

万宇轩,张清钦,何义川,等.链钵育苗移栽机取苗断链装置的设计与试验[J].华中农业大学学报,2025,44(2):265-275.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.027

链钵育苗移栽机取苗断链装置的设计与试验

万宇轩¹,张清钦¹,何义川^{1,2},黄小毛^{1,3}

1.华中农业大学工学院,武汉430070;2.塔里木大学机械电气化工程学院,阿拉尔843300;
3.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉430070

摘要 针对现有链式纸钵育苗移栽机多为株距不可调的不断链移栽、无法满足大株距作物移栽需求的问题,以常规六边形截面链钵苗为试验对象,设计一种链钵育苗移栽机的取苗断链装置。在阐述取苗断链装置工作原理的基础上,通过工作过程理论分析,确定关键部件结构与工作参数取值范围。搭建试验台架进行单因素试验,以夹指开度、载苗滑槽倾角、栽植频率为主要试验因素,以取苗成功率、基质损失率为评价指标,开展三因素三水平正交组合试验,分析各影响因素对评价指标影响关系并进行优化。结果显示,当夹指开度52 mm、载苗滑槽倾角20°、栽植频率45株/min时效果较优,在该参数组合下得出台架试验取苗成功率91.3%、基质损失率14.2%,土槽验证试验取苗成功率87.5%,基质损失率17.4%。

关键词 移栽机;链式纸钵;取苗装置;响应面参数优化;钵苗移栽

中图分类号 S275 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0265-11

育苗移栽是一种可克服作物苗期低温灾害、有效缓解气候原因或连作种植模式造成的用地及生育期茬口矛盾的作物栽培技术,具有缩短作物生长周期、提高土地复种指数、增加产量等优点^[1-2]。链式纸钵育苗移栽是一种起源于日本的轻筒高效作物移栽技术,通过钵体间纸带使钵苗相互连接,实现不间断供苗^[3],省去了钵苗逐个夹取过程,极大提升了移栽效率。

欧美国家较早展开了育苗移栽机械相关研究^[4-5]。日本甜菜株式会社于20世纪80年代开始研制并陆续推出了系列化链式纸质钵育苗册及配套的移栽机,其中所研发的单行手拉式链钵移栽机,通过拖拽展开成链钵体苗实现作物连续固定株距移栽,该装置结构简单紧凑,适合于小型农田,但移栽过程中链钵不切断,无法实现株距调节^[6];美国Plant Tape公司于2014年推出了一种可降解矩形截面栽植带技术及配套的移栽机^[7-8],栽植带成组制备并同步实现基质填充和播种,配套的PT-7型链钵自动移栽机,通过手指式栽植器连续取苗送苗,并在投苗前利用切刀切断分苗断链实现株距调节,该机移栽效率高,但设备结构复杂、价格昂贵,适合大田农场。

以上2家公司的制册技术目前未向我国推广,而大株距作物链钵育苗册制册结构复杂、制备难度大。

近年来,我国学者对钵苗移栽方式以及配套移栽装置进行了相关研究,取得了一系列阶段性成果^[9]。韩长杰等^[10]设计了一款穴盘苗移栽装置,通过气缸控制夹苗装置夹取钵苗茎秆,完成取苗、投苗过程,该装置具有较快栽植速度,可实现辣椒穴盘苗的高效快速移栽,但育苗时需要充分炼苗,否则易造成夹茎损伤;俞高红等^[11]设计了一种基于大重合度非圆齿轮的取苗装置,实现小青菜高密度穴盘苗的取苗,但对钵苗基质块一致性要求较高,且移栽过程中易发生带苗现象;韩绿化等^[12]通过对黄瓜穴盘苗力学特性研究,设计了一种两针夹钳式末端执行器;胡建平^[13]研制了一种插针取苗式移栽机,实现叶菜类蔬菜穴盘苗的移栽;廖庆喜等^[14-15]以及胡乔磊^[16]依据钵苗动力学参数分析,设计了一种针对长方体基质块苗的往复夹取式气动取苗装置,实现油菜基质块苗的移栽,但气动取苗装置结构较为复杂。综上,国内目前移栽多以穴盘苗为主,链钵苗移栽研究相对较少且多处于试验阶段^[17-18]。本研究基于笔者所在课题组前期研制的常规六边形截面链钵育苗

收稿日期:2024-02-22

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662023GXPY002);新疆兵团一师阿拉尔市财政科技计划项目(2024ZB01)

万宇轩,E-mail:1930119241@qq.com

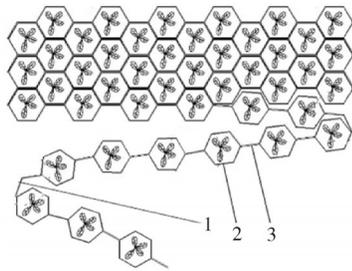
通信作者:黄小毛,E-mail:huangxiaomao@hzau.edu.cn

册制册技术^[19],设计验证一种针对番茄等大株距作物的链钵育苗移栽机的取苗断链装置,为链钵育苗移栽机整机开发提供参考。

1 材料与方 法

1.1 移栽装置结构与工作过程

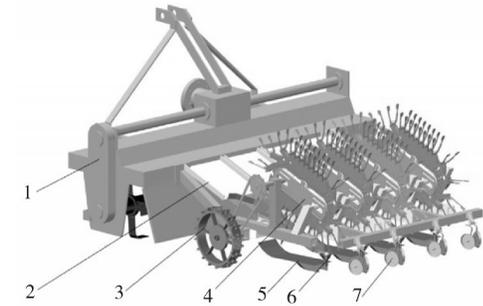
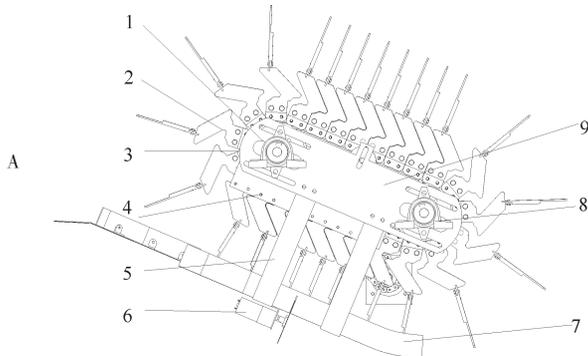
1)链钵育苗册结构。试验所用链钵育苗册,育苗前呈册状折叠储存,育苗时将纸册撑开至平铺状态,册内各钵体呈六边形截面蜂巢状平面聚焦分布,移栽时育苗钵体在牵引力作用下可呈链状快速展开,实现连续稳定供苗。如图1所示,展开时育苗册内钵体连接处长度呈规律变化,同层相邻钵体连接处长度与单个钵体边长相同,为15.2 mm。异层钵体连接处长度为钵体边长的2倍,为30.4 mm。钵体间连接处长度每间隔6钵长度变化1次,记作1个循环。



1. 异层钵体连接处 Connection of heterogeneous bowl body; 2. 链钵钵体 Chain bowl body; 3. 同层钵体连接处 Joint of bowl bodies on the same layer.

