doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.023

茄果类全自动嫁接机接穗取苗装置设计与优化试验

郇晓龙[1,2]　熊盛森[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.杭州赛得林智能装备有限公司,杭州 311418;4.杭州市富阳区农业技术推广中心,杭州 311400)

摘要:现有茄果类蔬菜嫁接机多为半自动型,受种苗生长形态差异显著的影响,自动上苗环节难以实现。本文根据茄果类蔬菜成排全自动嫁接机的工作要求,设计了一种接穗自动取苗装置。该装置采用柔性夹持手,对种苗生长形态具有较强的适应性,能够实现接穗穴盘自动供给、夹持、切削以及转移,实现了嫁接作业中接穗取苗自动化,从而推动嫁接机从半自动向全自动作业升级。为了验证接穗取苗装置的工作性能,以嫁接期辣椒苗为对象,以取苗成功率为试验指标,弹性片厚度、夹持手结构、接穗生长偏移量为因素,开展了接穗取苗三因素三水平正交试验,试验结果表明,三因素对取苗成功率的影响程度从大到小依次为:夹持手结构、生长偏移量、弹性片厚度。最佳组合为弹性片厚度 0.3 mm、夹持手结构Ⅲ型和生长偏移量 0~14 mm。在最优组合条件下进行接穗取苗测试,以 3 个穴盘苗共 150 株接穗为取苗对象,经过试验验证,取苗成功率为 98.7%,达到嫁接机接穗取苗作业性能要求。

关键词:接穗自动取苗;柔性夹持手;全自动嫁接机;茄果类蔬菜

中图分类号:S223.1;S616　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0259-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Scion Picking Device for Fully Automatic Grafting Machine

HUAN Xiaolong[1,2]　XIONG Shengsen[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. *Fuyang District Agricultural Technology Extension Centre, Hangzhou* 311400, *China*)

Abstract: Most of the existing solanaceous vegetable grafting machines are semi-automatic models. Due to the significant differences in the growth morphology of seedlings, the automatic seedling picking process is difficult to achieve. Based on the working requirements of the fully automatic row grafting equipment for solanaceous vegetables, an automatic scion seedling picking device was designed. This device adopted flexible gripper hands, which had strong adaptability to the growth form of seedlings. It can automatically supply, clamp, cut and transfer the scion trays, achieving the automation of seedling extraction for grafting operations, thereby promoting the upgrading of the grafting machine from semi-automatic to fully automatic operation. In order to verify the working performance of the scion picking device, taking chili seedlings in the grafting period as the object, the success rate of picking as the test index, and the thickness of the elastic piece, the structure of the clamping hand, and the scion growth offset as factors, a three-factor and three-level orthogonal test for scion picking was carried out. The test results showed that the influence degrees of the three factors on the success rate of picking, from large to small, were as follows: gripper structure, growth offset, and elastic piece thickness. The optimal combination was gripper structure Ⅲ, growth offset of 0~14 mm, and elastic piece thickness of 0.3 mm. The scion picking test was conducted under the optimal combination conditions. A total of 150 scions from three tray seedlings were selected as the seedlings, after experimental verification, the success rate

收稿日期:2025-06-19　修回日期:2025-07-24

基金项目:中央农机研发制造推广应用一体化试点项目、国家自然科学基金项目(32301715)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与试验研究,E-mail:huanxl@zstu.edu.cn

通信作者:童俊华(1984—),男,教授,博士,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

of picking was 98.7%, meeting the performance requirements of the scion picking operation of the grafting machine.

Key words: automatic scion picking; flexible gripper hand; automatic grafting machine; solanaceous vegetables

0 引言

我国是一个蔬菜生产及消费大国[1-2],蔬菜种植栽培面积呈逐年增长的趋势。然而,蔬菜连作障碍也在严重影响着蔬菜栽培,国内外学者的研究和实践表明,嫁接技术可有效克服连作障碍[3-4],现已在蔬菜栽培中得到广泛应用。目前我国已陆续开发研究适用于蔬菜嫁接的嫁接机,多数为半自动嫁接机,需要人工上苗,存在着嫁接效率低、劳动力成本高、嫁接质量不统一等问题。因此,发展嫁接技术自动化,有利于高新技术转化为社会生产力,推动我国育苗产业的发展,对实现规模化、现代化、专业化生产意义重大。

蔬菜自动嫁接技术的研究,主要在设施农业发达的国家取得了一定的进展,比如日本、韩国、荷兰、意大利以及中国等国家[5-6]。1994 年,日本洋马公司与生研机构合作[7-8],推出 AG1000 型茄科全自动嫁接机,由输送带将接穗穴盘输送至上苗工位,夹持机构将接穗夹持并提升至切削工位进行切削,随后由搬运机构将接穗搬运至对接工位完成上苗。该设备的嫁接质量对秧苗株高和茎粗的要求较高,而当时的育苗技术水平有限,导致该设备未能得到推广应用。荷兰设施园艺自动化生产装备技术世界领先,2025 年 ISO Group 公司[9]研制出 High-Speed Grafter 茄科全自动嫁接机,该机秉承了荷兰园艺设施自动化程度高及智能化高的特点,具有庞大的嫁接装置及完善的输送系统,还配备有机器视觉系统,可适应嫁接苗生长的差异。该设备由机械臂将接穗与砧木从穴盘中取出进行变距,随后放入转运杯中完成上苗。国外蔬菜嫁接技术体系更为成熟与先进,其中自动上苗环节已成为实现嫁接作业全程自动化的关键步骤。

