

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.008

# 蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验

姜凯<sup>1</sup> 陈立平<sup>1</sup> 张骞<sup>2</sup> 冯青春<sup>1</sup> 郭文忠<sup>1</sup> 曹玲玲<sup>3</sup>

(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.北京农业信息技术研究中心,北京 100097;

3.北京市农业技术推广站,北京 100029)

**摘要:**针对现有蔬菜嫁接机器人单手爪夹持搬运机构作业时需要在上苗、切削和对接工位往复旋转作业,限制了机器嫁接生产效率,存在夹持伤苗、操作人员上苗等待时间过长、易疲劳等问题,设计了一种四手爪柔性夹持搬运机构,能够实现上苗、切削和对接工位同步作业,以及秧苗柔性夹持与快速搬运,有助于提高机器嫁接效率。提出了基于缓冲材料的柔性夹持手爪和夹持力调节方法,分析了不同厚度 EVA 缓冲材料的压缩力学特性,得到缓冲垫完全闭合夹持条件下对不同秧苗的夹持力。利用 ADAMS 软件建立夹持搬运机构动力学仿真模型,分析了秧苗不同夹持力与旋转位移的变化规律,得出当夹持力小于 0.4 N 时秧苗脱离了夹持手的束缚,夹持力大于 3.5 N 时秧苗夹持与旋转作业稳定。机构性能试验结果表明:选取白籽南瓜苗和黄瓜苗为测试对象,柔性夹持手爪平均夹苗成功率为 98.5%,比弧形夹持手提高 4.5 个百分点,伤苗率降低 3.5 个百分点,柔性夹苗效果显著;该机构嫁接平均速度为 1 052 株/h,是同类型单手爪嫁接机作业效率的 1.72 倍,嫁接成功率为 96.67%,大幅提高了嫁接机器人生产效率,能够满足工厂化嫁接育苗生产需求。本文研究结果可为高速嫁接机器人的夹持搬运机构设计和优化提供技术参考。

**关键词:**嫁接机器人;搬运机构;四手爪;柔性夹持;EVA 缓冲材料

中图分类号: S223; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0063-09

## Design and Experiment on Flexible Clamping and Conveying Mechanism of Vegetable Grafting Robot

JIANG Kai<sup>1</sup> CHEN Liping<sup>1</sup> ZHANG Qian<sup>2</sup> FENG Qingchun<sup>1</sup> GUO Wenzhong<sup>1</sup> CAO Lingling<sup>3</sup>

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Beijing Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Agricultural Technology Extension Station, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The disadvantages of artificial grafting are low efficiency and nonstandard quality of grafted seedlings. Therefore, this method cannot meet the needs of mass production of factory seedlings. Mechanical grafting can improve the quality of grafted seedlings and promote the standardization of grafting seedlings. At present, most of the grafting machines adopt the artificial method to carry on the seedling, and the single hand grafting limits the improvement of the production efficiency. Through the development of automatic seedling device to replace artificial seedling, the device has high requirements for seedling standardization, the success rate of seedling is only about 80%, and it cannot be used in actual production. Through the study of multi claw synchronous grafting process flow and reasonable optimization of grafting mechanism layout, grafting efficiency can be improved steadily. In the process of mechanical grafting, the clamping and conveying mechanism is the key part of seedling transportation, which is used to grasp and transport seedlings from the seedling loading station to the cutting and docking station. In view of the existing single gripper clamping and handling mechanism, it needs to rotate back and forth at the seedling loading, cutting and docking positions during operation, which limits the grafting production efficiency of the machine, and there are some problems such as clamping injured seedlings, too long waiting time for operators to load seedlings, and easy to fatigue. A four gripper flexible clamping and conveying mechanism was designed. This mechanism can realize synchronous operation of seedling loading, cutting and docking, and realize flexible clamping and rapid transportation of seedlings. It was

收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-09-05

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设专项(KJ CX20180422)和宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BBF02024)

作者简介: 姜凯(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事设施园艺机器人技术及装备研究,E-mail: jiangk@nercita.org.cn

通信作者: 陈立平(1973—),女,研究员,博士,主要从事农业智能装备技术研究,E-mail: chenlp@nercita.org.cn

helpful to improve the grafting efficiency of the machine. The transfer mechanism can complete one grafting seedling every  $90^\circ$  rotation. At the same time, the flexible gripper based on buffer material and the adjustment method of clamping force were also proposed. The compression mechanical properties of EVA cushion material with different thickness were analyzed, and the clamping force of EVA cushion on different seedlings under the condition of completely closed clamping was obtained. By using ADAMS software, the dynamic simulation model of clamping and conveying mechanism was constructed, and the variation rules of different clamping force and rotation displacement of seedlings were analyzed. It was concluded that when the clamping force was less than 0.4 N, the seedlings were free from the bondage of the clamping hand. When the clamping force was greater than 3.5 N, the seedling clamping and rotating operation was stable. Based on the experimental results of mechanism performance, taking cucurbita moschata and cucumber as the test objects, the average success rate of the flexible gripper was 98.5%, which was 4.5 percentage points higher than that of the arc-shaped gripper, and the injury rate was reduced by 3.5 percentage points. The grafting speed of the mechanism was 1 052 plants/h, which was 1.72 times of the production efficiency of the same type of single claw grafting machine. The grafting success rate was 96.67%, which greatly improved the production efficiency of grafting robot and met the needs of industrial grafting seedling production. The results can provide a technical reference for the design and optimization of the clamping and conveying mechanism of the high-speed grafting robot.

