doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.004

甘薯裸苗移栽机自动开合分体式夹苗装置设计与试验

潘志国[1]　李永山[1]　席　娟[2]　杨松梅[3]　张　还[1]　邱保华[1]　杨　正[1]　郭　翔[1]

(1.青岛农业大学机电工程学院,青岛 266109;2.河北科技工程职业技术大学机电工程系,邢台 054000;
3.海南大学机电工程学院,海口 570228)

摘要:针对现有指夹式甘薯移栽机送苗环节人工放苗效率低、损伤率高的问题,本文基于 2ZQX-1 钳夹式甘薯裸苗移栽机,设计一种可自动开合的分体式夹苗装置。在阐述总体结构及工作原理基础上,通过理论分析优化橡胶夹参数以降低秧苗损伤,结合运动学分析建立橡胶夹运动方程,确定机构参数并设计弧板最优轮廓线。单因素试验得到输送速度取值范围为 30~70 mm/s,运用 Box-Behnken 中心组合设计方法进行台架试验,以苗夹位移、橡胶夹倾斜夹角、输送速度为试验因素,夹持合格率为评价指标,利用响应面分析交互因素对试验指标的影响规律,确定影响因素的最佳取值,结果表明:当苗夹位移 12.6 mm、倾斜夹角 16.9°、输送速度 49.5 mm/s 时,夹持合格率达 95.3%,送苗效果最优;再以不同放苗方式(分体式/一体式)为分类因素、输送速度为数据因素,开展全因素田间试验,结果表明:分体式夹苗装置可适配 44.0 mm/s 的输送速度,夹持合格率达 97.0%,损伤率为 3.9%,较一体式夹苗装置总体工作效率提高 31%。该装置作业速度快、稳定性高,为甘薯机械化移栽高效作业提供了技术方案。

关键词:甘薯移栽机;送苗装置;分体式;开合控制机构

中图分类号:S225.7+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0037-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Automatic Opening-closing Split-type Seedling Clamping Device for Sweet Potato Bare Seedling Transplanter

PAN Zhiguo[1]　LI Yongshan[1]　XI Juan[2]　YANG Songmei[3]　ZHANG Huan[1]　QIU Baohua[1]
YANG Zheng[1]　GUO Xiang[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*
2. *Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Vocational University of Technology and Engineering, Xingtai* 054000, *China*
3. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and high damage rate of manual seedling placement in the seedling feeding link of the existing finger-clamped sweet potato transplanter, a split-type seedling clamping device that can automatically open and close was designed based on the 2ZQX-1 clamp-type bare-root sweet potato transplanter. On the basis of expounding the overall structure and working principle, the rubber clip parameters were optimized through theoretical analysis to reduce seedling damage. The motion equation of the rubber clip was established via kinematic analysis, and the mechanism parameters were determined along with the optimal contour line of the arc-shaped plate. The single-factor test results indicated that the conveying speed range was 30~70 mm/s. Taking seedling clip displacement, rubber clip inclination angle and conveying speed as influencing factors, and clamping qualification rate as the evaluation index, bench tests were conducted by using the Box-Behnken central composite design method. Variance analysis was performed on the test results, and response surface analysis was applied to explore the influence rules of interactive factors on the test index, thereby determining the optimal values of the factors. The results showed that when the seedling clip displacement was 12.6 mm, the inclination angle was 16.9°, and the conveying speed was 49.5 mm/s, the clamping qualification rate reached 95.3%, achieving the optimal seedling feeding effect. Subsequently, full-

收稿日期:2025-12-29　修回日期:2026-01-09

基金项目:海南省重点研发项目(ZDYF2023XDNY039)

作者简介:潘志国(1977—),男,教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail:peter_panzg@163.com

通信作者:张还(1977—),男,副教授,主要从事智能农业机械装备研究,E-mail:huan0804@163.com

factor field experiments were carried out with different seedling feeding modes (split-type/integrated-type) as the categorical factor and conveying speed as the numerical factor. The results demonstrated that the split-type seedling clamping device could adapt to a conveying speed of 44.0 mm/s, with the clamping qualification rate remaining at 97.0% and the damage rate at 3.9%, increasing the overall operating efficiency by 31% compared with the integrated seedling clip. This device featured high operating speed and stability, which can provide a technical solution for the efficient operation of mechanized sweet potato transplanting.