国内蔬菜嫁接技术发展起步较晚,主要集中于高校与科研院所。历经数十年深耕,在理论研究与技术创新层面积累了阶段性成果。XIE 等[10]于 2020 年研制了茄果类高速嫁接机,其特点在于砧木与接穗均进行了预处理,砧木由机械臂取苗,接穗由人工完成上苗,随后砧木与接穗汇集于切削工位完成切削及后续嫁接作业,生产效率达到 2 250 株/h,该设备对砧木与接穗的苗径匹配度要求较高。童俊华等[11]设计了一种单人工上苗式半自动蔬菜嫁接机,采用仿形导向块和气缸夹持手,由单人工上砧木和接穗,嫁接成功率为 89%,由于砧木与接穗的上苗工作均由一人完成,嫁接效率存在进一步提升的空间。王家胜等[12-13]设计了茄科多株同步自动嫁接机,实现了多株接穗同步自动上苗,采用气缸进行接穗的横移工作,但气缸的运动精度较低,易导致上苗定位失准。文献[14-16]研制了茄科全自动针式蔬菜嫁接机,接穗夹持孔内置海绵防止夹伤,采用旋转切削方式进行接穗切削,最后由同步带移动机构转移接穗完成上苗。上述相关研究为我国蔬菜自动嫁接技术的产业化应用奠定了基础。然而,受国内蔬菜育苗生产模式缺乏统一标准的影响,种苗生长形态呈现显著差异。有茎秆弯曲变形,有苗径粗细不均,还有生长位置偏离穴盘孔中心。这些问题导致上苗环节难以实现自动化操作,需要人工辅助完成,增加了人力成本投入,同时也制约了嫁接效率的进一步提升。

本研究基于茄果类蔬菜成排全自动嫁接机工作要求,以目前常见规格 5×10 孔茄果类蔬菜穴盘苗为研究对象,开展一排 5 株接穗取苗装置研究及相关机构设计。通过优化试验确定接穗取苗装置最优结构参数,以期为嫁接机自动化设计提供参考依据。

1 整机方案设计

1.1 嫁接方法选择

茄果类蔬菜嫁接方法主要有劈接法、针接法和贴接法等多种方法[17-18]。其中贴接法操作简单,该方法切口贴合面较大,嫁接后的苗容易成活,易于实现机械嫁接。贴接法工艺如图 1 所示,先在砧木子叶上方倾斜 30°切削一楔形切口,然后在接穗真叶下方倾斜 30°切削一楔形切口,接着将两楔形切口贴合在一起,最后用嫁接夹将砧木和接穗固定在一起,完成嫁接作业。本研究采用贴接法作为全自动嫁接机的嫁接方法,并依据此方法设计关键机构。

1.2 整机结构与原理

依照贴接法嫁接工序,设计一排 5 株同时嫁接的全自动嫁接机整体结构方案,如图 2 所示。主要由接穗输送带、砧木输送带、接穗取苗装置、同步切削机构、嫁接夹成型输送机构、中空旋转平台、*XZ* 两轴移动模组、*YZ* 两轴移动模组等组成。

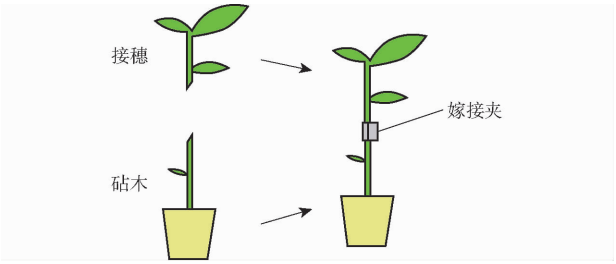


图 1　贴接法嫁接工艺示意图

Fig. 1　Schematic of pith-cambium grafting process

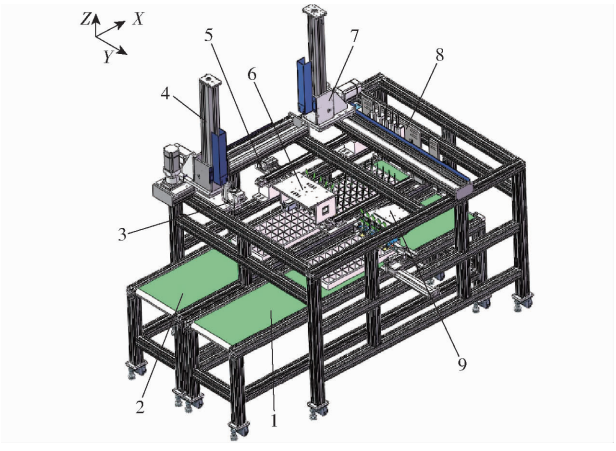


图 2　嫁接机整体结构

Fig. 2　Structure of grafting machine

1. 接穗输送带　2. 砧木输送带　3. 中空旋转平台　4. *XZ* 两轴移动模组　5. 砧木拢苗机构　6. 同步切削机构　7. *YZ* 两轴移动模组　8. 嫁接夹成型输送机构　9. 接穗取苗装置