**Key words:** grafting robot; conveying mechanism; four grippers; flexible clamping; EVA cushioning material

## 0 引言

人工嫁接效率低、嫁接苗品质不标准,无法满足工厂化育苗批量化的生产需求<sup>[1-2]</sup>。近年,我国农村人口老龄化加剧,嫁接育苗用工匮乏,人工成本逐年攀升,使育苗企业面临无人可用的尴尬局面,急需嫁接装备代替人工作业<sup>[3-4]</sup>。机械嫁接能够提高嫁接品质 and 工作效率,逐渐获得育苗企业和生产者认可,能够促进工厂化育苗标准化发展<sup>[5]</sup>。秧苗培育标准化技术难度较大,嫁接机一般需要2人辅助上苗,机器与纯人工作业相比工效不显著,严重制约了嫁接机的广泛推广及应用<sup>[6-7]</sup>。

国内外研制的贴接法嫁接机一般设有上苗、切削和对接3个工位,通过夹持搬运机构将秧苗夹持并在3个工位之间快速往复运移,辅助完成切削和对接作业,人均生产效率约300株/h<sup>[8-12]</sup>。上苗人员在一个嫁接循环完成后需要等待夹持搬运机构返回至上苗工位时才能重新供苗,等待与上苗时间约6s,并且在每个工位作业时其他2个工位均处于空闲状态。分析可知,上苗、切削和对接工位的顺序布局,以及单手爪嫁接往复旋转作业模式是导致上苗等待时间过长的主要原因,若能够实现3个工位同步作业可大幅提高机器嫁接效率。2011年,日本生研机构与井关公司联合开发出自动上苗装置<sup>[13-15]</sup>,使嫁接机生产效率提升至800株/h。该装置可自动完成穴盘内秧苗的抓取、切断和供苗作业,采用机械碰撞式结构调整砧木子叶方向,对秧苗标准化程度要求很高。由于缺乏对秧苗形态信息的智能检测,上苗成功率仅为80%,且存在伤苗问题。针对自动

上苗作业需求,国内嫁接机研发单位开展了基于机器视觉的秧苗外部形态检测技术研究,文献[16-17]提出基于机器视觉,利用椭圆拟合法优化叶面形状,提取幼苗叶面参数和幼苗穴孔位置,能够克服叶面相互遮挡,幼苗识别定位成功率97.5%。文献[18-19]提出基于数学模型的幼苗外观特征自动检测方法,与手工测量值相比,苗茎轴长、轴径和子叶跨度绝对误差分别小于4、0.2、6mm。文献[20-21]提出了一种图像处理综合算法,以葫芦类砧木苗为对象经过500次试验,与手工实际测量值相比,实测值平均误差小于0.0053mm,直径最大误差小于0.02mm。文献[22-23]开发了一种双臂蔬菜嫁接机器人,分别设有两组砧木和接穗切削工位,利用双夹持手搬运机构往复旋转取苗嫁接作业,实现一组夹持手对接作业时另一组夹持手进行取苗作业,嫁接生产效率达884株/h,但未能实现多工位同步作业。综合上述分析,提高嫁接效率可从自动上苗和优化嫁接工序流程开展深入研究,解决嫁接机对人工上苗的依赖,优化嫁接工序与布局实现嫁接机高效作业。

本文设计一种四手爪柔性夹持搬运机构,利用机构顺序间歇式旋转实现上苗、切削和对接3工位并行同步作业,减少人工上苗等待时间,提高机器嫁接效率。开发夹持力可调的柔性夹持手爪,通过分析EVA缓冲材料的压缩力学特性,确定夹持手对秧苗的柔性安全夹持力。通过构建搬运机构旋转动力学仿真模型,分析不同夹持力与秧苗旋转位移的变化规律,确定旋转取苗作业的最小夹持力,并开展机构夹持取苗和嫁接性能试验。以期新型高速嫁接机器人的夹持搬运机构设计提供理论依据和技术参考。

# 1 总体结构与工作原理

## 1.1 机构组成

嫁接机夹持搬运机构主要由切削支撑部件、气路分配器、连接座、旋转台、转盘、对接气缸和夹持手等组成,其结构如图 1 所示。4 组秧苗夹持与对接部件以垂直对称分布安装于转盘上,气路分配器安装于转盘中心和连接座之间,转盘与旋转台的转动部分固定,气路分配器用于解决气动执行器顺序旋转过程中气管缠绕问题。工作时夹持手从上苗工位中取出秧苗,通过旋转台驱动转盘顺序间歇 90° 快速旋转,实现上苗、切削和对接工位的同步作业,提高机器嫁接效率,解决了单手爪往复旋转持苗作业效率低和上苗等待时间长的问题。

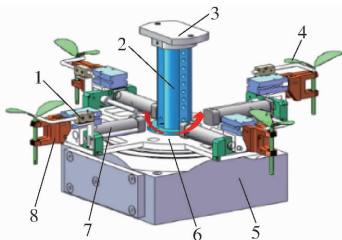


图 1 夹持搬运机构结构示意图

Fig. 1 Diagram structure of clamping and conveying mechanism

- 1. 切削支撑部件 2. 气路分配器 3. 连接座 4. 秧苗 5. 旋转台
- 6. 转盘 7. 对接气缸 8. 夹持手

## 1.2 工作原理

嫁接工位布局设计如图 2 所示。砧木与接穗夹持搬运机构左右对称安装于平台上,二者相对旋转运动。平台两侧设为上苗工位,下部 90° 位置设为切削工位,对称中心 180° 位置设为对接工位,上部 270° 位置设为空位,3 工位同步顺序作业实现夹持搬运机构每旋转 90° 即可完成一株嫁接苗。夹持搬运机构在对接工位耗时大于上苗和切削工位作业时间,因此,每株嫁接苗生产时间以对接工位耗时进行计算。