图1 链钵展开示意图

Fig.1 Diagram of unfolding the chain pot



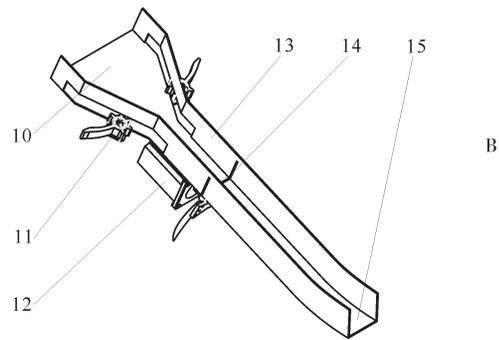
1. 卧式旋耕机 Horizontal rotary tiller; 2. 承苗盘 Seedling tray; 3. 行走限深轮 Walking depth limit wheel; 4. 移栽单体 Seedling unit; 5. 苗沟犁 Field plow; 6. 投苗装置 Seedling feeding device; 7. 覆土圆盘 Field covered disc.

图2 链钵育苗移栽机整机设计图

Fig.2 Schematic diagram of chain pot seedling transplanting machine

如图3所示,每个移栽单体又由取苗断链装置、载苗滑槽、苗沟犁和覆土圆盘等组成,取苗断链装置主体由辅助喂入轮、断链装置和通过一组链传动机构带动的取苗运苗拨指组成。

3)工作过程。工作时,旋耕机负责土壤疏松和苗床整备,移栽装置在机组牵引作用下,地轮驱动移栽单体完成取苗、运苗、切割断链和投苗等动作,苗沟犁实现被动拉沟,覆土圆盘在钵苗投入苗沟后完成覆土压实。工作前准备时,首先由人工将钵苗链状牵引拉出并把首个钵体置于载苗滑槽前端某组已



A: 整体结构图 Overall structural diagram; B: 载苗滑槽结构图 Structural diagram of seedling carrying chute; 1. 链轮 Chain wheel; 2. 取苗运苗拨指 Picking finger; 3. 链条 Chain; 4. 链条导轨 Chain guide; 5. 辅助喂入轮 Auxiliary feeding wheel; 6. 切割断链装置 Cutting device; 7. 苗沟犁 Field plow; 8. 载苗滑槽 Seedling carrying chute; 9. 固定侧板 Fixed side panel; 10. 载苗滑槽前端 Front end of seedling carrying chute; 11. 辅助喂入轮 Auxiliary feeding wheel; 12. 切割断链装置 Cutting device; 13. 渐变滑槽内壁 Inner wall of chute; 14. 切割刀槽 Cutting blade groove; 15. 载苗滑槽后端 Rear end of seedling carrying chute.

图3 取苗断链装置移栽单体结构图

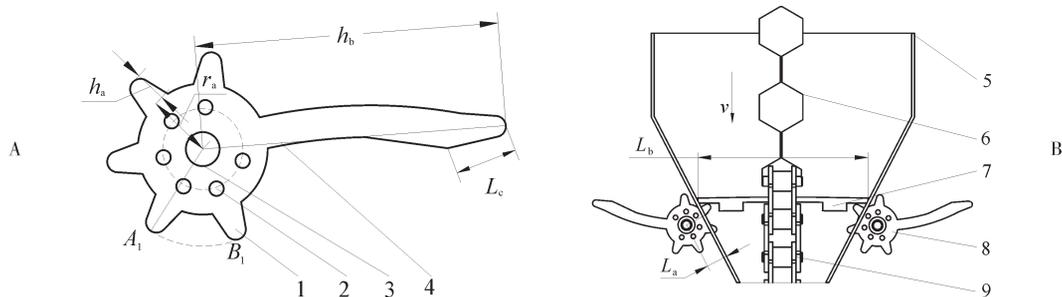
Fig.3 Structure diagram of seedling unit

合拢的取苗运苗拨指的运动正前方,并调整好辅助喂入轮角度。工作时,取苗运苗拨指在链条带动下将对应的苗钵向前运移,当切割断链装置的传感器检测到苗钵到达设定位置时,刀片旋转切断链钵中间连接纸带,得到独立苗钵,并在取苗运苗拨指推动下运移到载苗滑槽末端,拨指张开,苗钵靠重力掉入苗沟完成投苗。链条正下方设置有安装于机架的链条导轨,为链条提供精确位置导向,防止因自重导致链条垂度过大影响相邻2个取苗运苗拨指间的啮合效果。

1.2 关键部件设计

1) 辅助喂入轮。链钵苗展开后,呈6个1组循环,组内钵体间距为组间间距的一半。为确保苗钵与均匀分布的取苗运苗拨指之间相互协调,设计有1

对辅助喂入轮,对称安装于载苗滑槽前端开口处两侧。如图4所示,辅助喂入轮圆周上均匀分布5个短齿和1个长齿,其数量、位置与链钵循环规律具有严格对应关系。作业时,根据链钵相对位置调整辅助喂入轮至合适相位,使夹指完成当前钵苗夹取。运动时链条带动后续夹指沿滑槽侧壁滑动,2个夹指受到渐变滑槽侧壁约束作用由打开状态逐渐闭合,夹指与2对称喂入轮外侧各齿的根部相接触,以此推动其做间歇圆周运动。当夹取对象为同组钵体连接处时,夹指与短齿相接触,仅带动辅助喂入轮转动而对链钵无辅助送苗作用;当夹取对象为组间钵体连接处时,夹指与辅助喂入轮长齿接触,推动钵苗向后移动一定距离,抵消因连接处过长导致夹取位置前移影响,实现该钵苗的位置补偿。



A: 辅助喂入轮结构 Structure of auxiliary feeding wheel; B: 辅助喂入轮位置 Auxiliary feeding wheel position; 1. 短齿 Stub gear tooth; 2. 定位槽 Positioning slot; 3. 转轴 Rotation shaft; 4. 长齿 Long tooth; 5. 滑槽内壁 Inner wall of chute; 6. 链钵 Chain pot; 7. 夹指 Clamping finger; 8. 辅助喂入轮 Auxiliary feeding wheel; 9. 链条 Chain.