在嫁接作业时，由于砧木的上半部分是舍弃的，为了简化作业流程，将整盘砧木穴盘苗进行预切割，切除砧木上半部分，留下其下半部分进行嫁接作业，同时也能避免因砧木上半部分的蓬面宽度过大导致各砧木之间相互影响。

工作时，砧木穴盘与接穗穴盘分别通过 2 路输送带按相对方向进给喂入，输送到指定位置后，在 *Y* 轴方向上，第一排砧木与第一排接穗位于同一直线上。拢苗机构将砧木与接穗分别拢到砧木夹持手和接穗夹持手中并夹持。接穗切削机构对一排 5 株接穗苗进行切削，随后 *YZ* 两轴移动模组将切削后的接穗向上提起横移到砧木一侧待与砧木进行同步切削。同时，*XY* 两轴移动模组将一排 5 株砧木苗提起一定高度，此时 5 株砧木与 5 株接穗分别一一靠近。随后同步切削机构对砧木与接穗进行同步切削，同步切削完成后，*YZ* 两轴移动模组带动接穗沿 *Y* 轴、*Z* 轴方向微微移动，将接穗与砧木的楔形切口贴合在一起，与此同时，嫁接夹成型输送机构将 5 路嫁接料夹切削成长度 15 mm 的嫁接夹，并将其输送至嫁接位置，将砧木与接穗固定在一起；最后，中空旋转平台旋转 180°，配合 *XY* 两轴移动模组，将嫁接好的嫁接苗回栽到穴盘中。至此，一个完整的嫁接流程已经完成，2 路输送带均前进一个穴盘孔距离，开始下一个嫁接作业流程。

2　接穗取苗装置设计

2.1　结构原理

接穗取苗装置如图 3 所示，其功能是将接穗苗进行第一次切削，使得用以嫁接的上半部分接穗与其根部分离，随后将接穗横移至砧木一侧，与砧木进行同步切削和对接。主要由无杆气缸、切削气缸、拢苗杆、限位片、接穗夹持手、切削刀片、切削挡板、导苗板、拢苗气缸等组成。接穗穴盘苗喂入后，5 株接穗苗经导苗板进入到夹持手中，由于接穗苗生长会有偏离穴盘孔中心的情况，所以接穗苗不一定在夹持末端的夹持位置，此时无杆气缸伸出将拢苗杆送到第 1 排接穗和第 2 排接穗之间，拢苗气缸伸出，带动拢苗杆往前推，将 5 株接穗向前推至夹持手中，在夹持手后方有一限位片，该限位片与拢苗杆相互配合，将接穗限位在指定位置，随后接穗夹持手将接穗夹紧，切削气缸伸出，带动 5 把切削刀片分别对 5 株接穗进行切削，最后由 *YZ* 两轴移动模组将接穗上提并横移至砧木一侧待下一步作业。