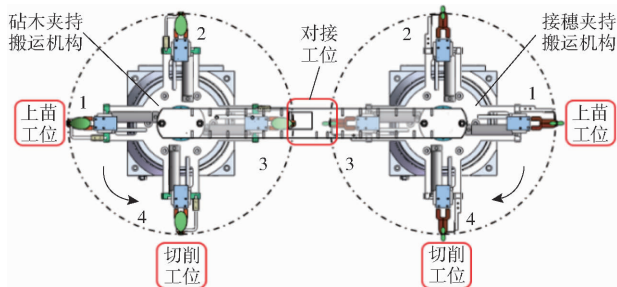


图 2 嫁接机工位布局设计

Fig. 2 Position layout design of grafting machine

工作时,首先将砧木和接穗夹持搬运机构进行复位,1 号夹持手从上苗工位取出秧苗,旋转台驱动转盘旋转 90°,将 1 号夹持手和秧苗输送至切削工

位并完成切削作业,此时 2 号夹持手从上苗工位取苗;旋转台继续驱动转盘旋转 90°,将 1 号夹持手和秧苗输送至对接工位并完成对接与上夹作业,随后释放第 1 株嫁接苗,此时 2 号夹持手和秧苗被输送至切削工位并完成切削作业,3 号夹持手从上苗工位完成取苗;旋转台再次驱动转盘旋转 90°,2 号夹持手和秧苗被输送至对接工位完成对接与上夹作业,并释放第 2 株嫁接苗,此时 3 号夹持手被输送至切削工位完成切削作业,1 号夹持手在上苗工位重新取苗,依次类推完成嫁接循环作业。

## 2 关键部件结构设计

### 2.1 秧苗柔性夹持手

尺寸定位夹持手的夹口形状一般为弧形或 V 形结构,对秧苗的适应性较差,存在苗茎夹持损伤或夹持不稳定等问题。因此,提出一种基于缓冲材料控制夹持力的柔性夹持方法,夹持力取决于缓冲垫厚度  $T$  和夹持距离  $t$ ,如图 3 所示。

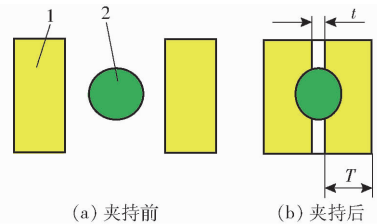


图 3 柔性夹持原理

Fig. 3 Principle of flexible clamp

- 1. 缓冲垫 2. 秧苗

缓冲垫的力学特性与材料硬度、厚度和形变量有关,通过调整缓冲垫的夹持距离能够精准控制秧苗夹持力,缓冲垫压缩力学特性是秧苗柔性夹持控制的主要依据。

柔性夹持手爪结构主要由左夹持手、右夹持手、气动手指、缓冲垫、调节螺栓和锁紧螺母等组成,如图 4 所示。气动手指选用单作用平行开闭气爪,型号为 AIRTAC HFTY10。缓冲垫单侧粘贴于左、右夹持手的夹口内,左、右夹持手对称安装于气动手指,

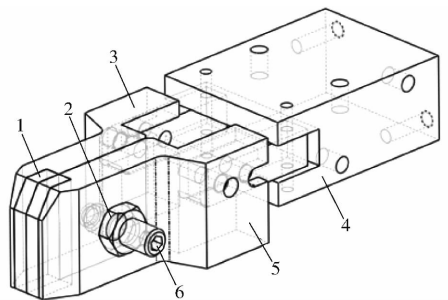


图 4 柔性夹持手爪示意图

Fig. 4 Diagram of flexible clamping hand

- 1. 缓冲垫 2. 锁紧螺母 3. 左夹持手 4. 气动手指 5. 右夹持手
- 6. 调节螺栓

通过气动手指的平行开闭动作带动左、右夹持手开闭,实现缓冲垫对秧苗的夹持。调节螺栓通过螺纹安装于右夹持手外侧,利用锁紧螺母固定调节螺栓。调整调节螺栓在夹持手内的深度位置,可控制缓冲垫闭合后的夹持距离,实现秧苗夹持力的精准调控。作业时,以秧苗安全夹持力为依据调整缓冲垫夹持距离,确保秧苗被柔性夹持。

## 2.2 辅助切削与对接部件

夹持搬运机构既要完成夹持取苗和搬运,还要辅助完成切削和对接作业。接穗辅助切削与对接部件主要由支撑板、调节块、固定座、对接气缸、导向杆和连接块等部分组成,如图5所示。

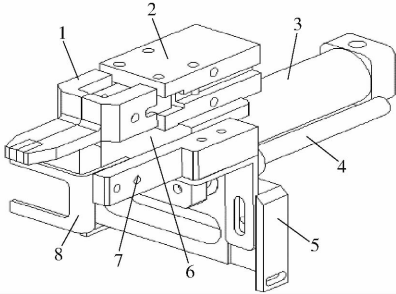


图5 接穗辅助切削与对接部件

Fig. 5 Auxiliary cutting and docking unit of scion

1. 夹持手 2. 气动手指 3. 对接气缸 4. 导向杆 5. 固定座 6. 连接块 7. 调节块 8. 支撑板

支撑板通过调节块安装于固定座一侧,对接气缸与导向杆配合安装于固定座另一侧,气动手指通过连接块与对接气缸和导向杆相连接,整个部件通过固定座安装于转盘上。在上苗和对接工位,对接气缸驱动气动手指伸出完成夹持取苗和切口对接,而在切削工位对接气缸处于缩回状态,其工作行程为30 mm,型号为SMC CDJ2B16-30SZ-B。