图4 辅助喂入轮工作原理图

Fig.4 Working principle diagram of auxiliary feeding wheel

辅助喂入轮由转轴、长齿、短齿和定位滚珠组成,其中定位滚珠通过与喂入轮表面凹槽相接触实现精准定位与间歇运动。长、短齿均匀分布于喂入轮四周,其数量与位置同钵体间连接处长度循环相对应。

图4A中点 A_1 、 B_1 为辅助喂入轮两齿端点,为保证辅助喂入轮间歇运动,两齿端点处弧长应小于取苗运苗拨指间距,即:

$$\begin{cases} \widehat{A_1B_1} \leq L_m \\ \widehat{A_1B_1} = \frac{60}{180} \pi (r_a + h_a) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, r_a 为齿根部与圆心距离,mm。由于拨指夹取链钵位置固定,取苗运苗拨指间距 L_m 由同层相邻链钵间距决定,如图4A所示,当链钵展开后两相邻夹取点位距离为钵体边长的3倍,故 $L_m = 3a = 45.6$ mm。

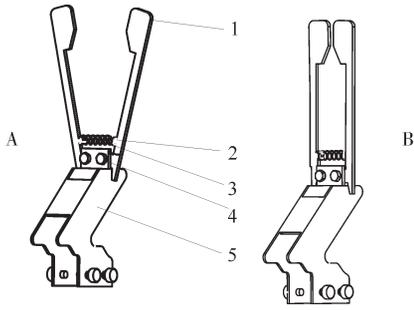
为保证辅助喂入轮工作顺畅且无干涉,应满足如下条件:

$$\begin{cases} h_a \geq L_a + \Delta B \\ 2(h_b - r_a) + \Delta B \leq L_b \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, h_a 为长齿齿高,mm; h_b 为辅助喂入轮圆心至长齿末端最远距离,mm; ΔB 为余量宽度,取值为5 mm; L_a 为载苗滑槽突出部长度,mm; L_b 为2个喂入轮间距最大值,mm。结合其他部件尺寸,确定 h_a 取值为7 mm, h_b 为59.5 mm, r_a 为12 mm, $\widehat{A_1B_1}$ 为23 mm可确保辅助喂入轮平顺运行。

2) 取苗运苗拨指。取苗运苗拨指如图5所示,构型为对开式,由固定座、压缩弹簧、夹指等构成。非工作状态下夹指为常开状态,经链条牵引夹指在渐变滑槽约束及压缩弹簧作用下逐渐闭合,待经过投苗点离开滑槽后,夹指不受侧壁约束重新打开。其中固定座将取苗运苗拨指固定于链条某节链节之上,夹指用于夹取、推送钵苗。

取苗运苗拨指工作时垂直于载苗滑槽平稳推动钵苗向投苗口处运动,理想状态下,各拨指间相对位

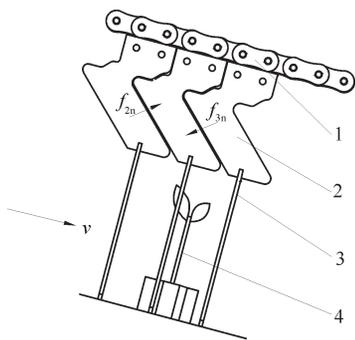


A: 夹指张开状态 Finger opening state; B: 夹指闭合状态 Finger closed state. 1. 夹指 Clamping finger; 2. 弹簧固定板 Spring fixed plate; 3. 压缩弹簧 Compression spring; 4. 夹指固定板 Finger clamp fixing plate; 5. 拨指固定座 Finger fixed seat.

图5 取苗运苗拨指结构图

Fig.5 Structure diagram of picking and transportation device

置保持不变。实际作业过程中,因受自重及苗钵反作用力影响,拨指会发生一定程度上轻微倾转,影响钵苗切断、送苗和投苗效果^[20],因此需对固定座结构进行稳定设计优化。如图6所示,将固定座形状设计为不规则曲线外形,处于送苗阶段时,各拨指固定座间外形上经过链轮圆周段运动啮合后紧密贴合从而提供约束力,避免单个固定座因前后不均匀受力造成的摇摆现象,降低拨指位置偏移的程度和概率,提高送苗成功率。



1. 链条 Chain; 2. 拨指固定座 Finger fixed seat; 3. 夹指 Clamping finger; 4. 钵苗 Pot.

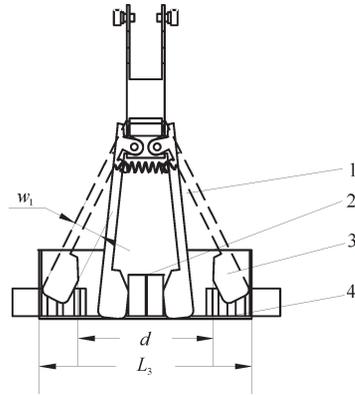
图6 取苗运苗拨指工作状态

Fig.6 Working status of picking and transportation device

图6中, f_{1t} 为送苗阶段夹指所受阻力, N; f_{2n} 、 f_{3n} 为相邻固定座支持力, N。由图7知, 2个夹指回转中心距离为定值, 夹指开度的大小与间距直接影响取苗效果。为防止取苗阶段夹指张开状态下与钵体发生干涉, 2个夹指距离最小值应大于钵体宽度; 为防止张开角度过大导致运动过程阻力过大影响移栽效果, 2个夹指距离应小于最大载苗滑槽宽度, 定义2个夹指距离最小值为夹指开度, 则夹指开度应满足:

$$\omega + 2\Delta B \leq d \leq L_3 - 2\omega_1 - 2\Delta B \quad (3)$$

式(3)中, ω 为钵体宽度, 取值为 26 mm; d 为夹指开度, mm; L_3 为载苗滑槽开口处宽度, 取值为 120 mm; ω_1 为夹指宽度, 取值为 20 mm。由此确定夹指开度的理论范围为 36~68 mm, 其最佳开度需要通过试验确定。

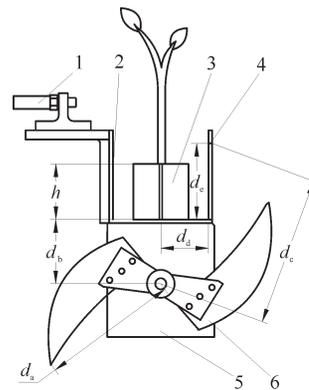


1. 夹指 Clamping finger; 2. 钵苗 Chain pot; 3. 载苗滑槽开口处 Opening of seedling chute; 4. 辅助喂入轮 Auxiliary feeding wheel.

