)

Abstract: Aiming to address issues such as low efficiency, high costs, and the lack of grafting equipment meeting domestic production requirements in the market, a fully automatic seedling-off-tray grafting machine was designed. It can automatically complete operations, including seedling loading, scion pre-cutting, seedling clamping, simultaneous multi-seedling cutting, scion alignment and clamping, and seedling replanting. The structure and working principle of the grafting machine were detailed, with key mechanisms and operational parameters designed for seedling loading, transportation, pre-cutting, clamping, cutting, and clamp application. To determine optimal parameters and enhance grafting success rates, tomato, peppers, and eggplants as test subjects. The factors selected for investigation were the height of the rootstock after pre-cutting, the descent height of the scion during alignment, the height of the scion, and the descent speed of the scion during alignment. Grafting success rate served as the evaluation metric. A four-factor, three-level response surface experiment was conducted, revealing that the descent height and descent speed of the scion during alignment were significant factors affecting grafting success rate. Design-Expert 13 software was employed for variance analysis, response surface analysis, parameter optimization, and experimental validation to obtain the optimal parameter combination. Experimental results indicated that when the pre-cut rootstock height was 70 ~ 80 mm, scion

收稿日期: 2025-12-03 修回日期: 2025-12-31

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(24242211-Y)

作者简介: 郇晓龙(1995—),男,助理研究员,博士,主要从事现代农业机械设计 with 试验研究, E-mail: huanxl@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

descent height was 75 mm, scion height was 140 ~ 160 mm, and scion descent speed was 0.2 m/s, the average grafting success rate reached 94.6% with an average grafting efficiency of 1 110 plants per hour, meeting the demands for large-scale grafting operations of solanaceous vegetable seedlings.

Key words: fruit and vegetable; grafting machine; fully automatic grafting; response surface analysis

0 引言

现代蔬菜种植趋于集约化,普遍具有单一作物连作、复种指数高等特点,极易引发连作障碍^[1-2],导致作物减产,从而制约设施农业可持续发展。嫁接能有效增强蔬菜作物抗逆性^[3-4],在连作障碍、病虫害等问题日趋严重的背景下,嫁接已成为保障设施农业稳产高产的重要途径^[5-6]。目前,国内蔬菜嫁接生产仍以人工作业为主,普遍存在作业效率低、劳动成本高、嫁接成活率不稳定等问题^[7-8],严重限制了蔬菜种苗批量化嫁接作业。采用机械装备开展嫁接作业已成为提升嫁接品质与速率的必然要求,但现有嫁接设备工作效率低^[9-10]。因此,亟需研发高效、稳定的自动化嫁接设备,实现种苗高质量、规模化嫁接。

国外嫁接机研究起步较早,自 20 世纪 80 年代日本、韩国、荷兰等国先后投入到嫁接机研究^[11]。日本于 1992 年研发 MGM600 型茄果类全自动嫁接机^[12-13],通过传送带完成单列种苗运输上苗,并使用套管固定,实现单株种苗嫁接作业,但效率较低,约为 600 株/h。在 2004 年韩国 Helper Robotech 公司研发的 GR-800CS 型半自动嫁接机^[14-15],在 2 人上苗后由机器自动完成后续嫁接作业,效率约为 800 株/h,但无法实现全流程自动化作业。ISO Group 为荷兰嫁接机研发的代表性公司,并于 2007 年研制出 Graft1000 型全自动嫁接机^[16-17],整机使用平接法完成对种苗嫁接,并使用套管进行接面固定,同时配备图像处理技术,可完成嫁接幼苗筛选任务并配合相应机构对不合格种苗进行剔除,效率约为 1 000 株/h,但价格昂贵且并不适应我国嫁接农艺要求。

国内对嫁接机研究起步较晚,大多机型仍处于试验样机阶段^[18]。李军等^[19]研制了 2JSZ-600 型等半自动嫁接机,采用旋切贴合方法进行嫁接,嫁接速度为 600 棵/h,嫁接成活率为 95%。姜凯等^[20]设计的 UV 胶包裹式瓜类嫁接机,可自动完成瓜类蔬菜嫁接作业且使用 UV 胶固定对接面,成功率为 97.34%,效率达 576 株/h。李兴等^[21]开发的全自动针接式嫁接机,采用整排作业模式,理论效率达 1 000 株/h,成功率为 90% 左右。姜凯等^[22]研制 2JT-800 型嫁接机,由 2 人操作,采用双旋转臂方

式搬运幼苗,效率达 800 株/h,成功率为 95%。初麒等^[23]开发的 2JC-600 型插接式瓜类半自动嫁接机,提出基于负压吸附砧木子叶定位方法,提高了嫁接成功率,效率达 600 株/h。王家胜等^[24]研发了对称式单株全自动嫁接机,在 PLC 控制下可自动完成上苗、切削、对接等嫁接流程,成功率为 94.8%,效率达 300 株/h。周海丽等^[25]研发了茄果类立式半自动嫁接机,采用六工位设计,在单人上苗后机器自动完成其余嫁接流程,成功率为 97.3%,效率达 717 株/h。综上,目前国内嫁接机大多为半自动嫁接机,而全自动嫁接机多为单株自动嫁接机,作业效率仍需提升,且多为试验样机。

本文设计茄果类蔬菜种苗离盘式多株全自动嫁接机及关键部件,以番茄、辣椒、茄子穴盘苗为试验对象,进行嫁接机嫁接性能试验、参数优化及试验验证,以期为全自动嫁接机研制提供理论基础和技术支撑。

1 离盘式全自动嫁接机组成与原理

根据茄果类种苗嫁接农艺要求与人工贴接嫁接流程,设计了一种茄果类蔬菜离盘式全自动嫁接机,如图 1 所示。按工序分为上苗工位、接穗预切削工位、种苗夹持工位、嫁接夹布料取夹工位、回栽工位,整机工艺与工位如图 2 所示。

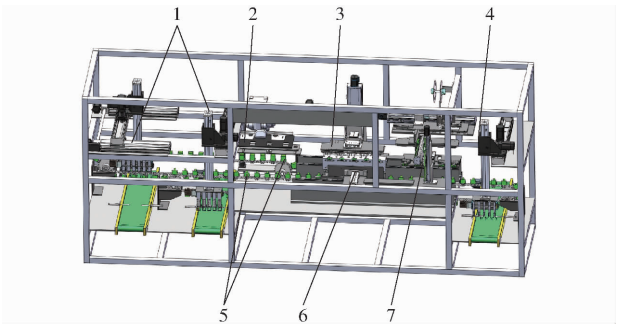


图 1 茄科离盘式全自动嫁接机整机结构图
Fig.1 Structure diagram of solanaceae disc-type fully automatic grafting machine

1. 种苗上苗装置 2. 接穗预切削装置 3. 种苗夹持装置 4. 嫁接苗回栽装置 5. 种苗运输装置 6. 种苗多株同步切削装置 7. 多路布料取上夹装置

嫁接机工作流程为:①由人工在上苗传送带放上经预切削后的砧木苗(即去除砧木上半部分子叶)、接穗苗,并在回栽传送带放置空穴盘,由种苗上苗装置将种苗转移至种苗运输装置中。通过嫁接