支撑板位于夹持手下部,用于支撑接穗苗茎辅助切削。支撑板豁口尺寸影响切削品质,豁口太小,不利于切刀通过;豁口太大,苗茎切削支撑作用降低,豁口尺寸与切削角和秧苗直径有关。接穗苗切削模型如图6所示,经理论计算与分析,切刀轨迹与夹持手前端面、支撑板下部距离均取2 mm,确保切刀能够顺利通过支撑板豁口。

接穗切削高度

$$h = l_{gc} + \frac{l_{ac}}{\tan\alpha} \quad (1)$$

支撑板豁口长度

$$L = \left( \frac{l_{ac} + d}{\tan\alpha} - 3 \right) + \frac{l_{jb}}{\tan\alpha} \quad (2)$$

式中  $d$ ——接穗短轴直径,mm

$\alpha$ ——接穗切削角,(°)

$l_{gc}$ ——子叶基部至夹持手下表面距离,mm

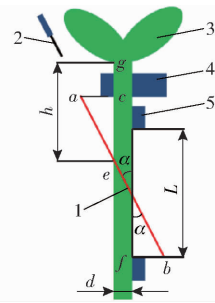


图6 接穗苗切削模型

Fig. 6 Cutting model of scion

1. 切刀作业轨迹 2. 切刀 3. 接穗苗 4. 夹持手 5. 支撑板

$l_{ac}$ ——切刀轨迹至苗茎左侧距离,mm

$l_{jb}$ ——切刀轨迹至苗茎右侧距离,mm

已知夹持手上表面至子叶基部距离为2 mm,夹持手下表面至支撑板上部距离为2 mm,夹持手厚度为3 mm,支撑板厚度为1 mm,支撑板豁口高度为2 mm,切削角 $\alpha$ 取 $20^\circ$ ,西瓜苗短轴茎长度为1.85 mm<sup>[24]</sup>。代入式(1)、(2)得 $h$ 为13.24 mm、 $L$ 为18.56 mm(取整18.5 mm),接穗切削高度满足贴接法嫁接要求的10~15 mm。

砧木与接穗的辅助切削与对接组件结构类似,在夹持手上方设置切削支撑杆,用于在砧木子叶切除过程中支撑苗茎,其详细结构不再赘述。

## 2.3 秧苗搬运转台

夹持搬运机构要求顺序间歇 $90^\circ$ 旋转作业,选取四工位气动旋转分度台作为转盘驱动部件(FESTO DHTG-140-4-A型),由1组两位五通电磁阀控制驱动。工作时,利用高压气流驱动高精度耦合齿轮和锁定销精准定位,输入气压0.6 MPa时转盘额定转速60 r/min,其旋转摆角重复定位精度 $\pm 0.03^\circ$ ,满足嫁接定位精度要求。理论分析可知,对接工位完成切口对接、子叶扶正和上夹作业耗时约3 s,转盘旋转 $90^\circ$ 耗时约0.25 s,对接工位总耗时约3.25 s,理论嫁接速度为1107株/h。

为减少气源动力输出,气动手指和对接气缸均选为单作用输出类型,选取8路气路分配器(MISUMI BMRTN8-M5型)安装于固定座与转盘之间,将分配器旋转部和固定部的气管分离,解决转盘顺序旋转产生的气管缠绕问题。对气动手指和对接气缸进行合理布局,夹持搬运机构转盘直径为400 mm,对接气缸工作行程为30 mm,计算砧木与接穗夹持搬运机构的中心距为460 mm,以此为基准布局上苗、切削和对接工位的执行部件。

## 3 柔性夹持作业参数分析

### 3.1 缓冲垫力学特性

中密度EVA材料对秧苗夹持抗拉特性最优,具

有延长冲击时间和减小冲击力的作用<sup>[25]</sup>。EVA(乙烯-醋酸乙烯共聚物)属于正切型弹性材料,弹性极限压力  $F$  与形变量关系方程为

$$F = \frac{2k_0 d_b}{\pi} \tan \frac{\pi x}{2d_b} \quad (3)$$

式中  $k_0$ —— $x$  为 0 的斜率,初始弹性系数  
 $d_b$ ——位移形变极限,当  $x$  为  $d_b$  时  $F$  为最大极限值  
 $x$ ——缓冲材料压缩形变量

选取硬度 38 中密度 EVA 为试验材料,考察不同厚度 EVA 的压缩力学特性。试样长度 20 mm、宽度 20 mm,压杆直径 8 mm,不同厚度样本各 30 个,试验装置如图 7 所示。