图7 夹指与钵苗位置关系图

Fig.7 Diagram of the position relationship between the pick-up finger and the pot seedling

3) 切割断链装置。为适应大株距作物移栽需求, 根据链钵特征, 于载苗滑槽中部下端开口并布置切割断链装置。采用旋转切割方式按需切断钵体连接纸带, 将链式钵体分割为独立单元, 配合整机前进速度及地轮传动比的变化实现移栽株距的按需调节。切割断链装置结构如图8所示, 由步进电机、切割刀片、刀架、激光反射传感器和控制系统等组成。两切割刀片呈中心对称安装于刀架两侧, 刀架与步进电机输出轴相连。



1. 激光反射传感器 Laser reflection sensor; 2. 载苗滑槽 Seedling carrying chute; 3. 钵苗 Chain pot; 4. 刀槽顶端 Top of blade groove; 5. 步进电机 Stepping motor; 6. 切割刀片 Cutting blade.

图8 切割断链装置

Fig.8 Cutting device

为保证钵体连接纸带顺利切断,切割刀片及刀架等的相关尺寸需满足:

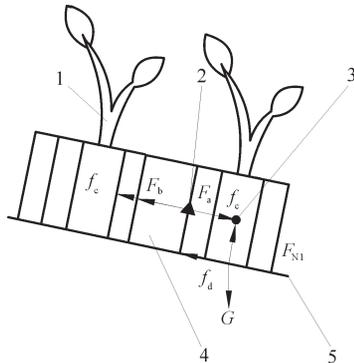
$$\begin{cases} d_a \geq h + d_b + \Delta B \\ d_c = \sqrt{d_d^2 + (d_b + d_e)^2} \leq d_a \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, d_a 为刀架旋转中心距切割刀片顶点长度, mm; d_b 为刀架旋转中心距载苗滑槽底端长度, 为 22 mm; d_c 为刀架旋转中心距刀槽开口顶点位置, 为 67 mm; d_d 为载苗滑槽侧壁与刀架旋转中心水平距离, 为 26 mm; d_e 为载苗滑槽底端距刀槽开口顶端距离, 为 40 mm。钵体高度 h 为 30 mm, 余量宽度 ΔB 为 5 mm, 因此只有当 $d_a > 67$ mm 才可保证钵体连接处被完整切断且与滑槽不产生干涉, 故取 d_a 为 70 mm。

取苗装置开始运行后, 链钵由取苗运苗拨指以设定速度送至载苗滑槽进入送苗阶段, 切割断链装置同步启动。当夹指经过探测点位时, 激光束照射至金属夹指发生光的表面反射, 反射激光由传感器接收后以电信号形式传输给单片机, 控制步进电机带动切割刀片以相应转速切断钵体连接处, 当刀片旋转角度达到 180° 即停止运动, 随后重复上述流程。

1.3 移栽过程稳定参数设计

1) 取苗阶段。取苗阶段时, 链钵经由取苗运苗拨指带动沿载苗滑槽向下运动, 此阶段拨指与链钵应保证不发生滑动现象^[21]。如图9所示, 将链钵视为整体, 对其进行受力分析, 应满足:



1. 钵苗茎秆 Bowl seedling stem; 2. 钵苗夹持受力点 Pot seedling clamping force point; 3. 钵苗质心 Center of mass of bowl seedlings; 4. 钵体连接处 Pot connection point; 5. 载苗滑槽 Seedling carrying chute.

图9 取苗阶段受力分析图

Fig.9 Force analysis during seedling picking stage

$$\begin{cases} \sum F_x = f_c + f_d + F_b - F_a - nG \sin \alpha = 0 \\ \sum M_o = -F_{N1} \frac{l_1}{2} + nG \cos \alpha \frac{l_1}{2} + f_d \frac{h}{2} = 0 \\ \mu > \tan \alpha \\ f_d = \mu F_{N1} \\ F_{N1} = nG \cos \alpha \\ f_c = \mu F_b \end{cases} \quad (5)$$

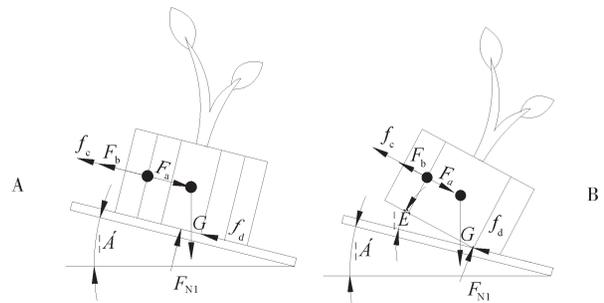
式(5)中, F_a 为夹指对钵苗推力, N; F_b 为夹指对钵苗夹持力, N; f_c 为夹指对钵苗摩擦力, N; f_d 为载苗滑槽对钵苗摩擦力, N; F_{N1} 为载苗滑槽对钵苗支持力, N。由式(5)可得:

$$\alpha \leq \arctan \mu \quad (6)$$

$$F_b = \frac{F_a + nG \sin \alpha - \mu F_{N1}}{\mu} \quad (7)$$

式(5)~(7)中, μ 为钵苗与夹指、载苗滑槽间摩擦系数, 取值 0.6。因此, 由式(6)可知, 为保证送苗阶段链钵苗于滑槽中平稳移动, 载苗滑槽倾角需满足 $\alpha \leq 31^\circ$, 最佳倾斜角度需通过试验确定。式(7)中, G 为钵苗重力, 取值 0.098 N; α 为载苗滑槽倾角, 取值 20° ; n 为被夹取链钵苗数量, 取值为 5; F_a 为夹指对钵苗推力, 经测量为 6.5 N; 计算得夹指夹持力 $F_b = 10.82$ N。

2) 送苗阶段。送苗阶段时, 链钵经由断链装置切断为单个钵苗, 夹指推动钵苗向投苗口运动。为保证载苗滑槽中钵苗状态稳定, 需要防止栽植速度过快导致钵苗在接触夹指瞬间发生倾翻现象。如图10所示, 对单个钵苗接触夹指瞬间进行分析。理想状态下, 夹指对钵苗推力 F_a 与钵苗质心处于同一水平线, 钵苗沿载苗滑槽向投苗口平稳下滑, 无翻转力矩产生, 不存在倾翻的可能, 如图10A所示。但实际过程中, 过快的栽植速度会导致钵苗与载苗滑槽间形成夹角 λ , 夹指对钵苗推力 F_a 与钵苗质心不再重合, 加剧了倾翻的可能, 如图10B所示。



A: 送苗阶段钵苗理想状态 Ideal state of bowl seedlings during the seedling delivery stage; B: 钵苗倾翻临界状态 Critical state of bowl seedling overturning.