Key words: sweet potato transplanting machine; seedling feeding device; split form; opening and closing control mechanism

0 引言

甘薯是全球重要的粮食与经济作物,我国种植面积和产量居世界前列,移栽质量直接决定其生长节律与产量,是影响规模化种植成效的核心环节[1-3]。尤其在海南及南方热带地区,甘薯作为特色高效经济作物,对适配热带农艺的机械化、智能化移栽装备需求迫切。但当前甘薯生产存在装备与技术适配双重短板:一是现有移栽机未突破自动分苗技术,多为“人工分苗+机械输送”模式,效率与稳定性依赖人工[4-5];二是高温高湿气候及品种特性使薯苗脆度高、形态不规整,传统的一体式夹苗装置需人工强制放苗,效率低且易致秧苗断裂。这种人工依赖性强、损伤率高、效率低的现状,已成为制约海南及南方地区甘薯机械化移栽高效推进的主要瓶颈[6-8]。

为解决上述问题,国内外学者围绕甘薯移栽机开展了大量研究,但现有技术方案仍存在明显局限。美国大型链夹式裸苗移栽机[9],其刚性夹持结构对苗体规格适应性差,易造成秧苗机械损伤,且复杂结构导致维护成本高昂;日本带夹式移栽机,采用毛刷固定秧苗[10-11],毛刷弹性与摩擦特性受环境影响显著,固定效果不稳定,毛刷磨损快、清洁困难[12-13]。文献[14-15]提出的带式甘薯水平移栽机输苗装置,对秧苗规格要求严苛,传送带易因环境因素打滑、磨损,输苗精度受跑偏与惯性影响,漏苗现象频发;何宇凡[16]提出的基于挠性圆盘的栽植方法,武广伟等[17]提出苗带喂苗装置,两者皆通过预处理形成苗带的方式减少人工干预,但薯苗预处理复杂,固定可靠性不足[18];贺益龙[19]设计的旋转杯式喂苗机构,杯口尺寸固定,对特殊形态薯苗适配性有限,易出现下落不畅或姿态偏移问题[20];张永政等[21]提出线式供苗方法,虽实现集成化作业,但对苗体规整度要求严苛、设备成本与维护难度高,难以适配中小规模种植及形态不规则的甘薯裸苗。综上,现有送苗装置普遍存在夹持方式不合理、对秧苗适配性不足的问题,不仅导致秧苗损伤率较高、作业效率低下,难以兼顾人工放苗效率与秧苗完整性,亟需研发新型送苗结构以破解这一瓶颈[22-23]。

本研究针对现有一体式夹苗装置的缺陷,以2ZQX-1型钳夹式甘薯裸苗移栽机为基础,设计可自动开合的分体式夹苗装置。通过建立橡胶夹-秧苗接触力学模型优化结构参数以降低夹持损伤,结合运动学分析实现放苗区与取苗区的精准开合控制,再通过台架试验确定最佳工作参数并经田间试验进行验证,旨在为甘薯机械化移栽高效作业提供技术方案[24-25]。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构及技术参数

2ZQX-1型钳夹式甘薯裸苗移栽机[26]主要由机架、旋耕起垄装置、施肥装置、覆膜装置、置苗架、送苗装置以及栽植装置等构成,其基本结构如图1所示。

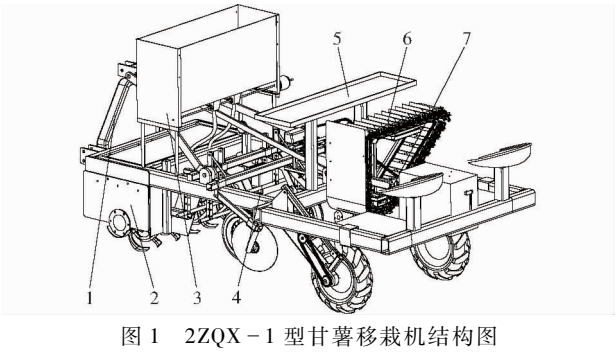

图1 2ZQX-1型甘薯移栽机结构图

Fig. 1 2ZQX-1 sweet potato transplanter structural diagram

1. 机架 2. 旋耕起垄装置 3. 施肥装置 4. 覆膜装置 5. 置苗架 6. 送苗装置 7. 栽植装置

1.2 送苗装置结构及技术参数

送苗装置由固定架、输送链轮、输送链条、弧板及夹苗装置构成。为规避地轮干涉,固定架设计为倒梯形结构,输送链轮可转动安装于固定架,输送链条套设其上,形成夹苗装置的安装与传动载体,夹苗装置沿输送链条均匀间隔固定,基本结构如图2所示。该装置主要技术参数见表1。