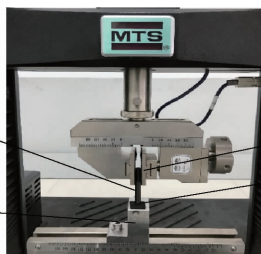


图 7 力学试验装置

Fig. 7 Mechanical test device

1. 支座平台 2. 压杆 3. 压头 4. EVA 试样

试验时,压头以 0.01 mm/s 的加载速度沿试样厚度方向施加载荷,计算机系统通过传感器测试并记录压缩载荷与位移变化的相关数据,测试结果如图 8 所示。

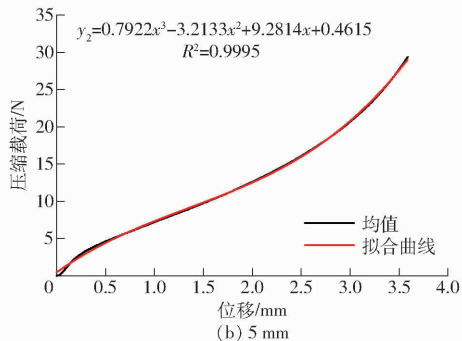
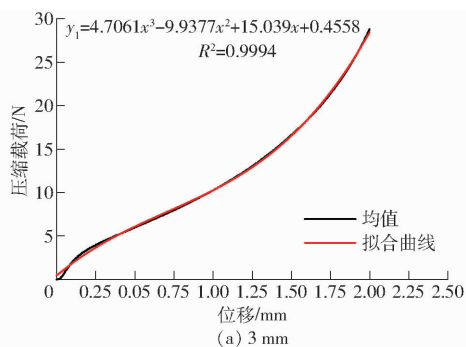


图 8 不同厚度 EVA 压缩特性

Fig. 8 Compress property of EVA with different thicknesses

分析测试结果可知,不同厚度 EVA 材料的压缩特性曲线总体趋势基本一致, $y_1$ 、 $y_2$  拟合方程决定系数  $R^2$  为 0.9994 和 0.9995,方程拟合度较好。夹持手工作时沿苗茎长轴方向夹持固定秧苗,以苗茎长轴弹性极限压力为依据,考察缓冲垫完全闭合条件下对秧苗的夹持力(夹持距离  $t = 0$  mm),结果如表 1 所示。

表 1 不同厚度 EVA 夹持力测试结果

Tab.1 Test results of clamping force with different thickness EVA

秧苗品种	苗茎长轴长度 A/mm	弹性极限压力 F/N	弹性极限压强 P/Pa	厚度 3 mm EVA		厚度 5 mm EVA	
				夹持力 $F_1$ /N	压强 $P_1$ /Pa	夹持力 $F_2$ /N	压强 $P_2$ /Pa
白籽南瓜	4.21	6.41 ± 0.23	410.83	32.16	640.13	13.20	262.76
瓠瓜	3.68	5.41 ± 0.18	378.18	23.80	473.73	11.61	231.07
黄瓜	2.25	5.21 ± 0.20	515.74	11.55	229.90	7.98	158.82
西瓜	2.56	5.23 ± 0.15	568.04	13.30	264.73	8.73	173.81

注:表中数据为平均值,测试样本 30 个。

由表 1 可知,厚度 3 mm EVA 缓冲垫对白籽南瓜、瓠瓜、黄瓜和西瓜苗的压强分别为 640.13、473.73、229.90、264.73 Pa,对白籽南瓜和瓠瓜苗夹持不安全,对黄瓜和西瓜秧苗夹持安全可靠。厚度 5 mm 缓冲垫对 4 种秧苗压强分别为 262.76、231.07、158.82、173.81 Pa,均小于各苗弹性极限压强,表明厚度 5 mm 缓冲垫对 4 种秧苗夹持安全可靠。EVA 缓冲垫弹性随厚度增大而增强,厚度越大缓冲性能越好。因此,建议选择厚度 5 mm 缓冲垫作为夹持手的缓冲材料,也可改变厚度 3 mm 缓冲垫的夹持距离以降低对白籽南瓜和瓠瓜苗夹持力,

但无法保证切削和搬运作业的稳定性。

### 3.2 搬运机构动力学仿真

利用 ADAMS 软件构建搬运机构旋转过程的动力学仿真模型,在额定转速 60 r/min 条件下,分析不同夹持力对秧苗旋转位移的变化规律,确定秧苗脱离夹持手的最小夹持力和稳定夹持的最小极限夹持力,为秧苗柔性夹持研究提供理论支撑。

#### 3.2.1 创建模型及添加载荷

利用 SolidWorks 2017 创建搬运机构模型,并将模型文件导入 ADAMS/Exchange 模块进行干涉检查、结构简化和前处理,如图 9a 所示。搬运机构零

部件材料为铝合金和 304 不锈钢,定义模型零部件材料密度、弹性模量和泊松比等参数。使用 ADAMS/View 模块为模型添加运动副进行自由度约束,设置 icon 调节运动副的尺寸与实际运动相符,如图 9b 所示。

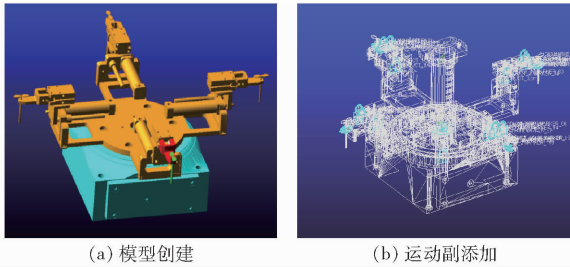


图 9 模型创建与运动副添加

Fig. 9 Creating and movement addition of model

选择冲击函数约束秧苗与夹持手,在 ADAMS/View 模块中设置秧苗与缓冲垫静摩擦因数为 0.215<sup>[24]</sup>。表 1 中黄瓜苗的弹性极限压力最小仅为 5.21 N,因此,将缓冲垫夹持力变量设为 0~5 N。夹持搬运机构转速计算方程表示为  $360d * (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0, 0, 0) + \text{step}(\text{time}, 0, 0.2, 0, 0, 0.3, 1) + \text{step}(\text{time}, 0.9, 0, 1, -1))$ ,速度参数表达含义为 0~0.2 s 执行夹持动作,0.2~0.3 s 通过阶跃函数将转速设置为 60 r/min,0.3~0.9 s 搬运机构保持转速 60 r/min,0.9~1.0 s 搬运机构停止旋转运动。