图10 送苗阶段受力分析

Fig.10 Force analysis during seedling delivery stage

对此状态下钵苗进行受力分析, 为保证钵苗不出现倾翻现象, 需满足:

$$\begin{cases} \sum F_x = F_f + F_a - f_c - f_d - G \sin \alpha = 0 \\ \sum F_y = F_{N1} - G \cos \alpha = 0 \\ F_f = ma_1 \\ a_1 = \frac{V_x}{t} = \frac{\sum F_x}{m} \end{cases} \quad (8)$$

夹指与钵苗接触前后,钵苗所受合力对夹指的力矩始终为零,满足能量守恒定律,因此临界状态下钵苗动能与势能相互转化^[22]。当钵苗处于倾翻临界状态时,钵苗动能变化量为:

$$\Delta E_k = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (9)$$

钵苗势能变化量:

$$\Delta E_m = mg \cdot \frac{h}{2} [\cos(\alpha + \lambda) - \cos \alpha] \quad (10)$$

动能势能相互转化得:

$$\Delta E_k = \Delta E_m \quad (11)$$

整理得:

$$v \leq \sqrt{gh [\cos(\alpha + \lambda) - \cos \alpha]} \quad (12)$$

移栽过程中,每分钟载苗滑槽中钵苗输送数量与每分钟从投苗处落入苗杯钵苗数量一致。因此,载苗滑槽中钵苗输送速度与栽植频率存在如下关系:

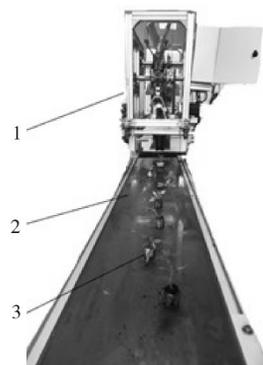
$$A = \frac{1000v}{x_1} \quad (13)$$

式(8)~(13)中, m 为单个钵苗的质量,取值10g; v 为载苗滑槽中钵苗输送速度,m/s; A 为栽植频率,株/min; x_1 为链钵移栽装置中2个夹指间距,取值45.6mm。当 λ 为 15° 时,钵苗为倾翻临界状态,计算得输送速度为0.042m/s,即栽植频率55株/min。因此,为确保送苗过程钵苗与夹指接触瞬间不发生倾翻,栽植频率需小于55株/min。

1.4 单因素与二次正交组合试验

为验证取苗断链装置效果与参数优化合理性,搭建链钵移栽单体台架试验平台(图11)。

1)单因素试验。根据前期预试验知,栽植频率、载苗滑槽倾角和夹指开度对取苗成功率、基质损失率有较大影响,为明确各工作参数对移栽装置性能评价指标的影响,对栽植频率、载苗滑槽倾角和夹指开度分别进行单因素试验。为保证钵苗最佳移栽效果,应遵循“零速投苗”原则,落苗输送带运动速度与载苗滑槽中钵苗输送速度保持一致。根据预试验效果,试验时设定栽植频率范围为35~55株/min,每间隔5株/min为1个水平;设定倾角取值范围 $15^\circ \sim 35^\circ$,每间隔 5° 为1个水平;设定夹指开度设定为36、44、52、60、68mm共5个水平,单因素试验中其余变量取



1. 台架试验样机 Test bench prototype; 2. 自动输送带 Automatic feed inclined racetrack; 3. 钵苗 Chain pot.

图11 台架试验平台

Fig.11 Bench test platform

理论分析中间值。

定义钵苗自取苗阶段开始至落入苗沟结束,经由取苗运苗拨指夹取,无倾倒通过载苗滑槽,且未发生钵苗卡顿现象作为取苗成功;移栽过程结束后,取苗成功钵苗数量与钵苗移栽总数百分比为取送苗成功率 P_1 ,以钵苗完成移栽过程前后质量差作为基质损失率 P_2 ^[23],具体计算公式如下:

$$P_1 = \frac{n - n_s}{n} \times 100\% \quad (14)$$

$$P_2 = \frac{m_q - m_h}{m_q} \times 100\% \quad (15)$$

式(14)~(15)中, n 为链钵苗总个数; n_s 为链钵苗取送苗失败个数; m_q 移栽前链钵苗总质量,g; m_h 移栽后链钵苗总质量,g。

2)二次正交组合试验。为探究栽植频率、载苗滑槽倾角、夹指开度的最佳参数组合,使用Design-Expert软件开展三因素三水平二次正交试验^[24],因素水平编码表如表1所示。

表1 二次正交组合试验因素水平编码表

Table 1 Test factor and level coding table

水平 Level	栽植频率/(株/min) Planting frequency	载苗滑槽倾角/(°) Inclination of slot	夹指开度/mm Finger opening angle
-1	40	15	44
0	45	20	52
1	50	25	60

根据试验因素水平表,进行17组移栽性能二次旋转正交组合台架试验,得所试验方案如表2所示,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

1)栽植频率。由图12A可知,随着栽植频率的

表2 二次正交组合试验方案及结果
Table 2 Experimental scheme and results

编码 Code	x_1	x_2	x_3	取苗成功率 $P_1/\%$ Success rate of seedling collection	基质损失率 $P_2/\%$ Matrix loss rate
1	-1	-1	0	89.5	15.3
2	1	-1	0	90.0	16.8
3	-1	1	0	86.7	15.6
4	1	1	0	89.6	15.3
5	-1	0	-1	88.2	18
6	1	0	-1	85.3	17.6
7	-1	0	1	82.7	21.1
8	1	0	1	87.7	18.3
9	0	-1	-1	85.6	18.9
10	0	1	-1	86.9	19.2
11	0	-1	1	84.2	20.7
12	0	1	1	82.6	21.4
13	0	0	0	89.3	17.2
14	0	0	0	91.3	16.2
15	0	0	0	90.3	16.6
16	0	0	0	90.0	16.8
17	0	0	0	87.9	17.5

加快,取苗成功率缓慢上升后快速下降,基质损失率缓慢下降后急剧上升。当栽植频率为35~45株/min时,钵苗喂入效果良好,同时较慢的取苗频率降低了钵苗与载苗滑槽间的滑动摩擦力,基质损失率保持较低水平;栽植频率增大为45~55株/min时,取苗成功率急剧下降,基质损失率呈逐渐增大趋势,主要原因是栽植频率过快致使拨指夹取精度下降影响链钵切断,进而导致取苗失败,同时投苗阶段钵苗落入苗沟时碰撞相对速度较大,基质损失率也随之上升。

2)载苗滑槽倾角。由图12B可知,倾角在15°~25°时,取苗成功率随倾斜角度增加小幅波动,基质损

失率小幅上升后大幅下降,此时投苗处滑槽与苗沟相对高度最小,钵苗与苗沟接触瞬间相对速度最小,故有较低基质损失率;当载苗滑槽角度为25°~35°时,随着倾角提高,钵苗在轨道中倾翻滚几率增加,基质易受到挤压、碰撞导致钵体破损,从而导致取苗成功率下降,基质损失率上升。