夹苗装置由链板、橡胶夹、摇杆滑块机构及拉伸弹簧组成,其中链板与链条连接,起到上下支撑作

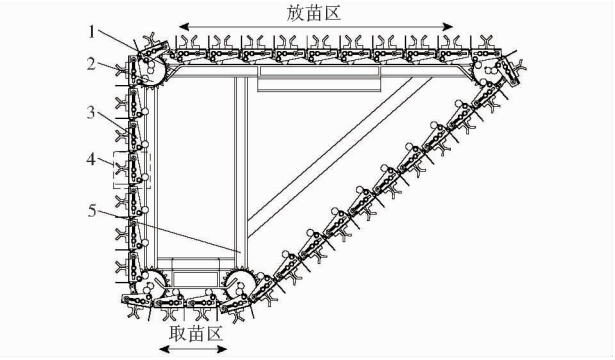

图 2　送苗装置结构示意图

Fig. 2　Schematic of seedling feeding device structure

1. 弧板　2. 输送链轮　3. 输送链条　4. 夹苗装置　5. 固定架

表 1　送苗装置主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of seedling feeding device

参数	数值/型号
输送速度/(mm·s^{-1})	≤100
链条型号	08A
夹苗装置间距/mm	76.2
链板宽度/mm	68

用；两个橡胶夹为夹苗的执行机构，其中右侧固定、左侧可水平移动；摇杆滑块机构与弧板协同控制橡胶夹的开合。其基本结构如图 3 所示。

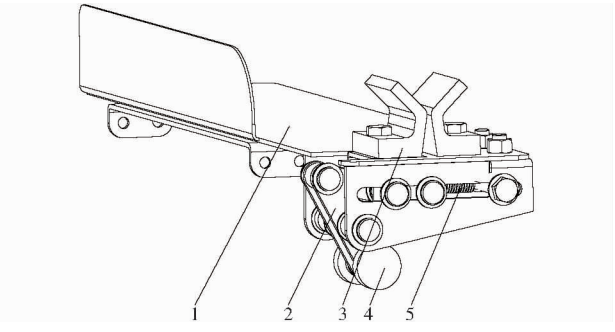

图 3　分体式夹苗装置结构示意图

Fig. 3　Structure diagram of split seedling clamping device

1. 链板　2. 摇杆滑块机构　3. 橡胶夹　4. 滑轮　5. 拉伸弹簧

1.3　工作原理

夹苗装置在链条带动下做连续逆时针周转运动：运动至放苗区时，弧板克服弹簧拉力顶起滑轮，使橡胶夹张开，便于人工放苗；离开放苗区后，失去弧板作用，弹簧复位带动橡胶夹闭合，送苗装置与栽植装置布局如图 4 所示。当继续运动至取苗区时，弧板再次作用使橡胶夹处于半打开状态，此时秧苗因重力作用向下移动且不脱落，取苗后进入下一循环，取苗过程如图 5 所示。