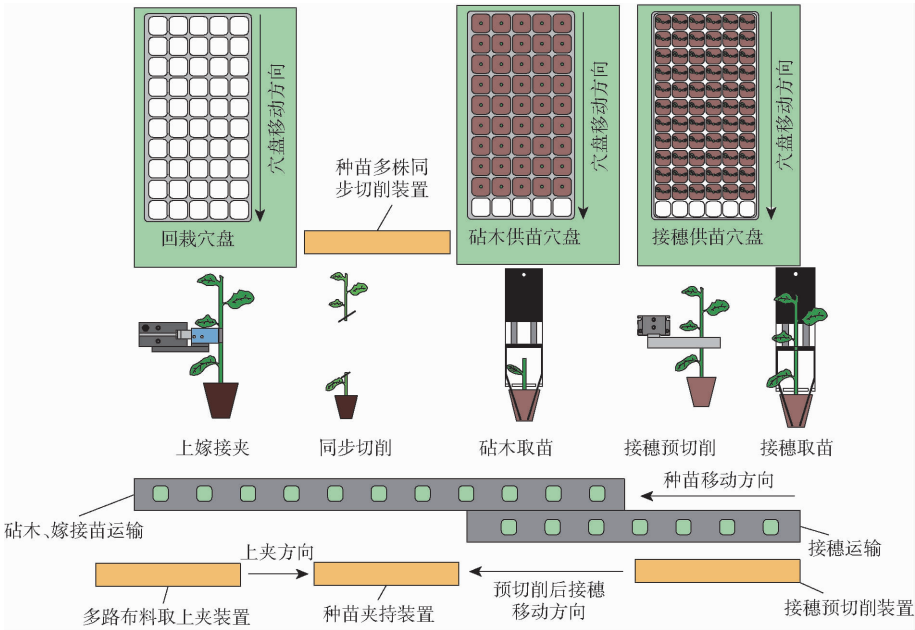


图 2 嫁接机工艺与工位分布示意图

Fig. 2 Schematic of grafting machine process and workstation layout

夹布料将长条状嫁接夹分为 5 小段并使其限位。
②种苗运输装置将种苗运输至种苗夹持工位,在运输作业结束时嫁接夹布料作业结束。
③对 5 株接穗进行预切割作业,并将其余部分运至夹持工位。
④种苗夹持装置作业夹持已完成预切割的种苗。
⑤多路布料取上夹装置到达取夹位置完成取夹作业。
⑥在取夹作业同时,由切割装置将种苗切出 30°斜切面,后接穗夹持机构下降进行对接,同时取上夹机构开始运动(其中取上夹机构驱动上夹末端下降与种苗对接同步进行)。
⑦取上夹机构到达上夹位置完成上夹作业,固定住对接完成的种苗。同时进行下一嫁接循环的上苗、布料作业。
⑧完成下一嫁接循环的种苗运输作业。
⑨回栽机构作业将第 1 个循环的种苗码盘至空穴盘。重复上述流程完成批量化种苗自动嫁接作业。

2 关键机构设计

2.1 种苗上苗与运输装置

种苗运输装置如图 3 所示。种苗运输装置需将种苗进行单株连续运输至工作位置,选用链轮链节为 12A 系列。为使种苗在运输时保持稳定且种苗之间互不影响,每隔 3 个链节(114 mm)安装种苗转运杯,并在转运杯中开设一仿种苗基质外形的凹槽,当上苗作业结束后,伺服电机驱动主动轮旋转,完成种苗运输作业。

种苗上苗装置如图 4 所示,包括砧木上苗装置与接穗上苗装置,上苗装置可将种苗从穴盘中取出,并转移至种苗运输装置中,为嫁接机其他工作部件提供种苗。

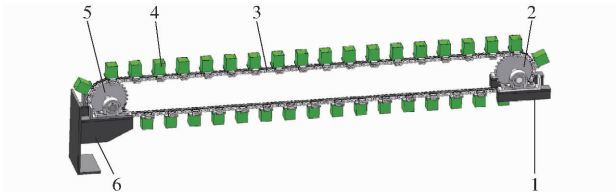


图 3 种苗运输装置

Fig. 3 Seedling transport device

1、6. 支架 2. 主动轮 3. 链条 4. 种苗转运杯 5. 从动轮

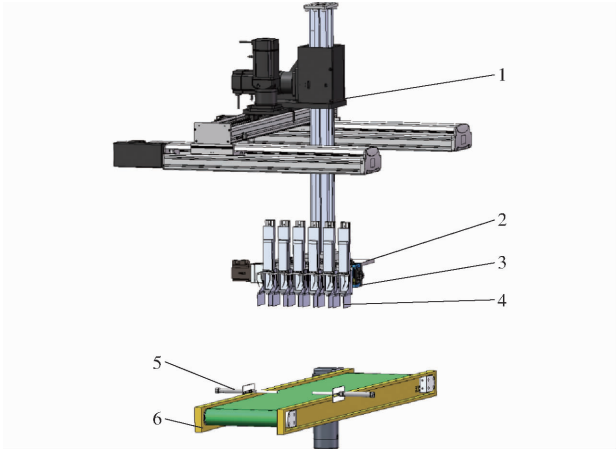


图 4 种苗上苗装置

Fig. 4 Seedling transplanting device

1. 直线模组 2. 变距模组安装板 3. 穴盘变距模组 4. 上苗末端 5. 穴盘限位机构 6. 种苗传送带

砧木上苗装置选 50 孔砧木苗为作业对象,接穗苗装置选 72 孔接穗苗为作业对象。而 50 孔穴盘两相领穴孔中心距为 51.5 mm,72 孔穴盘两相领穴孔中心距为 43.7 mm,为满足不同穴盘取苗需求,通过变距模组使安装的上苗末端间距在 51.5 ~ 114 mm 与 43.7 ~ 114 mm 之间变化。

取苗作业时,首先由人工在传送带放置穴盘苗,传送带作业将穴盘苗首行运输到工作位置时,光电开关感应到穴盘,传送带停止同时穴盘限位机构作业完成限位,直线模组带动上苗末端整体移动到取苗位置完成首行取苗,后直线模组带动上苗末端移动到上苗位置同时变距模组作业使每两上苗末端间距为 114 mm 完成上苗作业,最后机器复位,穴盘苗前进一穴孔的距离,重复上述流程,依次完成整个穴盘苗上苗工作。

为避免夹茎式取苗对种苗损伤过大导致嫁接成活率下降,设计了一种上苗末端,结构如图 5 所示。上苗末端取苗时,上苗气缸带动 2 上苗爪片尾部逐渐穿过导向板上 4 个导向孔向下运动,2 上苗爪片向内弯曲收缩将基质包裹,完成取苗;且在上苗末端两侧安装上苗限位片,便于取苗时与穴孔进行定位。