3.2.2 仿真求解

对模型进行校验,调用 ADAMS/Solver 模块对模型进行仿真计算,在仿真界面 Simulation Control 中输入转盘旋转角度为 180°,仿真时间 0.5 s,步长设为 1000 步。夹持力设计变量在 0~5 N 内平均取 20 个值进行仿真,以秧苗夹持中心为记录点,求解在旋转过程中秧苗沿夹持手的移动变化情况,动力学仿真求解如图 10 所示。

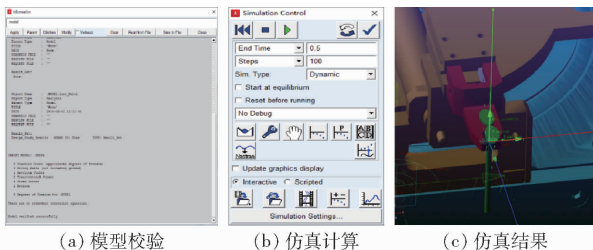


图 10 动力学仿真求解

Fig. 10 Parameter setting of dynamics simulation

不同夹持力下秧苗旋转位移随时间的变化情况如图 11a 所示。对仿真结果后处理得到不同夹持力下秧苗产生旋转位移的变化情况,如图 11b 所示。分析结果可知,夹持力不断增大秧苗位移呈显著下降趋势,夹持力小于 0.4 N 时,秧苗产生位移脱离了夹持手的束缚;夹持力达到 3.5 N 时,

秧苗基本没有发生移动,夹持与旋转搬运作业稳定。

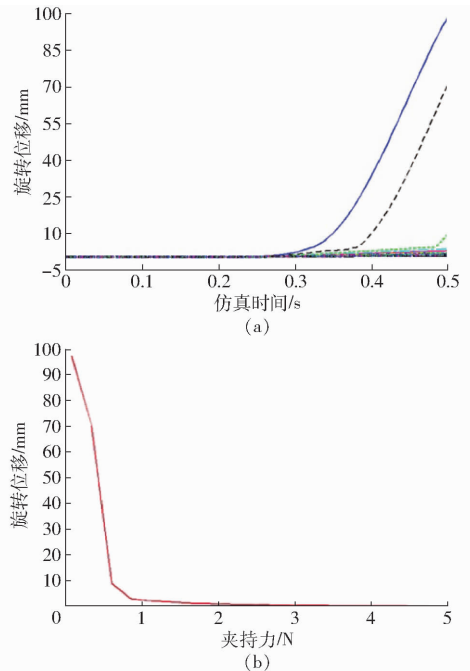


图 11 夹持力与秧苗位移仿真结果

Fig. 11 Simulation results of clamping force and displacement of seedlings

为验证上述模型分析结果,对夹持力 0.4 N 和 3.5 N 进行动力学仿真,如图 12 所示。当夹持力为 0.4 N 时,秧苗在搬运机构旋转至 80°位置时脱离了夹持手;当夹持力为 3.5 N 时,秧苗在夹持手内未产生移动变化,旋转搬运作业稳定可靠。

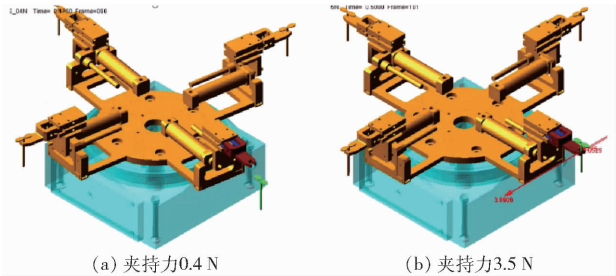


图 12 夹持力 0.4 N 和 3.5 N 秧苗旋转位移变化

Fig. 12 Displacement of seedlings at clamping force of 0.4 N and 3.5 N

4 试验与分析

为确定夹持搬运机构的工作性能参数,分别进行夹持取苗和嫁接作业性能试验。

4.1 夹持取苗试验

试验砧木选用京欣 8 号白籽南瓜苗,接穗选用京研玉玲珑黄瓜苗。利用弧形夹持手与柔性夹持手进行夹苗对比试验,缓冲垫厚度 5 mm,每组随机选取砧木和接穗苗各 100 株,综合考察夹苗成功率和伤苗率,结果如表 2 所示。

表 2 夹苗试验结果

Tab. 2 Test results of clamping seedlings

材料	试验株数/株	成功夹苗	夹苗成功	伤苗
		株数/株	率/%	率/%
弧形夹持手	砧木	100	95.0	3.0
	接穗	100	93.0	4.0
	平均值	100	94.0	3.5
柔性夹持手	砧木	100	98.0	0
	接穗	100	99.0	0
	平均值	100	98.5	0

由于弧形夹持手通过尺寸定位方法夹持苗茎,苗茎直立度和直径影响其夹持结果。由表 2 可知,弧形夹持手平均夹苗成功率为 94.0%,伤苗率为 3.5%,夹苗失败原因是苗茎弯曲未完全放入弧形夹口,以及苗茎直径过大造成挤压损伤。柔性夹持手的夹持力可根据作业对象精准调节,作业时从上苗台中夹持取苗,平均夹苗成功率为 98.5%,比弧形夹持手提高 4.5 个百分点,夹苗失败原因是接穗弯曲未准确放入上苗台,以及砧木子叶展平调整不到位;未发现伤苗现象,表明基于缓冲材料的柔性夹持调整方法能够保证柔性夹苗,夹持手结构设计合理满足机械嫁接技术要求。综合分析,接穗上苗时迅速将弯曲苗茎适当调直,以及控制砧木上苗子叶展平开度和方向定位能够提高夹苗成功率。