3)夹指开度。如图12C所示,随着夹指开度的增大,取苗成功率先升后降,基质损失率先降后升。当开度小于44mm时,拨指与链钵易发生干涉导致移栽过程中断,致使取苗成功率下降,同时投苗阶段较小张开角度不利于钵苗脱离夹指,导致投苗位置偏移,造成苗床中钵体倾倒,基质损失率升高;当开度大于60mm时,送苗过程中拨指所受摩擦阻力增大,易造成夹取位置改变,致使取苗失效、基质损失率上升。

2.2 二次正交组合试验结果

通过单因素试验可知,栽植频率、载苗滑槽倾角、夹指开度对取苗成功率、基质损失率有显著影响。由表3可知,取苗成功率 P_1 模型中有4个回归项影响显著,分别是一次项 x_1 、 x_3 、交互项 x_1x_3 以及二次项 x_3^2 ,其余项影响不显著;基质损失率 P_2 模型中有7个回归项影响显著,分别是 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_3^2 ,其余项影响不显著。通过对试验数据的分析,剔除不显著因素后的回归模型为:

$$\begin{cases} P_1 = 89.76 + 0.94x_1 - 1.1x_3 + 1.98x_1x_3 - 4.2x_3^2 \\ P_2 = 16.86 - 0.47x_1 - 0.25x_2 + 0.98x_3 - 0.9x_1x_2 + 0.1x_2x_3 - 0.04x_1^2 + 0.117x_3^2 \end{cases} \quad (16)$$

由回归方程分析可知,取苗成功率、基质损失率回归方程模型 P 值小于0.05,证明回归方程模型显著,回归模型在实验范围内有较好拟合效果。

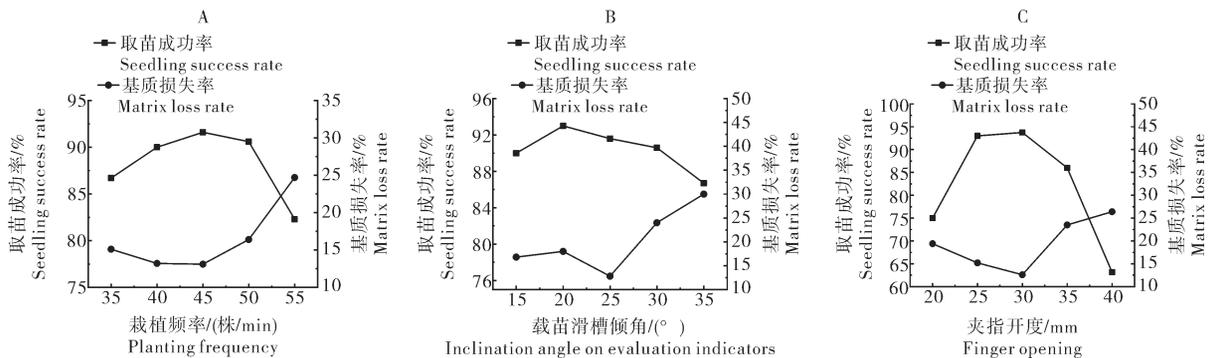


图12 栽植频率(A)、载苗滑槽倾角(B)及夹指开度(C)对评价指标影响

Fig.12 Effect of transplanting frequency(A), inclination angle(B), finger opening(C) on evaluation indicators

表3 回归方程方差分析

Table 3 Variance analysis of regression equation

方差来源 Source of variance	取苗成功率 P_1 / % Success rate of seedling collection				基质损失率 P_2 / % Matrix loss rate			
	平方和 Sum of squares	均方差 Mean square error	F	P	平方和 Sum of squares	均方差 Mean square error	F	P
模型 Model	117.90	13.1	10.54	0.002 6	67.70	7.52	13.56	0.000 2
x_1	7.03	7.03	5.66	0.049 0	1.80	1.80	3.25	0.054 2
x_2	0.28	0.28	0.23	0.648 8	0.50	0.50	0.90	0.026 6
x_3	9.68	9.68	7.79	0.026 9	7.60	7.60	13.71	0.000 9
x_1x_2	4.84	4.84	3.89	0.089 0	3.24	3.24	5.84	0.017 4
x_1x_3	15.6	15.6	12.55	0.009 4	1.44	1.44	2.60	0.077 9
x_2x_3	2.10	2.10	1.69	0.234 5	0.04	0.04	0.072	0.036 5
x_1^2	0.74	0.74	0.60	0.464 8	8.61	8.61	15.53	0.002 7
x_2^2	2.24	2.24	1.81	0.221 0	0.07	0.07	0.13	0.356 0
x_3^2	74.45	74.45	59.91	0.000 1	46.41	46.41	83.69	<0.000 1
失拟态 Anomorph state	2.31	0.77	0.48	0.712 8	2.85	0.95	3.68	0.299 4
误差 Error	6.39	1.60			1.03	0.26		
总和 Sum	126.6				71.58			

由表3可知,各因素对于取苗成功率 P_1 影响程度由高到低依次为夹指开度、栽植频率、载苗滑槽倾角,各因素对基质损失率 P_2 的影响程度由高到低依次是夹指开度、载苗滑槽倾角、栽植频率。影响因素交互项

x_1x_3 的 P 值小于0.05,对取苗成功率有显著影响;影响因素交互项 x_1x_2 、 x_2x_3 的 P 值小于0.05,对基质损失率有显著影响。利用Box-Behnken Design 8.0.6对数据分析并生成响应面曲线图,如图13所示。