2　夹苗装置关键部件设计

夹苗装置存在完全闭合-完全打开、完全打开-完全闭合、完全闭合-半打开、半打开-完全闭合 4 种

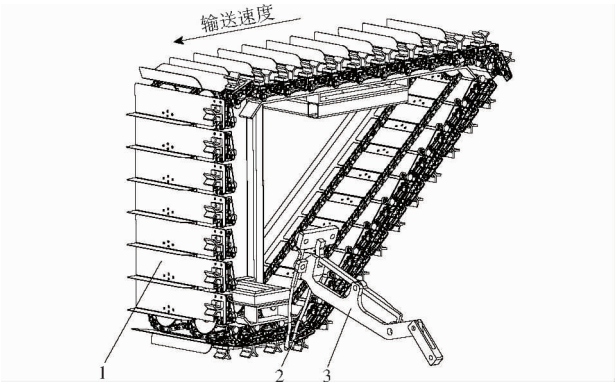

图 4　送苗装置与栽植装置布局示意图

Fig. 4　Schematic of layout of seedling feeding device and planting device

1. 送苗装置　2. 秧苗　3. 栽植装置

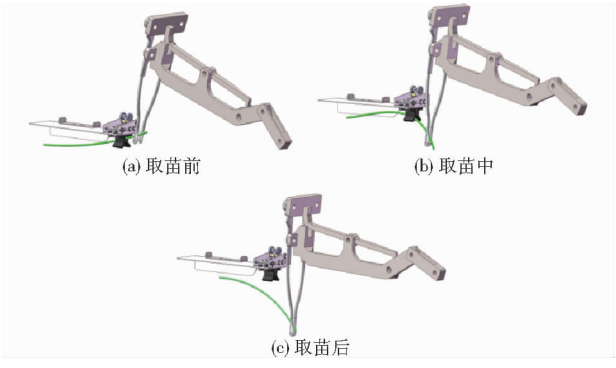

图 5　栽植装置取苗过程示意图

Fig. 5　Schematics of seedling picking process of planting device

工况。其中完全打开-完全闭合为夹苗阶段，完全闭合-半打开为松苗阶段，这两个阶段直接影响秧苗损伤情况。

夹苗阶段是为保证输送过程中秧苗不脱落，在人工放苗后将秧苗固定的过程。夹苗动作如图 6 所示。

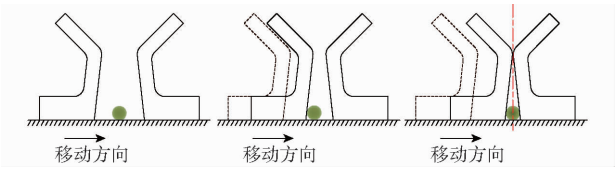

图 6　橡胶夹夹苗动作简图

Fig. 6　Rubber clip seedling action diagram

松苗阶段是为了使最小直径的秧苗刚好不脱落，可有效降低栽植装置取苗过程中因强制分离产生的摩擦损伤与姿态扰动，松苗动作如图 7 所示。

2.1　橡胶夹结构参数

橡胶夹分为直面夹和斜面夹两种结构，二者受力特性存在差异，如图 8 所示。直面夹通过双侧平面夹持秧苗，易因应力集中造成挤压损伤；斜面夹则可实现渐变式接触，增大有效接触面积、优化应力分布，同时与底部形成稳定三角形空间，提升秧苗固定效果。因此选用斜面夹作为夹苗执行机构。

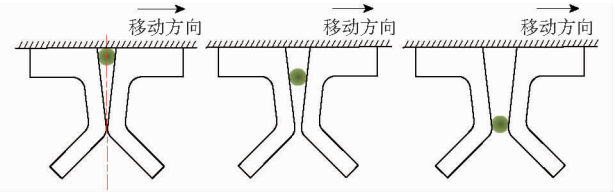

图 7 橡胶夹松苗动作简图

Fig. 7 Rubber clip loosening seedling action diagram

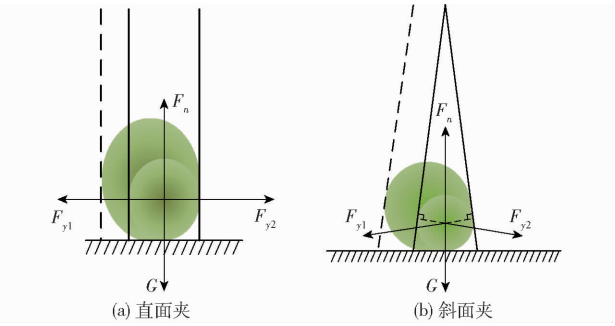

图 8 不同形状受力分析图

Fig. 8 Stress analysis of different shapes

橡胶夹完全闭合时,其两对斜面的夹角定义为 γ。该夹角以秧苗最小直径 $r_{\min}$ 为设计基准,结合闭合状态的预设预紧力,可保障不同直径秧苗的夹紧力稳定性与夹持可靠性。夹角 γ 直接决定橡胶夹的结构特征,其取值增大时,橡胶夹斜面长度随之递增,如图 9 所示,进而影响秧苗与夹爪的接触面积及应力分布状态。

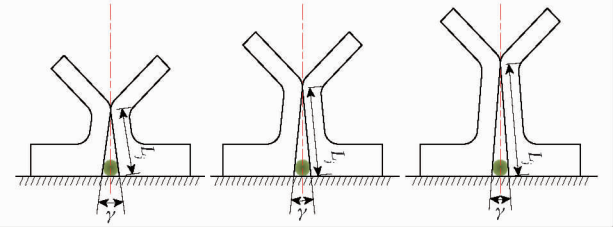

图 9 不同夹角结构尺寸示意图

Fig. 9 Structure size diagram of different angles

为精准约束 γ 的合理取值范围,通过构建橡胶夹半打开状态的结构模型,系统探究斜面夹角橡胶夹张开长度、不同直径秧苗下落高度差及橡胶夹斜面长度等关键参数的量化关系,为夹角 γ 的优化设计提供理论依据。