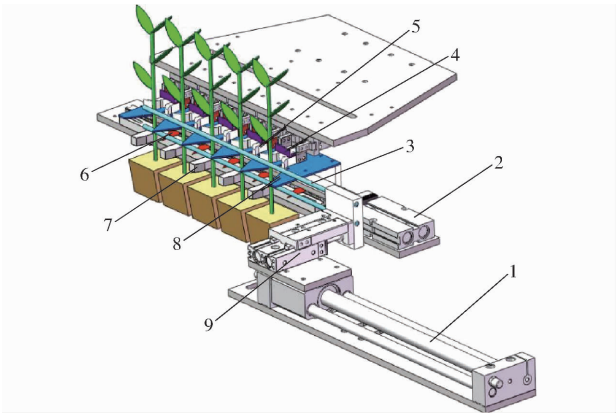


图 3　接穗取苗装置

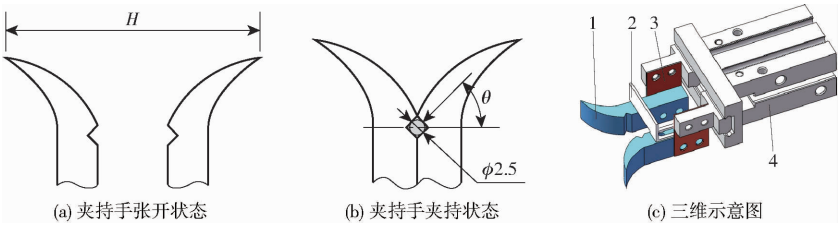
Fig. 3　Scion cutting mechanism

1. 无杆气缸　2. 切削气缸　3. 拢苗杆　4. 限位片　5. 接穗夹持手　6. 切削刀片　7. 切削挡板　8. 导苗板　9. 拢苗气缸

2.2　接穗夹持手设计

夹持手是确保接穗切削成功的关键机构，接穗夹持手应具有较大的夹持范围，能够夹紧接穗，同时不损伤茎秆，如图 4 所示，分为左、右夹持手。

穴盘孔开口尺寸为 44 mm×44 mm，由于播种原因，有部分接穗生长会偏离穴盘孔中心，为了能够夹持住位于穴盘孔边缘的接穗，将夹持手设计成一向外弯曲的弧形，提高其夹持范围，在张开状态下，夹持手开口 *H* 为 44 mm。夹持手的动力为夹持气缸，通过弹性连接片，将夹持气缸与夹持手连接在一起，弹性连接片材料为 65Mn，经过热处理后，具有一定



(a) 夹持手张开状态 (b) 夹持手夹持状态 (c) 三维示意图

图 4 接穗夹持手

Fig. 4 Scion holding claw

1. 夹持手 2. 限位片 3. 弹性连接片 4. 夹持气缸

弹性,使夹持口径能够随着苗径变化,适应不同径粗的苗,达到柔性夹持效果。当接穗穴盘到达指定位置时,拢苗杆将接穗向着夹持手方向拨动,夹持手上的限位片与拢苗杆形成前后限位结构,通过二者配合完成接穗定位,随后夹持手夹紧接穗。

夹持状态下,为保证夹持力的均匀性,4 个夹持面倾斜角 θ 均设计为 45°。夹持口径是指夹持状态下与嫁接用苗接触的 4 个夹持手斜面内切圆直径,该参数是确保夹持成功的关键。夹持口径尺寸由嫁接苗夹持位置的苗径确定。以辣椒嫁接为例,随机选出 5 组嫁接苗(每组 50 株),对夹持位置苗径进行测量,如图 5 所示,苗径基本满足正态分布。

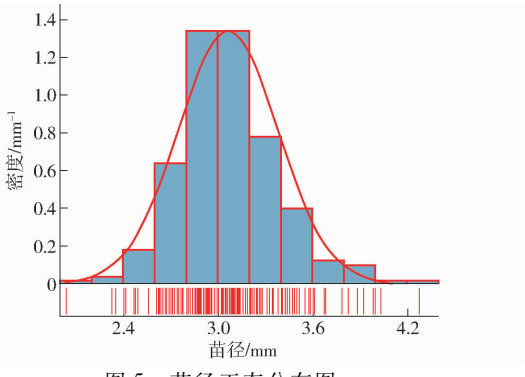


图 5 苗径正态分布图

Fig. 5 Normal distribution of seedling diameter

正态分布公式为

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0,1) \tag{1}$$

式中 X——蔬菜苗径随机变量,mm

μ——蔬菜苗径数学期望,mm

σ——蔬菜苗径标准差,mm

Z——蔬菜苗径标准正态分布随机变量

由式(1)可得

$$X = \sigma Z + \mu \tag{2}$$

经统计苗径数学期望 μ 为 3.06 mm,标准差 σ 为 0.285 mm。根据标准正态分布表,苗径有 95% 概率在区间[2.49 mm,3.63 mm]。要求夹持手在夹持时能夹紧最细幼苗,又不夹伤最粗幼苗。有相关研究表明,苗茎秆被压缩在 0 ~ 20% 范围内,对苗的成活率没有影响[19],因夹持手具有一定弹性,起到柔性夹持作用,将夹持口径 d 设计为 2.5 mm。

2.3 切削机构设计

2.3.1 切削方式选择

以不同的切削方式切削作物茎秆,其切削阻力有着明显的差别,作物茎秆一般由表皮、机械组织、基本组织和维管束等构成,其维管束方向与茎秆轴线平行,因此切削切入茎秆的方向与其切割阻力和切削质量存在一定关系。按照刀刃入刀方式的不同可以分为正切和滑切[20-22],如图 6 所示。

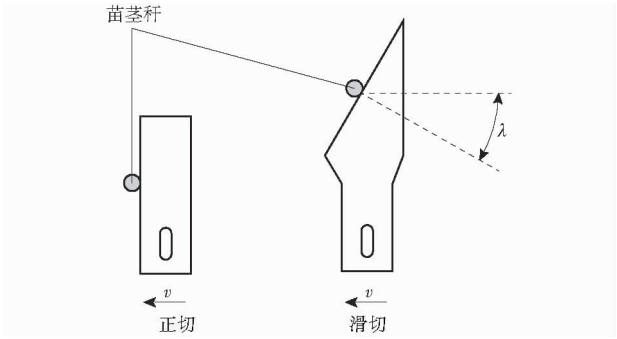


图 6 切削方式

Fig. 6 Comparison chart of cutting methods

正切是指切削时,刀刃与切削速度方向呈正交关系,此时刀刃法线与切削速度方向共线;而滑切是指刀刃与切削速度方向呈斜交关系,此时刀刃法线与切削速度方向存在一定的偏角 λ,称为滑切角。相关研究表明,在相同条件下,滑切比正切更加省力,在此理论基础上,本研究将进一步补充说明滑切的切削原理,为选择合适的切削方法提供理论依据。