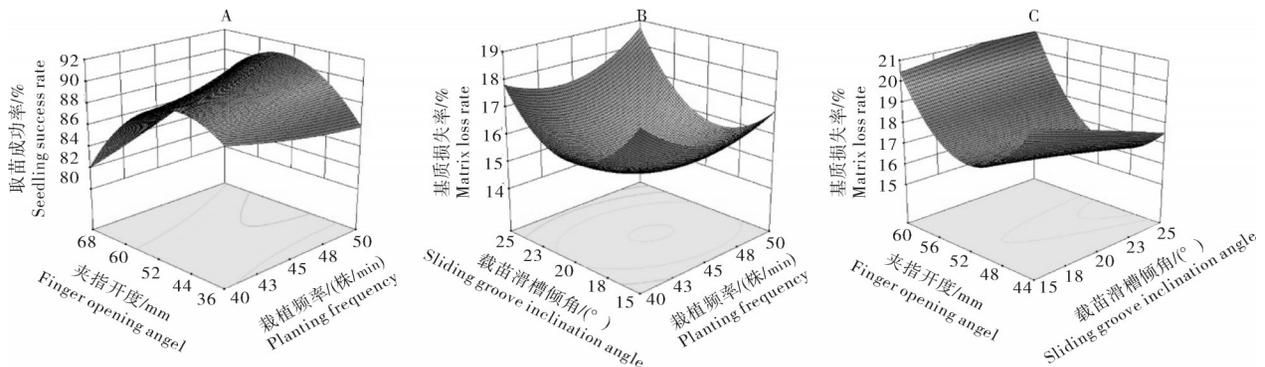


图13 交互因素对评价指标影响

Fig.13 Impact of interactive factors on evaluation indicators

由图13A可知,当载苗滑槽倾角稳定不变时,取苗成功率 P_1 随着栽植频率的增大而降低,随着夹指开度的增大呈现出先升高再降低的变化趋势,响应面沿夹指开度方向变化较快,沿栽植频率方向变化较慢。在倾斜角度一定的情况下,夹指开度对取苗成功率的影响比栽植频率的影响更加显著。栽植频率45株/min,夹指开度为52mm时,取苗成功率最高。图13B中,当夹指开度为52mm时,基质损失率 P_2 随着栽植频率和载苗滑槽倾角的增大呈先降后升趋势,响应面曲线沿栽植频率方向变化较快,说明在夹指开度一定的情况下,栽植频率对基质损失率的

影响比载苗滑槽倾角更加显著。如图13B栽植频率为45株/min,载苗滑槽倾角为20°时,基质损失率最低。由图13C可知,栽植频率为45株/min,基质损失率 P_2 随着载苗滑槽倾角增大而减小,随着夹指开度的增大先减小后增大,响应面沿夹指开度方向变化较快,说明在栽植频率一定时,夹指开度对基质损失率的影响比载苗滑槽倾角更加显著。夹指开度为52mm、载苗滑槽倾角为25°时基质损失率最低。

为确保取苗断链装置具有较好的工作性能,以取苗成功率和基质损失率作为优化目标,进行工作参数优化,利用Design-Expert优化模块进行优化求

解,其目标函数与约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 40 \leq x_1 \leq 50 \\ 15 \leq x_2 \leq 25 \\ 44 \leq x_3 \leq 60 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

优化后得到影响因素最佳参数组合为栽植频率45株/min、载苗滑槽倾角 20° 、夹指开度52mm,在该参数组合下取苗成功率91.3%、基质损失率14.2%。采用获取的最佳参数组合进行台架试验,结果显示:取苗成功率89.7%、基质损失率16.12%。因钵苗个体生长状态差异,根系对土壤基质的包裹度不一致,造成链钵夹取运移状态下基质松动脱落存在差异,导致取苗送苗效果验证值与优化结果分别存在1.60%和1.92%的误差,但处于合理范围内。

2.3 土槽试验

2023年11月上旬于华中农业大学现代农业示范基地土槽实验室进行实际作业效果试验(图14)。试

验前为移栽单体台架加装行走装置,采用人力手拉方式进行单行移栽,试验时作业速度设定为0.3~0.6 km/h,设置栽植频率45株/min,载苗滑槽倾角为 20° ,夹指开度52mm。参考JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》中移栽相关试验方法,每次取连续的64株链钵苗作为数据样本,进行3组重复试验^[25],试验对象为苗龄35d的番茄链钵苗,单个钵苗质量约为12g,试验结果如表4和表5所示。

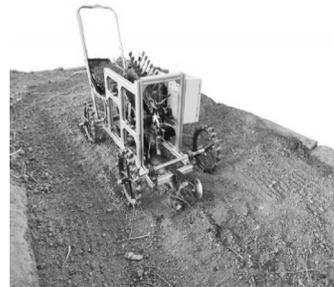


图14 土槽试验

Fig.14 Soil bin test

表4 取苗成功率土槽试验结果

Table 4 Results of soil test for success rate of seedling retrieval

组数 Number of groups	苗数 Number of seedlings	取苗成功数 Number of successful seedlings	取苗成功率/% Success rate of seedling collection	平均取苗成功率/% Average success rate of seedling collection
1	64	57	89.1	
2	64	55	85.9	87.5
3	64	56	87.5	

表5 基质损失率土槽试验结果

Table 5 Matrix loss rate soil test results

组数 Number of groups	m_q/g	m_h/g	基质损失率/% Matrix loss rate	平均基质损失率/% Average matrix loss rate
1	768	666.7	17.2	
2	768	655.8	17.3	17.4
3	768	662.8	17.7	

土槽试验指标平均值分别为取苗成功率87.5%、基质损失率17.4%,满足移栽成功率不低于85%的要求,与优化结果相对误差分别为3.8%和3.2%。

3 讨论

基于常规六边形截面链钵育苗册制册技术,结合链钵作业特点,设计了一种针对番茄等大株距作物的链钵育苗移栽机的取苗断链装置。阐述了该装置工作原理,对移栽过程钵苗受力情况进行理论分析,确定了机构平稳运行的关键部件结构与工作参数取值范围。开展了以栽植频率、载苗滑槽倾角和

夹指开度为变量,以取苗成功率、基质损失率为评价指标的单因素试验,确定了在栽植频率为40~50株/min,载苗滑槽倾角为 $15^\circ \sim 25^\circ$,夹指开度为44~60mm时具有较优效果。进行了栽植频率、载苗滑槽倾角和夹指开度对取苗成功率、基质损失率影响的三因素三水平二次正交试验,采用响应面法进行参数优化,得到最佳参数组合:栽植频率45株/min,载苗滑槽倾角 20° ,夹指开度52mm,该参数组合下取苗成功率91.3%、基质损失率14.2%,土槽试验结果为取苗成功率87.5%,基质损失率17.4%,移栽装置满足番茄钵苗移栽机的基本作业要求。