#### 4.2 嫁接性能试验

试验砧木和接穗苗分别选用京欣 8 号白籽南瓜苗和京研玉玲珑黄瓜苗,试验指标主要考察机器嫁接成功率和嫁接速度。图 13 为嫁接过程:砧木取苗、砧木切削、接穗取苗、接穗切削、对接上夹和输出嫁接苗。嫁接成功是指砧木和接穗苗在上苗、切苗、对接和上夹环节作业稳定,机器成功完成嫁接苗。嫁接速度是指在单位时间内成功完成嫁接苗的株数。

共进行 3 组嫁接试验,每组试验随机选取砧木和接穗苗各 100 株,结果如表 3 所示。

表 3 成功率与嫁接速度试验结果

Tab. 3 Test result of success rate and grafting velocity

试验组号	试验株数/株	成功嫁接数/株	嫁接耗时/s	嫁接成功率/%	嫁接速度/(株·h <sup>-1</sup> )	夹苗失败数/株	切削不合格数/株	上夹失败数/株
1	100	98	332	98	1 084	1	1	0
2	100	96	345	96	1 044	2	2	0
3	100	96	350	96	1 029	2	1	1
平均值	100	96.67	342.33	96.67	1 052			

由表 3 可知,该机平均嫁接速度为 1 052 株/h,是同类型单手爪嫁接机(嫁接速度 612 株/h)作业

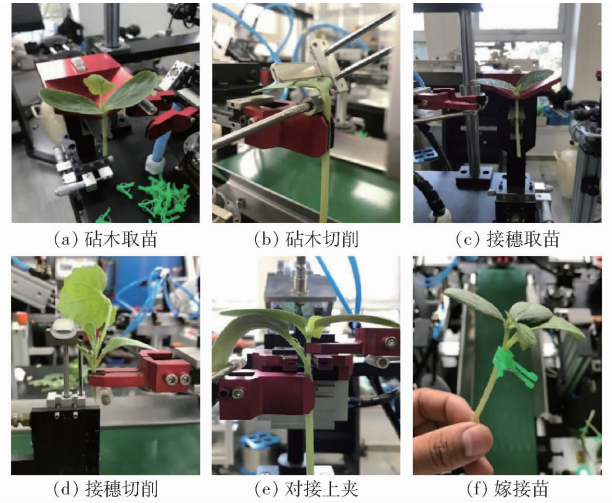


图 13 嫁接过程示意图

Fig. 13 Sketches of grafting processing

效率的 1.72 倍。该机理论嫁接速度为 1 107 株/h,实际嫁接速度与人工上苗熟练程度密切相关。人工上苗时间受秧苗是否达到机械嫁接标准影响较大,操作人员上苗技巧熟练、秧苗符合机械嫁接标准时,机器嫁接速度能够达到较高水平。四手爪夹持搬运机构的设计实现了上苗、切削和对接工位同步作业,有效解决了单手爪嫁接机往复旋转取苗嫁接作业效率低的问题。

该机平均嫁接成功率为 96.67%,嫁接失败的主要原因是砧木、接穗长势未达到机械嫁接标准,导致上苗失败和切削不合格,砧木、接穗切口对接贴合度精度不够以及劣质嫁接夹导致上夹失败。上苗失败主要是砧木苗茎高度和子叶方向定位失准,以及接穗苗茎弯曲导致切削质量不佳,均无法顺利完成嫁接作业。因此,培育符合机械嫁接标准苗对提高嫁接成功率至关重要,利用人工智能技术精准识别秧苗形态信息是实现无人化高效精准嫁接的必要手段。

#### 5 结论

(1) 针对传统嫁接机单手爪夹持搬运机构作业存在夹持伤苗、嫁接工效低、操作者易疲劳等问题,研制了一种四手爪柔性夹持搬运机构,实现上苗、切削和对接 3 工位同步作业,搬运机构每旋转 90°即可完成一株嫁接苗。

(2) 对柔性夹持手、辅助切削与对接部件和搬运旋转台等关键部件进行结构与选型,并完成其关键参数的计算确定。提出了基于缓冲材料的柔性夹持方法,以秧苗弹性极限为依据,通过调整缓冲垫夹持距离实现夹持力的精准调控。分析了不同厚度 EVA 材料对 4 种瓜类秧苗的压缩力学特性,得出在夹持手完全闭合条件下厚度 5 mm EVA 缓冲垫对

4种秧苗夹持安全。构建了搬运机构动力学仿真模型,分析秧苗夹持力与旋转位移的变化规律,搬运机构转速60 r/min条件下,当夹持力小于0.4 N时秧苗脱离了夹持手,当夹持力大于3.5 N时秧苗夹持旋转作业效果稳定。

(3)进行了夹持搬运机构性能试验。选取白籽

南瓜和黄瓜苗为测试对象,柔性夹持手平均夹苗成功率为98.5%,比弧形夹持手提高4.5个百分点,伤苗率降低3.5个百分点,柔性夹苗效果显著。平均嫁接速度为1 052株/h,是同类型单手爪嫁接机作业效率的1.72倍,平均嫁接成功率为96.67%,满足工厂化嫁接育苗生产要求。