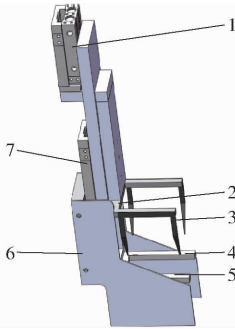


图 5 上苗末端
Fig. 5 Top of seedling

1、7. 上苗气缸 2. 爪片固定板 3. 上苗爪片 4. 导向板 5. 导向孔 6. 上苗限位片

为探明爪片夹持力能否完成种苗取苗,对收缩后的爪片进行受力分析,上苗爪片受力情况如图 6 所示。

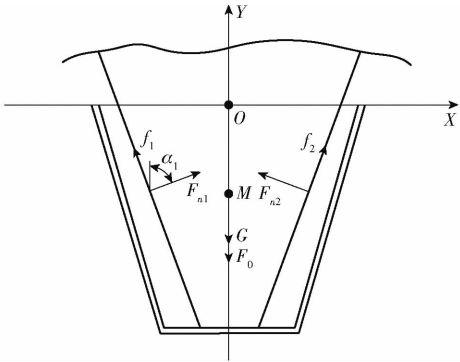


图 6 种苗取苗受力分析
Fig. 6 Force analysis during seedling removal

由图 6 得

$$\begin{cases} 2(f_1 + f_2) \sin \alpha_1 + 2(F_{n1} + F_{n2}) \cos \alpha_1 \geq G + F_0 \\ f_1 \sin \alpha_1 - f_2 \sin \alpha_1 = F_{n1} \cos \alpha_1 - F_{n2} \cos \alpha_1 \\ f_1 = \mu F_{n1} \\ f_2 = \mu F_{n2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_1, f_2 ——基质与爪片间摩擦力, N
 F_{n1}, F_{n2} ——爪片对基质夹持力, N
 F_0 ——取苗时受到的阻力, N
 α_1 ——插入角, ($^\circ$)
 G ——种苗重力, 取 1 N
 μ ——基质与爪片间摩擦因数, 取 0.223^[26]

假设基质材料均匀且忽略盘根影响,则易知基质在两侧受到爪片对称力作用,可得

$$\begin{cases} F_{n1} = F_{n2} \\ f_1 = f_2 \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得,种苗取苗时所受作用力应满足

$$4F_{n1}(\mu \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1) \geq G + F_0 \quad (3)$$

由于穴孔凹槽倾角为 75.97° ,爪片在取苗时其弯曲角度需尽量贴合穴孔避免损伤根系且需大于穴孔倾角,因此设计爪片参数插入角为 76° 。缪小花等^[27]使用万能试验机测试穴盘苗取苗时受到的阻力,最大值为 2.54 N,因此 F_0 取 2.54 N。由式(3)计算当爪片对基质夹持力大于 1.93 N 时可成功取苗。且 50 孔与 72 孔穴盘穴孔深度分别为 50、40 mm,在取苗时由 2 个气缸作业驱动爪片完成取苗,为覆盖 2 种穴孔同时为爪片取苗提供足够的作用力,选用 HLQ6 × 30S 型气缸进行取苗。爪片选用 65Mn 材质并经热处理,弹性模量为 2.1×10^{11} Pa,在工作气压 0.7 MPa 下气缸拉力为 12.6 N,经计算求得此时爪片对基质夹持力为 3.2 N,能够成功取苗。

嫁接苗回栽装置作业原理、结构组成与种苗上苗装置类似,其作用为将已完成嫁接的种苗从种苗运输装置中取出并转移至 50 孔穴盘中,此处不再赘述。

2.2 接穗预切削装置

在对砧、穗木夹持前需将接穗进行预切削(即剪切并去除接穗下半部分)并将完成预切削的接穗苗运输至接穗夹持装置中,接穗预切削装置结构如图 7 所示。在完成种苗上苗后,预切运苗部件作业带动预切部件运动到达工作位置后,预切部件对接穗进行预切削。预切部件上安装有 5 个预切末端,每两相邻末端间距为 114 mm。预切末端由薄型气动手指、夹切块组成,其中夹切块中开设一刀槽,在刀槽安装一个美工刀片,且在夹切块上设有 12 个圆弧形凹槽,当预切末端工作,薄型气动手指作业驱动 2 夹切块间距逐渐减小同时带动美工刀片向中间移动,完成对接穗的切削并将切下的接穗夹持在圆弧形凹槽中。由于接穗预切位置为基质上表面上方 50 mm 处茎秆,这高度下茄子、辣椒、番茄茎秆直径大多为 3.1 ~ 4 mm,将凹槽半径设置为 1.5 mm。

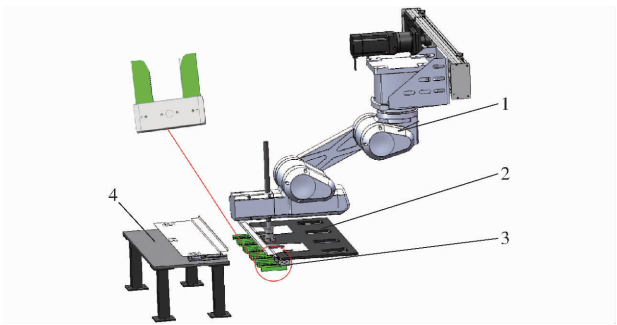


图 7 接穗预切削装置

Fig.7 Pre-cutting device for scions

1. 预切运苗部件 2. 预切部件 3. 预切末端 4. 预切限位机构

由于种苗生长特性可能会出现弯曲过大降低接穗预切削成功率,因此设计预切限位机构对接穗苗进行限位,由预切限位双轴气缸、接穗预切限位挡板等组成,当 5 株接穗苗由运输装置运至预切工作位置时,双轴气缸作业带动穗预切限位挡板向前运动与预切部件上安装的限位挡板共同完成接穗苗前后限位。

2.3 种苗夹持装置

种苗夹持装置分为接穗夹持机构与砧木夹持机构,结构如图 8 所示。在砧、穗木到达夹持位置后,夹持双轴气缸推动砧木、接穗夹持部件向种苗运输装置中砧木与接穗预切削装置中接穗运动,使砧、穗木进入种苗夹持末端的夹持范围后,夹持末端作业完成种苗夹持作业。而砧木、接穗夹持部件包括诸多零部件具有一定的负载,为保持夹持部件工作稳定性,选用亚德客 TR20 × 40S 型双轴气缸,在气压 0.7 MPa 下推力为 219.9 N。由于砧木夹持位置为基质上表面上方 40 mm 处茎秆,经测量茎秆中心距穴孔中心存在 0 ~ 10 mm 偏移,因此选用亚德客 HFD6 × 30S 型夹持末端气缸,同时在夹持末端夹持块中安装硅胶垫实现柔性夹持,减小茎秆损伤的同时提升夹持末端夹持成功率。在切削结束后须完成种苗对接,接穗夹持机构处于砧木夹持机构正上方,种苗对接时接穗由上而下与砧木贴合。