假设以直径 3.0 mm 辣椒苗为切削对象,如图 7 所示的滑切,AB 为刀刃线,点 a 为刀刃开始接触苗茎秆的切削起始点,点 b 为切削结束时刀刃与苗茎秆的接触点,m、n 分别为点 a、b 在水平方向上的投影,v 为切削速度,$\boldsymbol{F}$ 为刀刃切削时施加在茎秆上的正压力,也称切削力,$\boldsymbol{S}$ 为切削速度方向上的分力,$\boldsymbol{T}$ 为刀刃线方向上的分力,其关系式为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{S} + \boldsymbol{T} \tag{3}$$

$\boldsymbol{S}$ 力沿切削速度方向将茎秆挤压并切削,而 $\boldsymbol{T}$ 力使茎秆沿刀刃线方向滑移,刀刃从 AB 运动到 A_1B_1,切削起始点 a 移动至切削终点 b,在此过程

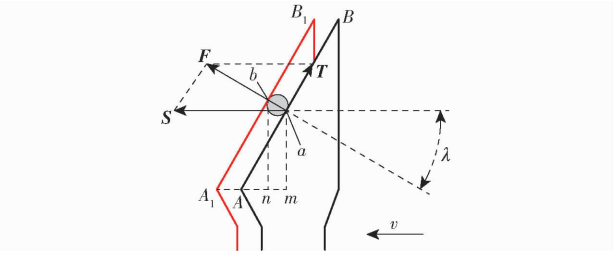


图 7　滑切

Fig. 7　Sliding cutting

中，苗茎秆在刀刃线上发生了一段滑移距离，称为滑切距离 Q，根据图中几何关系可得

$$\cos\lambda = \frac{l_{am}}{l_{Aa}} = \frac{l_{bn}}{l_{A_1b}} \tag{4}$$

$$Q = l_{A_1b} - l_{Aa} \tag{5}$$

$$\sin\lambda = \frac{l_{bn} - l_{am}}{3} \tag{6}$$

联立式(4)～(6)得

$$Q = \frac{l_{bn} - l_{am}}{\cos\lambda} = \frac{3\sin\lambda}{\cos\lambda} \quad \left(0 \leqslant \lambda < \frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

滑切角 λ 为 30°，则滑切距离 Q 为 1.73 mm。

刀片切削距离 h 为

$$h = \frac{3}{\cos\lambda} = 3.46\ (\text{mm}) \tag{8}$$

由图 7 可知，滑切时，因为滑切角 λ 的存在，切削力会向切削速度方向上和刀刃线上产生 2 个分力，此时切削阻力只有一个速度方向分力，此速度方向分力小于切削力，故切削阻力较小；刀刃线上的分力会使得苗茎秆沿着刀刃线产生一定的滑移距离，有助于提高切削的成功率；相比于正切，滑切将一株接穗苗完全切断所需要执行的切削距离较大，切削距离由切削气缸的行程决定，为了提高切削成功率，在合理范围内选择较大行程的气缸。从微观角度分析，即使再光滑的刀刃，其微观几何形状也呈高低不平形态，可将其近似看作带锯齿状的刀片，当刀刃在切削苗茎秆产生滑移时，这些尖锐的锯齿就会起到切开材料纤维的作用，类似于锯子切割木头，这也是滑切较正切省力的另一原因。

由式(7)可得，滑切距离与滑切角成正比，而较大的滑切距离能够使得切削更加省力，结合上述分析，选择滑切作为接穗的切削方式，滑切角 λ 设定为 30°。

2.3.2　切削机构设计

嫁接作业时，接穗苗上半部分将与砧木嫁接在一起，而其下半部分则为遗弃部分，根据嫁接作业要求，应对接穗苗进行第 1 次切削，将切削后的接穗转移至砧木一侧待后续作业，以此完成接穗取苗流程。

切削机构如图 8 所示，由压板、切削挡板、滑块滑轨、导苗板、切削刀片、刀片安装板、切削气缸等组成，而压板需贴近却不接触基质表面。

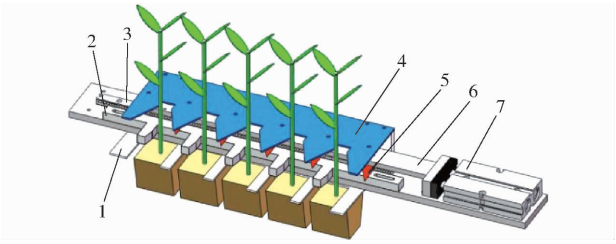


图 8　切削机构

Fig. 8　Cutting mechanism

1. 压板　2. 切削挡板　3. 滑块滑轨　4. 导苗板　5. 切削刀片　6. 刀片安装板　7. 切削气缸

在取苗过程中，当第一排接穗被提起时，由于接穗间蓬面相互缠绕，容易连带提起第 2 排接穗，而压板的作用正是牢牢压住第 2 排接穗的基质，从而避免其被带起。切削挡板的首端向外侧延展一定角度，其目的是对生长较为偏离穴盘孔中心的接穗苗进行根部导向。切削挡板的作用是给接穗提供支撑力，此支撑力能够与刀片切削力形成一剪切力，从而顺利将接穗切削。导苗板安装位置靠近夹持手，其目的是对接穗苗茎秆部分进行导向；5 把切削刀片等距安装于刀片安装板上，在切削气缸驱动下 5 把切削刀片同步对 5 株接穗苗进行切削。