### 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 姚彤宝,蔡峰,姜飞. 中国工厂化蔬菜育苗系统集成与发展趋势[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2017, 37(4): 10-14.  
YAO Tongbao, CAI Feng, JIANG Fei. Integration and development trend of industrialized vegetable seedling system in China [J]. Agricultural Engineering Technology (Greenhouse Horticulture), 2017, 37(4): 10-14. (in Chinese)
- [3] 王莉. 中国工厂化育苗生产现状与发展[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2017, 37(4): 15-19.  
WANG Li. Present situation and development of industrialized seedling production in China [J]. Agricultural Engineering Technology (Greenhouse Horticulture), 2017, 37(4): 15-19. (in Chinese)
- [4] 别之龙. 新冠肺炎疫情对蔬菜集约化育苗场的影响和建议[J]. 中国蔬菜, 2020(3): 1-4.  
BIE Zhilong. Impact of novel coronavirus pneumonia on intensive vegetable breeding grounds and suggestions [J]. China Vegetables, 2020(3): 1-4. (in Chinese)
- [5] 辜松. 设施园艺现代生产装备与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [6] 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(温室园艺), 2020, 40(4): 10-17.  
JIANG Kai, FENG Qingchun, WANG Xiu, et al. Research trends of vegetable grafting robot abroad [J]. Agricultural Engineering Technology (Greenhouse Horticulture), 2020, 40(4): 10-17. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 1-13. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170301&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170301&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.001. (in Chinese)
- [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]. Protected Horticulture and Plant Factory, 2019, 28(4): 322-327.
- [9] JIANG Kai, WANG Jinwu, LI Cuiling. Design and test of melon grafting device based on splice grafting [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(4): 65-74.
- [10] KIM H M, HWANG S J. Comparison of pepper grafting efficiency by grafting robot [J]. Protected Horticulture and Plant Factory, 2015, 24(2): 57-62.
- [11] OHKOSHI T. Development of full-automatic grafting robot for cucurbits [J]. Journal of the Society of Agricultural Machinery Japan, 2011, 73(1): 19-21.
- [12] 姜凯. 一种贴接法嫁接机: 201320170332.5 [P]. 2013-04-08.
- [13] 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.
- [14] OHKOSHI T, KOBAYASHI K. Development of automatic seedling feeding device for cucurbits grafting robot (Part 1)—evaluation of automatic stock feeder [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2013, 75(2): 100-107.
- [15] OHKOSHI T, KOBAYASHI K, SHIGEMATSU K, et al. Development of automatic seedling feeding device for cucurbits grafting robot (Part 2)—practicality evaluation of automatic stock feeder [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers, 2016, 78(3): 232-240.
- [16] 贺磊盈,蔡丽苑,武传宇. 基于机器视觉的幼苗自动嫁接参数提取[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 190-195.  
HE Leiyong, CAI Liyuan, WU Chuanyu. Vision-based parameters extraction of seedlings for grafting robot [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 190-195. (in Chinese)
- [17] 孙国祥,汪小昆,何国敏. 基于边缘链码信息的番茄苗重叠叶面分割算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 206-211.  
SUN Guoxiang, WANG Xiaokun, HE Guomin. Segmentation algorithm of overlapping tomato seedling leaves based on edge chaincode information [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 206-211. (in Chinese)
- [18] 崔永杰,王霞霞,徐立青,等. 基于机器视觉的嫁接用苗外观特征自动检测[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 89-95.  
CUI Yongjie, WANG Xiaxia, XU Liqing, et al. Automatic detection for external features of grafting seedlings based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 89-95. <http://www.>



- j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20140414&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.014 (in Chinese)
- [19] 王霞霞. 嫁接用苗培育系统及外观特征检测方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
WANG Xiaxia. Research on environmental regulation method and external features detection of grafting seedlings [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [20] 张雷, 贺虎, 武传宇. 蔬菜嫁接机器人嫁接苗特征参数的视觉测量方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 32-38.  
ZHANG Lei, HE Hu, WU Chuanyu. Vision method for measuring grafted seedling properties of vegetable grafted robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 32-38. (in Chinese)
- [21] 彭曙. 基于视觉的穴盘苗茎参数盘上检测装置研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.  
PENG Shu. Study on a vision based detecting device for stem parameter of hole tray seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
- [22] 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 Wengang, ZHANG Qian, et al. Development and experiment of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 8-14. (in Chinese)
- [23] 姜凯, 郑文刚, 张骞, 等. 蔬菜嫁接机器人切削装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 76-79, 83.  
JIANG Kai, ZHENG Wengang, ZHANG Qian, et al. Design and experiment of grafting robot cutting device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 76-79, 83. (in Chinese)
- [24] 姜凯. 瓜类贴接式机械嫁接机理及装置试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
JIANG Kai. Study on mechanism and experimental device of splice mechanical grafting of cucurbit[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 牟英辉, 辜松, 马稚昱. 瓜类嫁接苗生物力学特性的试验分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 15-20.  
MU Yinghui, GU Song, MA Zhiyu. Experimental analysis on biomechanical properties of cucurbits[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 15-20. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 62 页)

- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [18] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [19] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 59-69.  
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 59-69. (in Chinese)
- [20] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清茬刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 41-51, 217.  
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41-51, 217. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20190605&journal\\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005.](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190605&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005.) (in Chinese)
- [21] 山东省农机化创新示范工程机械化生产作业技术规范. <https://wenku.baidu.com/view/d4c83e5470fe910ef12d2a90242a8956aeeaa26.html>
- [22] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.  
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T2 0865—2017 免(少)耕施肥播种[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 罗伟文, 胡志超, 吴峰, 等. 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 1-10.  
LUO Weiwen, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 1-10. (in Chinese)
- [25] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65-75.  
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65-75. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20180508&journal\\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008.](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180508&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008.) (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10293—2013 单粒(精密)播种机技术条件[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.