2.4 种苗多株同步切削装置

在砧、穗木由种苗夹持装置完成夹持后,设计可同时完成 5 株接穗与 5 株砧木切削作业的种苗多株同步切削装置,将预切后砧、穗木切出合适角度的切面,以增大砧、穗木贴合面积,提高嫁接苗存活率,如图 9 所示。

为最大限度使砧、穗木切面一致,保证切削后种苗有最佳的贴合率,设计切削限位机构对种苗进行限位,其由切苗限位板、推进气缸、限位气缸、切削限位末端组成。当种苗完成夹持后,推进气缸带动切削限位末端运动,使种苗夹持装置中砧、穗木茎秆进

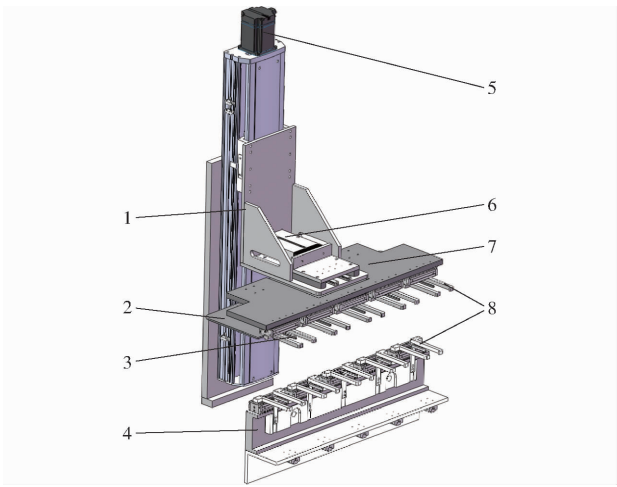


图 8 种苗夹持装置

Fig.8 Seedling clamping device

1. 接穗夹持机构 2. 夹持限位板 3. 接穗限位块 4. 砧木夹持机构 5. 伺服电机 6. 夹持双轴气缸 7. 接穗夹持部件 8. 种苗夹持末端

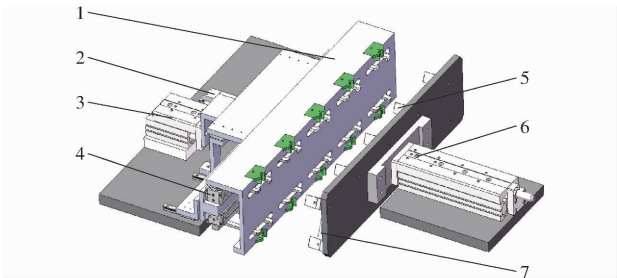


图 9 多种苗多株同步切削装置

Fig.9 Multi-plant simultaneous cutting device for seedlings

1. 切苗限位板 2. 推进气缸 3. 限位气缸 4. 切削限位末端 5. 切削刀片 6. 切削气缸 7. 切削刀架

入切削限位末端夹持范围,选用 HFD6 × 30S 型气缸保证种苗成功夹持,后切削限位末端作业完成种苗左右限位,限位气缸带动切苗限位板运动,使种苗茎秆最大程度与切苗限位板表面相切,使砧、穗木中心线在一条铅垂线上,完成种苗切削限位。后由切削气缸带动 10 把切削刀片运动将种苗切削出一致的切面。

种苗多株同步切削装置上部 5 把切刀作业对象为接穗,下部 5 把切刀作业对象为砧木,其中同一排相邻 2 把切削刀片之间的距离为 114 mm;竖直方向上 2 把切削刀片安装在同一同步切削刀架上,且处于同一铅垂线上。为分析砧、穗木同步切削时满足切削要求的刀具参数,建立砧、穗木切削几何模型,如图 10 所示。

由图 10 可得

$$l_2 = l_{BC} + 2l_1 \quad (4)$$

$$l = l_3 + 2l_4 + l_2 \quad (5)$$

$$l_{AB} = \frac{l_{BC}}{\cos\beta} \quad (6)$$

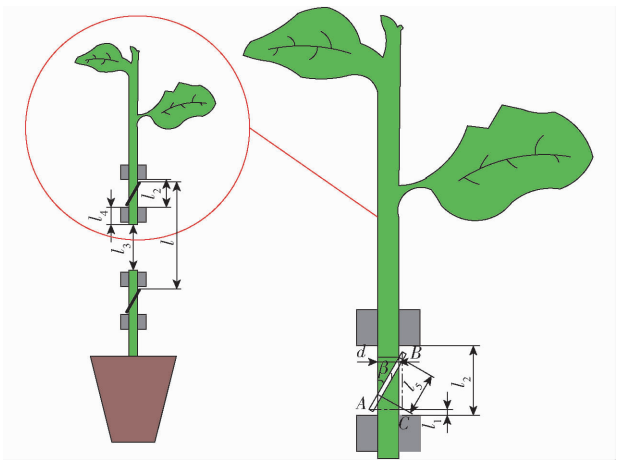


图 10 砧、穗木切削模型

Fig. 10 Rootstock and scion cutting model

式中 l ——两切刀的垂直距离, mm
 l_1 ——切刀与夹持块最小距离, mm
 l_2 ——两夹持块间最小距离, mm
 l_3 ——砧、穗木切削前最小距离, mm
 l_4 ——切削前切削限位夹持块距砧、穗木切面最大距离, mm
 l_{BC} ——刀片倾斜时上端到下端垂直距离, mm
 l_{AB} ——刀片长度, mm
 β ——切削角度, ($^{\circ}$)

FU 等^[28]取 β 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 和 40° 分别进行了多组切削试验,最终得出当砧、穗木切面为 30° 时有较高的切口面积与种苗存活率,因此确定切削角度为 30° 。为便于切削限位机构对种苗进行限位,应尽量减小两夹持块间最小距离避免种苗过度倾斜,故将其设计为 19 mm;同时为预留足够的空间便于刀片进行切削,取 l_1 为 2 mm。已知 $l_4 = 8$ mm; $l_3 = 39$ mm,代入式(5)、(6)解得两切刀垂直距离为 74 mm,刀片长度为 17.3 mm,为便于加工,设计切刀长度为 17 mm,满足种苗同步切削要求。