图 9 为接穗切削原理示意图，接穗夹持手与基质分别在上下两点对接穗进行固定，切削挡板与切削刀片之间的距离为 1 mm，在切削刀片对接穗进行切削时，切削挡板为接穗提供反向的作用力 F_1，防止接穗在切削处发生弯曲变形，切削力 F 与 F_1 形成一剪切力将接穗切断。夹持手下表面到基质表面的距离为 L_1，切削刀片与基质之间的距离为 L_2，经过多次试验测定及接穗取苗的要求，可得 L_1 为 55.5 mm，L_2 为 28.5 mm，所以切削后的接穗位于夹

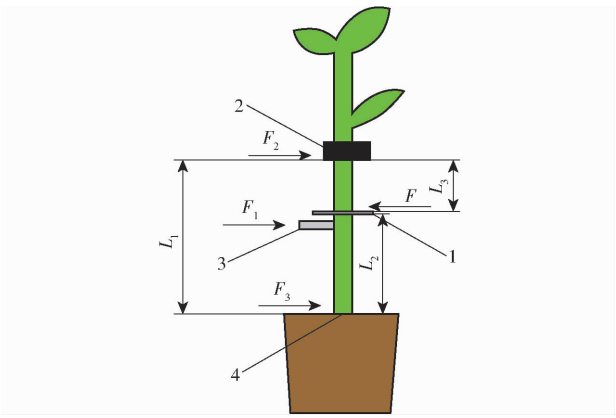


图 9　接穗切削原理示意图

Fig. 9　Schematic of scion cutting principle

1. 切削刀片　2. 接穗夹持手　3. 切削挡板　4. 基质

持手下方的茎秆长度为 L_3 为 27 mm。

3 接穗取苗装置优化试验

3.1 试验材料与指标

接穗取苗作为全自动蔬菜嫁接机的核心作业环节,其作业质量直接关系到嫁接成功率与嫁接品质。因此,为了验证所设计的接穗取苗装置的性能,以嫁接期的辣椒苗(萧新 218)为试验对象,采用自行研制的成排全自动嫁接机开展接穗取苗试验(图 10)。试验过程如图 11 所示,其中接穗采用 5×10 孔规格穴盘苗。

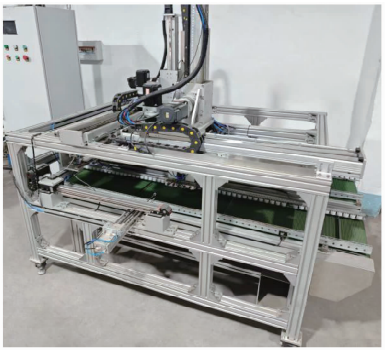


图 10 全自动嫁接机试验台

Fig. 10 Physical picture of automatic grafting machine

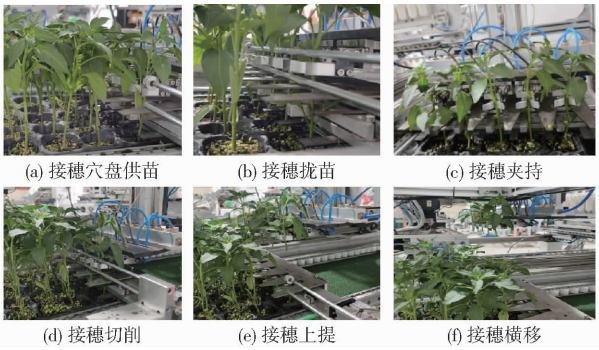


图 11 接穗取苗试验过程

Fig. 11 Scion seedling picking test procedure

以取苗成功率为评价指标,计算公式为

$$J = \frac{N_s}{N} \times 100\% \tag{9}$$

式中 J——取苗成功率,%

N_s——取苗成功数,株

N——取苗总数,株

取苗成功评判标准:接穗位于夹持手的夹持口径内进行夹持,接穗切削面光滑,5 株接穗苗切削高度一致,茎秆无拖拽损伤,且切削后的接穗姿态基本垂直向下,无倾斜现象;接穗茎秆无折断、开裂、夹扁、夹伤流出汁液或出现明显深色淤伤。