参考文献 References

- [1] 李君明, 项朝阳, 王孝宣, 等. “十三五”我国番茄产业现状及展望[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 13-20. LI J M, XIANG C Y, WANG X X, et al. Current situation of tomato industry in China during ‘the thirteenth Five-Year Plan’ period and future prospect [J]. China vegetables, 2021 (2) : 13-20 (in Chinese with English abstract).
- [2] 周明, 李常保. 我国番茄种业发展现状及展望[J]. 蔬菜, 2022(5): 6-10. ZHOU M, LI C B. Present situation and prospect of tomato seed industry in China [J]. Vegetables, 2022 (5) : 6-10 (in Chinese).
- [3] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53. YU X X, ZHAO Y, CHEN B C, et al. Current situation and prospect of transplanter [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45 (8) : 44-53 (in Chinese with English abstract).
- [4] LAWRENCE M J, BUCKMASTER D R, LAMONT W J, et al. A pneumatic dibbling machine for plastic mulch [J]. Applied engineering in agriculture, 2007, 23(4): 419-424.
- [5] JAVANMARDI J, MORADIANI M. Tomato transplant production method affects plant development and field performance [J]. International journal of vegetable science, 2017, 23 (1): 31-41.
- [6] 须永守, 寺沪秀和, 伊藤纯雄, 等. 连续组装的培育和移栽秧苗用纸钵 [P]. CN1133670 A, 1996-10-23. SUYONGSU S, TERUHIKO H, ITO J X, et al. Paper bowls for continuous assembly of cultivation and transplanting seedlings [P]. CN1133670A, 1996-10-23 (in Chinese).
- [7] GUSI G C J, GERARDUS S B. An apparatus for transplanting plants: IL20140235538 [P]. IL235538D0, 2015-05-13.
- [8] HU J P, YAN X Y, MA J, et al. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot [J]. Computers and electronics in agriculture, 2014, 107: 64-72.
- [9] 周海燕, 杨炳南, 颜华, 等. 旱作移栽机械产业发展现状及展望[J]. 农业工程, 2015, 5(1): 12-13. ZHOU H Y, YANG B N, YAN H, et al. Status quo and development prospects of dry land transplanting machine industry [J]. Agricultural engineering, 2015, 5(1): 12-13 (in Chinese with English abstract).
- [10] 韩长杰, 肖立强, 徐阳, 等. 辣椒穴盘苗自动移栽机设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 20-29. HAN C J, XIAO L Q, XU Y, et al. Design and experiment of the automatic transplanter for chili plug seedlings [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 20-29 (in Chinese with English abstract).
- [11] 俞高红, 王系林, 刘建刚, 等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 94-103. YU G H, WANG X L, LIU J G, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot seedlings [J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(1): 94-103 (in Chinese with English abstract).
- [12] 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 23-30. HAN L, MAO H P, YAN L, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (7) : 23-30 (in Chinese with English abstract).
- [13] 胡建平, 刘育彤, 刘伟, 等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 110-117. HU J P, LIU Y T, LIU W, et al. Experiment on combined seedling picking device with top clamping and pulling [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53 (S1) : 110-117 (in Chinese with English abstract).
- [14] 廖庆喜, 王洋, 胡乔磊, 等. 油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 93-102. LIAO Q X, WANG Y, HU Q L, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(11): 93-102 (in Chinese with English abstract).
- [15] 廖庆喜, 刘明峰, 张照, 等. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 49-56. LIAO Q X, LIU M F, ZHANG Z, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (11): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- [16] 胡乔磊. 油菜基质块苗移栽机设计及其工作机理 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. HU Q L. Design and working mechanism of transplanter for rapeseed substrate block seedlings [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [17] 韩霞, 陈海涛. 番茄链式纸钵苗移栽机分离机构设计与优化试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 161-168. HAN X, CHEN H T. Design and optimization experiment of separation device for tomato chain paper pot seeding transplanter [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(5): 161-168 (in Chinese with English abstract).
- [18] 赖庆辉. 链式钵育苗甜菜自动高速移栽机关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011. LAI Q H. Study on key technologies of automatic high-speed transplanter for sugarbeet seedlings in chain paper bowl [D]. Changchun: Jilin University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [19] 黄小毛, 张清钦, 万宇轩, 等. 一种钵育苗钵册制册方法及装置 [P]. CN115589869A, 2023-01-13. HUANG X M, ZHANG Y Q, WAN Y X, et al. A method and device for making a chain bowl seedling register [P]. CN115589869A, 2023-01-13 (in Chinese).
- [20] 谭本芳, 段宏兵, 付锦, 等. 基于RecurDyn-EDEM耦合的三角链杯勺式马铃薯排种器性能仿真 [J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(3): 218-227. TAN B F, DUAN H B, FU J, et al. Performance simulation of triangle Chain cup-spoon potato seed feeder based on RecurDyn-EDEM coupling [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58 (3) : 218-22 (in Chinese).

- nese with English abstract).
- [21] 徐陶, 崔志超, 管春松, 等. 基质块苗移栽机送取苗装置的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 50-55. XU T, CUI Z C, GUAN C S, et al. Design and experiment of sending and taking seedling device of substrate block seedling transplanter [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(7): 50-55 (in Chinese with English abstract).
- [22] 崔志超, 管春松, 徐陶, 等. 甘蓝基质块苗移栽机双排链式栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 46-54. CUI Z C, GUAN C S, XU T, et al. Design and experiment of double-row chain planting device for cabbage substrate block seedlings [J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(6): 46-54 (in Chinese with English abstract).
- [23] 崔志超, 管春松, 徐陶, 等. 基质块苗移栽机挡销式自动送苗分苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 68-79. CUI Z C, GUAN C S, XU T, et al. Design and experiment of the automatic conveying and separating device for substrate block seedling transplanting machine [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(13): 68-79 (in Chinese with English abstract).
- [24] 许博, 廖庆喜, 王洋, 等. 油菜钵苗移栽机气动插入式取苗过程分析与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(6): 119-129. XU B, LIAO Q X, WANG Y, et al. Analysis and experiment of seedling process for inserting paper rape pot seedling transplanter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(6): 119-129 (in Chinese with English abstract).
- [25] 谢守勇, 阳尚宏, 刘军, 等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 1-10. XIE S Y, YANG S H, LIU J, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 1-10 (in Chinese with English abstract).

Design and experiment of seedling picking and chain breaking device for a chain paper pot seedling transplanter

WAN Yuxuan¹, ZHANG Yuqin¹, HE Yichuan^{1,2}, HUANG Xiaomao^{1,3}

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Wuhan 430070, China

Abstract A seedling picking and chain breaking device for a chain paper pot seedling transplanter was designed with conventional hexagonal cross-section chain pot seedlings to solve the problems of continuous chain transplanting with unadjustable spacing of plant and inability to meet the requirements of transplanting crops with large spacing of plant in the existing chain paper pot seedling transplanters. The structure of key components and the range of working parameters were determined through theoretical analyses of the working process based on explaining the working principle of the seedling picking and chain breaking device. An experiment bench was set up for the experiment with single factor. The orthogonal combination experiment of three factors including the opening of the pinch finger, the inclination angle of the seedling chute and the planting frequency and three levels with the success rate of seedling taking and the rate of matrix loss as the evaluation indexes was conducted to analyze and optimize the effect of each factor on the evaluation index. The results showed that the effect was better when the opening of the pinch finger was 52 mm, the inclination angle of the seedling chute was 20°, and the planting frequency was 45 plants/min. The success rate of seedling taking and the rate of matrix loss in the bench experiment and the soil trough verification experiment was 91.3% and 14.2%, and 87.5% and 17.4% under this combination of parameters. It will provide reference for the development of the whole chain pot seedling transplanter.

Keywords transplanter; chain paper pot; seedling picking device; optimization of response surface parameters; bowl seedling transplantation

(责任编辑: 陆文昌)