在切削前使用夹持末端与限位末端对种苗进行限位,使种苗在切削时保持竖直状态,且在两末端夹持中间对种苗切削,避免了种苗因切削发生弯曲导致的切面平整度下降。假设种苗为刚性且完全垂直,则切削时切面为椭圆形,切口长度为椭圆长轴,长轴长度为种苗直径除以切削角正弦值。由于茎秆本身存在一定弯曲,在切削时切口长度会发生变化,因此以种苗切削时切口长度相对于刚性且完全垂直的种苗切口长度变化程度表示种苗切削平整度,计算式为

$$\Delta = \left(1 - \frac{|l_5 - 2d|}{2d} \right) \times 100\% \tag{7}$$

式中 d ——刚性且完全垂直种苗直径, mm

l_5 ——实际切削时种苗切口长度, mm

切削刀片、切削刀架与连接件质量大约为 1 kg, 切削气缸选用 HLQ25 $\times$ 150 型,切削时气缸带动刀片进行初速度为 0 的匀加速运动 150 mm 完成切削。经试验发现,切削速度会影响切削平整度,而工作气压与切削速度成正比,切削气缸工作气压为 0.3 ~ 0.7 MPa。由亚德客选型手册当切削气缸工作压力 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa 时,推力分别为 295、393、491、589、687 N,由于刀片做匀加速运动,忽略空气阻力,经计算切削速度为 9.41、10.86、12.14、13.29、14.36 m/s。

为探明切削速度对平整度的影响,将切削气缸工作气压调至 0.3 ~ 0.7 MPa 进行试验,每种气压进行 10 次试验,统计平整度,试验时使用直径为 3 mm 的种苗,试验结果如图 11 所示。试验结果表明,当种苗切削速度越快时种苗切面平整度越大,因此切削气缸使用 0.7 MPa 对种苗进行切削。

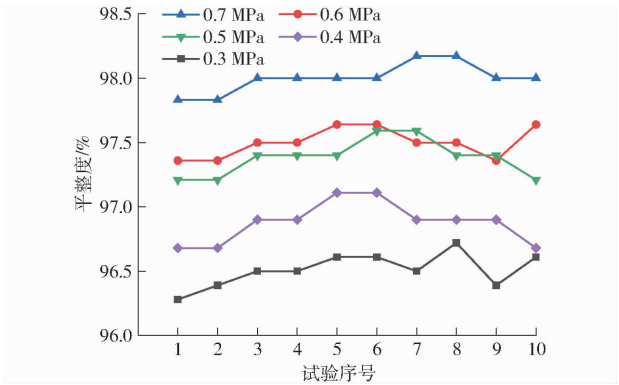


图 11 种苗切削平整度试验结果

Fig. 11 Seedling cutting flatness test results

2.5 多路布料取上夹装置

多路布料取上夹装置(后文简称取上夹装置)如图 12 所示。由于嫁接卷料夹切分后的一体式嫁接夹(简称嫁接夹)包裹性好、对苗茎损伤小等优点^[29],因此选用此嫁接夹对砧、穗木对接面进行上夹固定,并设计存夹盘将足量的嫁接卷料夹缠绕储存供后续上夹使用。

取上夹装置工作流程为:①将嫁接夹放至切夹机构中并由切夹机构将卷料夹切分为 18 mm 小段且使切分后嫁接夹暂存至运夹机构第 1 个存夹处。②布料伺服电机驱动运夹机构水平移动 114 mm,后切夹机构再次切下 18 mm 的嫁接夹并暂存至运夹机构第 2 个存夹处,依此类推完成 5 路嫁接夹的布料。③取上夹伺服电机驱动上夹末端将运夹机构中嫁接夹取出,同时上夹末端作业夹持住嫁接夹尾翼使 5 路嫁接夹张开。④移动机构驱动取上夹机构运动到工作位置,后上夹伺服电机带动上夹末端到达

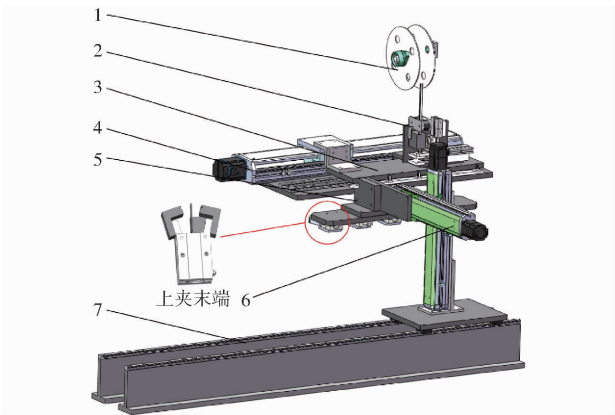


图 12 多路布料取上夹装置

Fig. 12 Multi-layer fabric pick-up and clamping device

1. 存夹盘 2. 切夹机构 3. 运夹机构 4. 布料伺服电机 5. 取上夹机构 6. 取上夹伺服电机 7. 移动机构

上夹位置,使嫁接夹开口包裹住砧、穗木对接贴合面。⑤上夹末端复位,嫁接夹闭合将砧、穗木固定。

切夹机构主要完成嫁接卷料夹的定长输送分段,结构如图 13 所示。其中布夹手指作业带动布夹手指夹块运动完成对嫁接夹的夹持。后布夹气缸作业带动布夹手指、嫁接夹向下运动 18 mm,最后由切夹气缸带动美工刀进行直线运动对嫁接夹进行切削,将嫁接夹均匀分为 18 mm 的小段。布夹限位架、布夹限位板内部设有仿嫁接夹外形限位通道,在嫁接夹分段时,嫁接夹从料夹限位部件依次穿过并限位在布夹限位架、布夹限位板的限位通道中,可防止嫁接夹在定长输送分段时发生位置偏移。

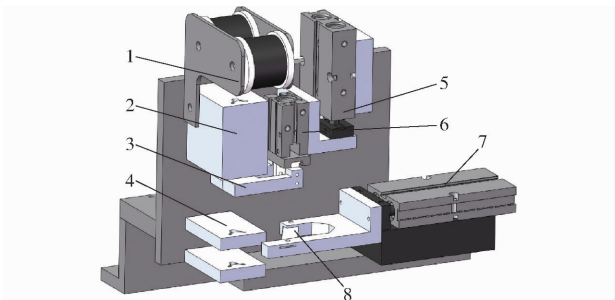


图 13 切夹机构

Fig. 13 Clamping mechanism

1. 料夹限位部件 2. 布夹限位架 3. 布夹手指夹块 4. 布夹限位板 5. 布夹气缸 6. 布夹手指 7. 美工刀片

3 试验与结果分析

3.1 试验材料

为进一步优化嫁接机嫁接效果,采用响应面试验开展嫁接机关键参数多因素优化试验。试验对象为生长良好、苗径一致的番茄、辣椒、茄子种苗,试验样机如图 14 所示,试验流程如图 15 所示。