取苗成功率是衡量接穗取苗装置性能的重要指标。取苗成功率主要受到 3 个因素影响,分别为苗径与夹持口径匹配度、夹持手结构以及接穗苗生长偏移量。

苗径与夹持口径的匹配度会影响接穗夹持茎秆夹持损伤程度,若接穗苗苗径较大,则夹持手会将其夹伤,因此夹持手需要具备一定柔性,适应苗径较大的接穗,柔性夹持的关键在于弹性片需要具有较高的弹性,其弹性与其厚度有关,设计 3 种不同厚度弹性片,分别为 0.5、0.4、0.3 mm;夹持成功与否主要受夹持手结构的影响,经过多次更新迭代,夹持手结构有 3 种类型,如图 12 所示,分别以编号Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型表示;接穗生长偏移量为接穗生长点偏离穴盘孔中心的距离,其主要影响切削成功率,由于播种不当,接穗苗生长会偏离穴盘孔中心,若偏移量过大,则接穗偏离切削挡板的距离变大,切削时,切削刀片将接穗往切削挡板推送的距离较大,会导致靠近接穗夹持手下端的茎秆折断,甚至造成接穗的姿态倾斜。因此开展以弹性片厚度、夹持手结构以及接穗生长偏移量为因素的正交试验。因素水平如表 1 所示。

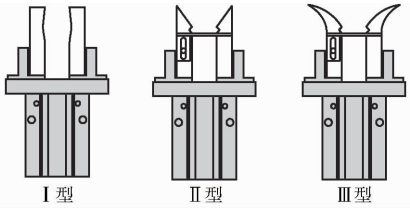


图 12 夹持手结构类型

Fig. 12 Gripper hand iteration process

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素		
	弹性片厚度/mm	夹持手结构	偏移量/mm
1	0.5	Ⅰ型	0~6
2	0.4	Ⅱ型	6~14
3	0.3	Ⅲ型	14~20

接穗苗生长偏移量示意图如图 13 所示,接穗生长在穴盘孔中,存在 X 轴方向和 Y 轴方向上的偏移量,即 Δx 和 Δy,穴盘前进方向为 X 方向,Δx 主要影响着夹持接穗时其姿态垂直度,在拢苗杆和限位片作用下,能够将接穗聚拢于穴盘孔中,提高夹持时接穗垂直度;接穗切削沿着 Y 方向,Δy 是影响切削成

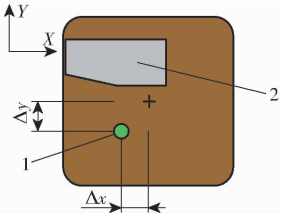


图 13 接穗苗生长偏移量示意图

Fig. 13 Schematic of growth deviation of scion seedling

1. 接穗 2. 切削挡板

功与否的关键。

3.2　试验结果与分析

以上述 3 个影响因素为变量，开展 9 组试验，每组试验进行 10 次，每次取苗 5 株，总计每组试验取苗 50 株，试验结果如表 2 所示，A、B、C 为因素水平值，方差分析如表 3 所示。

表 2　试验结果

Tab. 2　Experimental results

编号	因素			取苗成功率/%
	A	B	C	
1	1	1	1	43.3
2	1	2	2	60.0
3	1	3	3	46.7
4	2	1	2	36.7
5	2	2	3	40.0
6	2	3	1	86.7
7	3	1	3	30.0
8	3	2	1	96.7
9	3	3	2	100
k_1	49.9	36.6	75.5	
k_2	54.5	65.6	65.6	$A_3B_3C_1$
k_3	75.6	77.8	38.9	
R	25.7	41.2	36.6	

表 3　方差分析

Tab. 3　Analysis of variance

因素	平方和	自由度	均方	F	P
A	1 016.642	2	508.321	103.434	0.010 *
B	3 123.162	2	1 561.581	317.753	0.003 **
C	2 051.162	2	1 025.581	208.687	0.005 **
误差	9.829	2	4.914		

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

由表 2 可知，不同因素的不同水平组合对取苗成功率有显著影响，最大取苗成功率为 100%，最小取苗成功率仅为 30%。3 因素对取苗成功率的影响极差分别为 $R_A = 25.7$、$R_B = 41.2$ 和 $R_C = 36.6$，$R_B > R_C > R_A$。结合表 3 方差分析结果，3 因素对取苗成功率的影响程度从大到小依次为：夹持手结构、生长偏移量和弹性片厚度；从极差看最优组合为 $A_3B_3C_1$。同时，对于 C 因素，k_1 和 k_2 较为接近，说明 C 因素 1 水平和 2 水平对取苗成功率的影响差异较小，在实际取苗作业中，接穗生长偏移量为 0 ~ 14 mm 均视为理想情况，当接穗生长偏移量超过 14 mm 时，会对切削成功率造成显著影响。

3.3　优化参数试验验证

将最优组合工作参数 $A_3B_3C_1$（C_2）应用到实际取苗作业中，以 3 个穴盘共 150 株辣椒苗为对象开展取苗测试。经过试验验证，夹持成功 150 株，切削成功 148 株，茎秆损伤 0 株，取苗成功率为 98.7%，接穗取苗效果如图 14 所示，达到嫁接机接穗取苗作业的性能要求。2 株苗因为生长偏移量过大的缘故，切削时靠近夹持手下端的茎秆部分发生了折断，导致切削失败。从本次试验结果可以看出，接穗生长偏移量对取苗成功率存在较大影响，其主要影响在接穗切削阶段，因此为了适应嫁接机的作业，提高嫁接成功率，种苗企业在培育嫁接苗时应提高其播种的质量，尽量播种于穴盘孔中心，避免存在过大的偏移量。