3.2 试验方案设计

通过初步试验发现预切削后砧木高度、接穗对



图 14 试验样机

Fig. 14 Experiment prototype

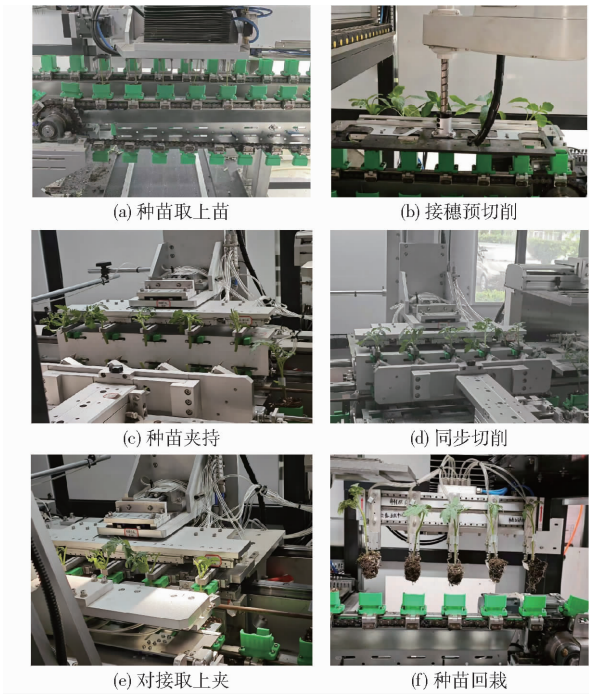


图 15 嫁接试验流程

Fig. 15 Grafting test procedure

接下降高度、接穗高度、接穗对接下降速度是影响嫁接成功率的主要因素。接穗高度与预切削后砧木高度越大种苗整体偏移量越大,降低嫁接成功率;理论接穗对接下降高度为 74 mm,由于种苗存在一定倾斜,使对接位置出现偏差;接穗对接下降速度过快易出现机器冲击振动影响茎秆直立度,降低嫁接成功率。因此结合实际工况分别将预切削后砧木高度设为 60 ~ 70 mm、70 ~ 80 mm、80 ~ 90 mm;接穗苗高度为 120 ~ 140 mm、140 ~ 160 mm、160 ~ 180 mm;将接穗对接下降高度设定为 73、74、75 mm;设定接穗对接下降速度为 0.2、0.25、0.3 m/s,试验因素编码如表 1 所示。

针对番茄、辣椒、茄子种苗分别开展 27 组响应面试验,表 2 中 A、B、C、D 为因素编码值,每组试验选用 50 组种苗(1 株砧木与 1 株接穗为 1 组)进行嫁接试验。

3.3 试验指标

种苗成功夹紧并切出 30°的切面,砧、穗木的切

表 1 试验因素编码
Tab.1 Experimental factors and coding

编码	因素			
	预切削后	接穗对接	接穗	接穗对接
	砧木高度/ mm	下降高度/ mm	高度/ mm	下降速度/ (m·s ⁻¹)
-1	60~70	73	120~140	0.20
0	70~80	74	140~160	0.25
1	80~90	75	160~180	0.30

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

试验 序号	因素				$Q_1/\%$	$Q_2/\%$	$Q_3/\%$
	A	B	C	D			
1	1	0	0	1	88	88	88
2	1	-1	0	0	84	84	84
3	0	-1	0	-1	92	82	78
4	-1	0	-1	0	84	90	90
5	0	-1	1	0	84	82	88
6	1	0	-1	0	88	90	90
7	1	1	0	0	92	94	94
8	-1	1	0	0	92	94	94
9	-1	-1	0	0	86	82	82
10	0	0	0	0	90	92	92
11	0	1	-1	0	90	94	94
12	0	0	-1	1	84	88	88
13	0	0	1	1	84	88	88
14	0	1	0	-1	94	96	96
15	-1	0	0	-1	92	94	94
16	-1	0	0	1	86	86	86
17	0	1	1	0	90	94	94
18	0	-1	-1	0	86	84	82
19	0	0	1	-1	88	92	92
20	0	0	0	0	92	90	90
21	1	0	0	-1	92	94	94
22	0	-1	0	1	76	78	76
23	-1	0	1	0	86	88	88
24	0	1	0	1	92	82	80
25	1	0	1	0	86	90	90
26	0	0	0	0	90	94	94
27	0	0	-1	-1	90	94	94

面成功贴合没有间隙,用嫁接夹固定对接成功后的
种苗且接穗不脱落,并将嫁接完成后种苗成功码盘
至回栽穴盘中即判定嫁接成功,以嫁接成功率为评
价指标,计算式为

$$Q = \frac{N}{M} \times 100\%$$
 (8)

式中 Q ——嫁接成功率, %
 N ——成功嫁接并回栽种苗总数,株
 M ——嫁接总数,株

3.4 试验结果与分析

番茄、辣椒、茄子嫁接成功率为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ,结果

如表 2 所示。利用 Design-Expert 13 对数据进行多元
回归拟合分析,建立 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 回归模型为

$$Q_1 = 90.67 + 0.33A + 3.5B - 0.33C - 3.17D + 0.5AB - AC + 0.5AD + 0.5BC + 3.5BD + 0.5CD - 1.08A^2 - 0.83B^2 - 3.08C^2 - 0.83D^2$$
 (9)

$$Q_2 = 92 + 0.5A + 5.17B - 0.5C - 3.5D - 0.5AB + 0.5AC + 0.5AD + 0.5BC - 2.5BD + 0.5CD - 0.42A^2 - 3.92B^2 - 0.42C^2 - 1.92D^2$$
 (10)

$$Q_3 = 92 + 0.5A + 5.17B + 0.17C - 3.5D - 0.5AB + 0.5AC + 0.5AD - 1.5BC - 3.5BD + 0.5CD - 0.25A^2 - 4.25B^2 + 0.25C^2 - 2.75D^2$$
 (11)

对成功率进行方差分析,结果如表 3 所示。由
表 3 可知,嫁接成功率 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 模型 $P < 0.01$,表
明试验数据与模型高度相关。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。

当预切削后砧木高度 70~80 mm、接穗高度 140~
160 mm 时,因素 B 、 D 对嫁接成功率影响的响应曲
面如图 16 所示,接穗对接下降高度较小,下降速度
较快时嫁接成功率较低。随着接穗对接下降高度增
加和下降速度降低,嫁接成功率逐步提升。

3.5 优化参数试验验证

由于对接下降位移为 74 mm,下降速度为 0.2~
0.3 m/s,则对接所用时间为 0.24~0.37 s。而取上
夹机构带动上夹末端下降与对接同步进行,经测量
上夹末端下降位移为 120 mm,且设定以 0.3 m/s 速
度下降,经计算上夹末端下降所用时间为 0.4 s,因
此对接下降速度在 0.2~0.3 m/s 之间变化并不会
影响生产效率。

为获得嫁接机最佳工作参数组合,建立参数组
合优化模型为

$$\begin{cases} \max(Q_1, Q_2, Q_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \\ -1 \leq D \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$
 (12)

由于因素 A 、 C 对嫁接成功率的影响并不显著,
因此根据优化模型求解使嫁接成功率最高的接穗对
接下降高度与下降速度参数组合。优化结果显示,
当接穗对接下降高度为 75 mm、接穗对接下降速度
为 0.27 m/s 时, Q_1 达最大值,为 93.6%,此时 Q_2 、 Q_3
分别为 91.1%、91.7%;当接穗对接下降高度为
75 mm、接穗对接下降速度为 0.2 m/s 时, Q_2 、 Q_3 达
最大值,分别为 96.2%、96.1%,此时 Q_1 为 92.2%。
为使 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 平均值最大,因此将设定接穗对接下

表 3 $Q_1/Q_2/Q_3$ 方差分析结果

Tab.3 $Q_1/Q_2/Q_3$ analysis of variance results

方差来源	平方和 ($Q_1/Q_2/Q_3$)	自由度	均方 ($Q_1/Q_2/Q_3$)	$F(Q_1/Q_2/Q_3)$	$P(Q_1/Q_2/Q_3)$
模型	378.19/598.96/673.33	14	27.01/42.78/48.1	9.63/9.87/48.1	0.000 2 ** / 0.000 2 ** / 0.002 7 **
A	1.33/3/3	1	1.33/3/3	0.48/0.69/0.34	0.503 7/0.421 6/0.581 7
B	147/320.33/320.33	1	147/320.33/320.33	52.4/73.92/36.49	<0.000 1 ** / <0.000 1 ** / <0.000 1 **
C	1.33/3/0.33	1	1.33/3/0.33	0.48/0.69/0.04	0.503 7/0.421 6/0.848 8
D	120.33/147/147	1	120.33/147/147	42.89/33.92/16.75	<0.000 1 ** / <0.000 1 ** / 0.001 5 **
AB	1/1/1	1	1/1/1	0.36/0.23/0.11	0.561 6/0.639 6/0.741 6
AC	4/1/1	1	4/1/1	1.43/0.23/0.11	0.255 5/0.639 6/0.741 6
AD	1/1/1	1	1/1/1	0.36/0.23/0.11	0.561 6/0.639 6/0.741 6
BC	1/1/9	1	1/1/9	0.36/0.23/1.03	0.561 6/0.639 6/0.331 2
BD	49/25/49	1	49/25/49	17.47/5.77/5.58	0.001 3 ** / 0.033 4 * / 0.035 9 *
CD	1/1/1	1	1/1/1	0.36/0.23/0.11	0.561 6/0.639 6/0.741 6
A ²	6.26/0.93/0.33	1	6.26/0.93/0.33	2.23/0.21/0.33	0.161 1/0.652 2/0.848 8
B ²	3.7/81.81/96.33	1	3.7/81.81/96.33	1.32/18.88/10.97	0.273/0.001 ** / 0.006 2 **
C ²	50.7/0.93/0.33	1	50.7/0.93/0.33	18.07/0.21/0.33	0.001 1 ** / 0.652 2/0.848 8
D ²	3.7/19.59/40.33	1	3.7/19.59/40.33	1.32/4.52/4.59	0.273/0.054 9/0.053 2
残差	33.67/52/105.33	12	2.81/4.33/8.78		
失拟	31/44/97.33	10	3.1/4.4/9.73	2.32/1.1/2.43	0.338 1/0.566 2/0.326 3
误差	3.67/8/8	2	1.33/4/4		
总和	411.85/650.96/778.67	26			

注：** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)；* 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

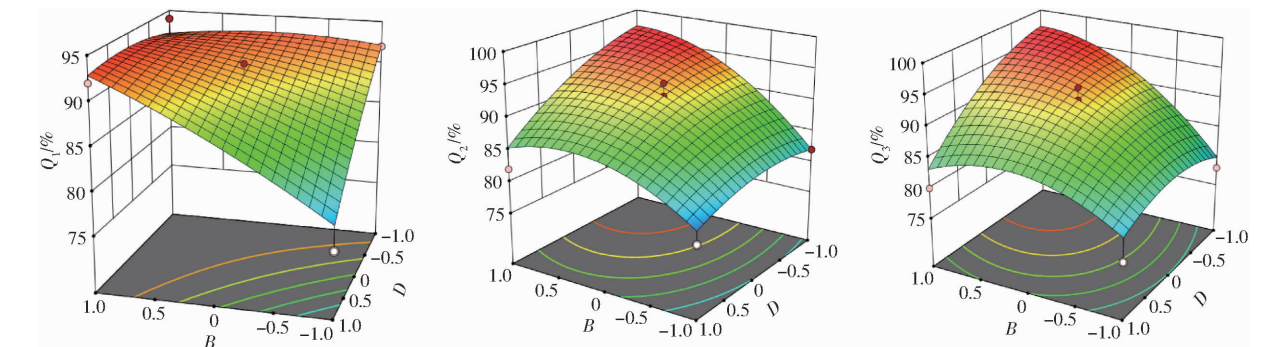


图 16 交互因素 BD 响应面 ($A = C = 0$)

Fig. 16 Interaction factor BD response surface ($A = C = 0$)

降高度为 75 mm、接穗对接下降速度为 0.2 m/s。

为检验上述试验优化结果的实际应用效果和准确性,进行 5 组试验验证,每组完成嫁接苗 150 株(番茄、辣椒、茄子各 50 株),统计嫁接成功率和效率,如表 4 所示。试验表明在最优参数组合下番茄、

辣椒、茄子嫁接成功率平均值为 94.6%,自动化嫁接效率平均值达 1 110 株/h,满足种苗批量化嫁接作业需求。

4 结论

- (1)提出了一种茄果类蔬菜离盘式全自动嫁接机,设计并确定了各机构结构与参数,实现种苗全流程自动化嫁接作业。
- (2)对种苗多株同步切削装置其中切刀长度、砧木切刀与接穗切刀间距、切削角度等关键参数进行计算,试验结果表明当切刀长度为 17 mm、切削角为 30°、两切刀间距离为 74 mm 时,可完成 5 株接穗与 5 株砧木的同步切削,并切出 30°切面,且当切削气缸工作压力为 0.7 MPa 时,切削速度最快,此时切面平整度最大。

表 4 验证试验结果

Tab.4 Verification test results

序号	数量/ 株	$Q_1/\%$	$Q_2/\%$	$Q_3/\%$	耗时/ s	效率/ (株·h ⁻¹)
1	150	90	98	96	464.1	1 110
2	150	92	94	94	470.6	1 095
3	150	94	96	98	457.3	1 126
4	150	92	96	98	460.7	1 118
5	150	92	96	94	467.1	1 103
平均值	150		94.6		464.0	1 110

(3)四因素三水平响应面试验结果表明最优参数组合为预切削后砧木高度 70 ~ 80 mm、接穗对接下降高度为 75 mm、接穗高度 140 ~ 160 mm、接穗对接下降速度 0.2 m/s,此时,平均嫁接成功率为 94.6%,平均生产效率为 1 110 株/h,满足种苗批量化嫁接作业需求。

参 考 文 献

[1] 王玉淑,范华阳,袁杭杰,等.高磷黏性设施菜地土壤磷肥减施效应研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2026,52(1):99-108.
WANG Yushu, FAN Huayang, YUAN Hangjie, et al. Effects of phosphorus fertilizer reduction on high-phosphorus clayey facility vegetable soils[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2026, 52(1): 99-108. (in Chinese)