(a) 切削高度一致　(b) 接穗姿态垂直向下　(c) 茎秆无损伤

图 14　取苗效果

Fig. 14　Effects of scion taking seedling

4　结论

（1）根据茄果类蔬菜成排全自动嫁接设备的工作要求，设计了一种接穗自动取苗装置，能够完成接穗穴盘自动供给、接穗夹持、接穗切削以及转移，实现了嫁接取苗自动化，助力嫁接机实现完全自动化作业，提高嫁接效率。

（2）以嫁接期辣椒苗为试验对象，接穗取苗正交试验结果表明，采用厚度较小的弹性片能够提高夹持手的柔性，减少接穗夹持损伤；采用夹持手结构Ⅲ型，能够有效提高夹持的成功率；过大的生长偏移量会导致切削失败，因此种苗企业在播种阶段需提高农艺规范及播种质量，减小嫁接苗生长的偏移量。3 因素对接穗取苗影响由大到小顺序为夹持手结构、生长偏移量和弹性片厚度。最优组合为 $A_3B_3C_1$（C_2），即弹性片厚度 0.3 mm、夹持手结构Ⅲ型和接穗生长偏移量 0 ~ 14 mm。采用最优组合进行接穗取苗作业，取苗成功率为 98.7%，达到嫁接机接穗取苗作业的性能要求。

参　考　文　献

[1]　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 Ming, 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)

[2]　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 experiment of UV-coated fixed cut grafting device for melons[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 177 – 186. (in Chinese)
[3] 宋学利, 刘晓丽. 设施蔬菜连作障碍原因及其解决措施[J]. 现代农村科技, 2021(7): 110.
[4] KUBOTA C, MCCLURE M A, KOKALIS-BURELLE N, et al. Vegetalbe grafting: history, use, and current technology status in North America[J]. HortScience, 2008, 43(6): 1664 – 1669.
[5] 褚佳. 全自动茄科穴盘苗整盘嫁接系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
CHU Jia. Research on the fully automatic solanaceae tray seedling whole tray grafting system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[6] 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.
[7] 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 robot abroad[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(4): 10 – 17. (in Chinese)
[8] 付月胜, 宋健, 解福祥, 等. 蔬菜嫁接机研究现状及发展趋势[J]. 农业开发与装备, 2021(10): 25 – 29.
FU Yuesheng, SONG Jian, XIE Fuxiang, et al. Research status and development trends of vegetable grafting machiness[J]. Agricultural Development and Equipment, 2021(10): 25 – 29. (in Chinese)
[9] ISO Group, Inc. ISO High Speed Grafter[S/OL]. https://www.isohorti.com/en/iso-high-speed-grafter/, 2025.
[10] XIE Zhongjian, GU Song, CHU Qi, et al. Development of a high-productivity grafting robot for solanaceae[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 82 – 90.
[11] 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 experiment of key mechanism for semiautomatic vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 65 – 72. (in Chinese)
[12] 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 experiment of key mechanism for semiautomatic vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 38 – 45. (in Chinese)
[13] 王家胜, 李洋鹏, 高春凤, 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 experiment of symmetrical single-plant automatic grafting machine for vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 141 – 150. (in Chinese)
[14] 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 the key mechanism of the vegetable grafting machine with miter needle joint[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2013, 39(6): 663 – 667. (in Chinese)
[15] 邱景图, 陈正贝, 李兴, 等. 针接式蔬菜嫁接机的研制[C]// 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 中国重庆, 2011: 700 – 703.
[16] 李兴. 针接式蔬菜嫁接机的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LI Xing. Study on pin-grafting machine for vegetable[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
[17] 李梦旭, 樊健. 蔬菜嫁接技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2023, 13(4): 140 – 145.
LI Mengxu, FAN Jian. Research status and development trends of vegetable grafting technology[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(4): 140 – 145. (in Chinese)
[18] 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)
[19] 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.
LI Jun. Research on the fully automatic vegetable grafting machine for solanaceae whole row[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[20] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 1 – 20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Analysis of research progress on theory and methods of crop stem cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1 – 20. (in Chinese)
[21] 林建新, 廖庆喜, 康艳, 等. 油菜机械直播铲锹式种床整备机往复滑切刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 75 – 86.
LIN Jianxin, LIAO Qingxi, KANG Yan, et al. Design and experiment of reciprocating sliding cutter for rapeseed mechanical direct seeding shovel bed preparation machine[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 75 – 86. (in Chinese)
[22] 滕绍民, 王泽群, 李洋, 等. 切割方式与切割阻力的理论研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 89 – 90, 96.
TENG Shaomin, WANG Zequn, LI Yang, et al. Theoretical research on cutting methods and cutting resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 89 – 90, 96. (in Chinese)