[2] 王坤光,顾少华,马静,等.我国土壤连作障碍成因及其消减机理研究进展[J].中国农业大学学报,2026,31(3):217-232.
WANG Kunguang, GU Shaohua, MA Jing, et al. Research progress on the causes and reduction mechanisms of soil continuous cropping obstacles in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2026, 31(3): 217-232. (in Chinese)

[3] 张秀禄,马天路,孙雨桐,等.果树嫁接提高植株抗逆性机理的研究进展[J].江苏农业学报,2025,41(12):2472-2480.
ZHANG Xiulu, MA Tianlu, SUN Yutong, et al. Research progress on the mechanism of fruit tree grafting to improve plant stress resistance[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(12): 2472-2480. (in Chinese)

[4] 张子怡,陈婕,季延海,等.不同砧木嫁接对番茄幼苗耐旱性的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(1):59-72.
ZHANG Ziyi, CHEN Jie, JI Yanhai, et al. Effects of different rootstock grafting on drought tolerance of tomato plants[J]. Journal of China Agricultural University, 2026, 31(1): 59-72. (in Chinese)

[5] 陆涵威,孔令浩,韩长杰,等.基于 PLC 的嫁接机四工位并行控制系统设计[J].中国农机化学报,2025,46(7):79-85.
LU Hanwei, KONG Linghao, HAN Changjie, et al. Design of a four-station parallel control system for grafting machines based on PLC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7): 79-85. (in Chinese)

[6] WAKCHAURE G C, KUMAR D, KUMAR S, et al. Grafting wild rootstocks as a climate-resilient strategy to enhance productivity, quality and tolerance in eggplant under variable water stress induced by deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2025, 314: 109492.

[7] 贾文平,迟明,潘安阳,等.自动化嫁接技术及在蔬菜、花卉育苗中的应用[J].中国果菜,2025,45(7):104-110.
JIA Wenping, CHI Ming, PAN Anyang, et al. Automated grafting technology and its application in vegetable and flower seedling cultivation[J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(7): 104-110. (in Chinese)

[8] 李梦旭.茄科钵苗高速嫁接机结构设计[J].农业机械,2023(6):71-74.
LI Mengxu. Structural design of high-speed grafting machine for solanaceae pot seedlings[J]. Farm Machinery, 2023(6): 71-74. (in Chinese)

[9] 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):2-10.
GU Song. Adaptation of automated grafting machines to large scale of grafted seedlings production[J]. Modern Agricultural Equipment, 2024, 45(3): 2-10. (in Chinese)

[10] MARTIN-GORRIZ B, MARTINEZ-BARBA C, TORREGROSA A. Lemon trees response to different long-term mechanical and manual pruning practices[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109700.

[11] 辜松.蔬菜嫁接机的发展现状[J].农业工程技术(温室园艺),2012(13):26,28.
GU Song. Development status of vegetable grafting machines [J]. Applied Engineering Technology (Greenhouse & Horticulture), 2012(13):26,28. (in Chinese)

[12] LEE J M, KUBOTA C, TSAO S J, et al. Current status of vegetable grafting: diffusion, grafting techniques, automation[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 127: 93-105.

[13] BOGOESCU M, DOLTU M, SINGH M, et al. Digital robotic system for grafting vegetable seedlings[J]. Acta Horticulturae, 2020, 1296: 1071-1078.

[14] AN S W, BAE J H, KIM H C, et al. Production of grafted vegetable seedlings in the republic of Korea: achievements, challenges and perspectives[J]. Horticultural Science and Technology, 2021, 39(5): 547-559.

[15] LEE S G. Production of high quality vegetable seedling grafts[J]. Acta Horticulturae, 2007, 759: 169-174.

[16] YU Yongtao, LI Yanjun, XIE Fuxiang, et al. Design and experiment of key components of a insertion vegetable grafting machine with six plants synchronous[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 1-13.

[17] KHOPADE R Y, SAWARGAONKAR G L, RAKES S, et al. Vegetable grafting: a scientific innovation to enhance productivity and profitability of tomato growers under climate change[J]. Frontiers in Agronomy, 2025, 7: 1514673.

[18] 玉佳灵,许宝玉,赵颖雷,等.机器视觉技术在嫁接中的应用[J].农业机械化与现代化,2025(4):15-17.
YU Jialing, XU Baoyu, ZHAO Yinglei, et al. Application of machine vision technology in grafting [J]. Agricultural Mechanization and Modernization, 2025(4): 15-17. (in Chinese)

[19] 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 experiment of grafting-clip transporting mechanism of full automatic

grafting machine for whole-row vegetable seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 14 – 20. (in Chinese)

[20] 姜凯,王志豪,龚科建,等. UV 胶包覆固定切口式瓜类嫁接装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(6):177 – 186.
JIANG Kai, WANG Zhihao, GONG Kejian, et al. Design and test of melon grafting device based on UV adhesive coating and fixation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 177 – 186. (in Chinese)

[21] 李兴,李建平,陈正贝,等.斜切针接式穴盘蔬菜嫁接机关键机构的设计与试验[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2013,39(6):663 – 667.
LI Xing, LI Jianping, CHEN Zhengbei, et al. Design and test of key mechanism of beveling pin-grafting machine[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2013, 39(6): 663 – 667. (in Chinese)

[22] 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 experiment on flexible clamping and conveying mechanism of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):63 – 71. (in Chinese)

[23] 初麒,姜凯,刘凯,等.2JC – 600 型自动嫁接机的试验研究[J]. 农机化研究,2011,33(1):183 – 185,189.
CHU Qi, JIANG Kai, LIU Kai, et al. Experimental study on 2JC – 600 automatic grafting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(1):183 – 185,189. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 周海丽,廖荣强,陈佳峰,等.茄果类蔬菜立式半自动嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):236 – 244.
ZHOU Haili, LIAO Rongqiang, CHEN Jiafeng, et al. Design and test of vertical semi-automatic grafting machine for solanaceae vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 236 – 244. (in Chinese)

[26] 童俊华,王钦源,李振,等.温室穴盘苗多末端补苗移植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):227 – 235.
TONG Junhua, WANG Qinyuan, LI Zhen, et al. Design and test of multi-end seedling transplantation mechanism for greenhouse cave tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 227 – 235. (in Chinese)

[27] 缪小花,毛罕平,韩绿化,等.黄瓜穴盘苗拉拔力及钵体抗压性能影响因素分析[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊 1): 27 – 32.
MIAO Xiaohua, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Analysis of influencing factors on force of picking plug seedlings and pressure resistance of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 27 – 32. (in Chinese)

[28] FU Xiaohu, SHI Jiahao, HUANG Yuan, et al. Design and experiment of full-tray grafting device for grafted melon seedling production[J]. Agriculture, 2022, 12(6): 861.

[29] 唐鹏飞. 瓜果类蔬菜多株同步嫁接机的设计与试验[D]. 长沙:中南林业科技大学,2025:47 – 49.
TANG Pengfei. Design and experiment of synchronous grafting machine for multiple plants of fruits and vegetables[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025:47 – 49. (in Chinese)