不同直径秧苗下落高度差示意图如图 10 所示,由几何关系得

$$\begin{cases} a = r_{\min}(1+\cos\gamma) \\ c = \dfrac{r_{\max}-r_{\min}}{\sin\dfrac{\gamma}{2}} \\ L_j = \dfrac{r_{\min}\left(1+\sin\dfrac{\gamma}{2}\right)}{\sin\dfrac{\gamma}{2}\cos\dfrac{\gamma}{2}} \end{cases} \tag{1}$$

式中 a——橡胶夹半打开状态时张开位移,mm

c——秧苗下落高度差,mm

$r_{\max}$——秧苗最大直径,mm

L_j——橡胶夹斜面长度,mm

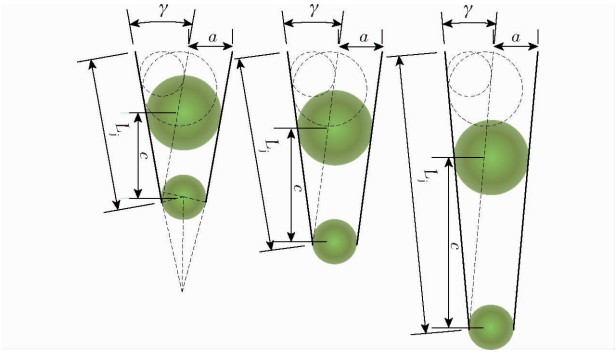

图 10 不同直径秧苗下落高度差示意图

Fig. 10 Drop height difference diagram of different diameter seedlings

秧苗被移栽装置夹取时,受橡胶夹形变产生的压力与摩擦力作用,如图 11 所示。秧苗直径最大时受力最大,据此可得最大压力及摩擦力为

$$\begin{cases} F_N = \dfrac{Ebh^3\left(r_{\max}-r_{\min}\cos\dfrac{\gamma}{2}\right)}{2L_j^3} \\ f = \mu_k F_N \end{cases} \tag{2}$$

式中 E——橡胶夹弹性模量,MPa

b——橡胶夹宽度,mm

h——橡胶夹厚度,mm

μ_k——秧苗与橡胶夹之间的摩擦因数

F_N——秧苗受橡胶夹最大压力,N

f——秧苗受橡胶夹最大摩擦力,N

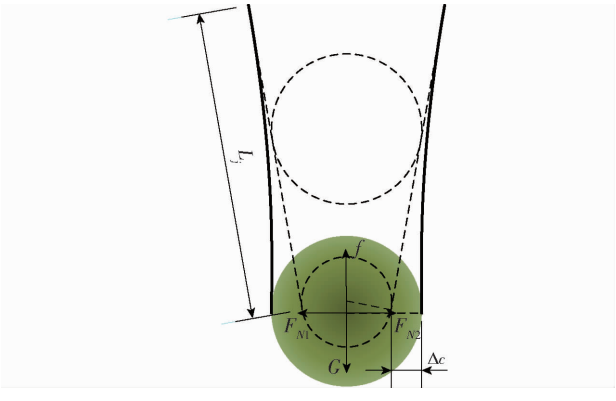

图 11 橡胶夹形变示意图

Fig. 11 Rubber clip deformation diagram

王旭[27]选取了我国目前广泛种植的甘薯品种的薯苗进行物理特性测定,统计得到距秧苗根部 30 mm 处的平均直径为(4.05 ± 0.3) mm,平均最大挤压力为 9.52 N,为避免损伤到秧苗,取挤压力为 3 N。根据种植农艺可知,秧苗移栽高度差不能超过 20 mm,排除栽植装置的误差,取不同直径秧苗下落

高度差应不超过 10 mm。

联立式(1)、(2),倾斜角度应满足约束条件

$$\begin{cases} F_N = \dfrac{Ebh^3\left(r_{\max} - r_{\min}\cos\dfrac{\gamma}{2}\right)}{2\left[\dfrac{r_{\min}\left(1+\sin\dfrac{\gamma}{2}\right)}{\sin\dfrac{\gamma}{2}\cos\dfrac{\gamma}{2}}\right]^3} \leqslant F_{lim} \\ c = \dfrac{r_{\max} - r_{\min}}{\sin\dfrac{\gamma}{2}} \leqslant 10 \end{cases} \tag{3}$$

式中　F_{lim}——甘薯苗耐受挤压力,N

取厚度 h 为 6 mm,宽度 b 为 40 mm,橡胶夹弹性模量 E 为 5 MPa,代入计算公式得橡胶夹倾斜面夹角取值范围为 6.9°~33.3°。

2.2　开合控制结构参数

摇杆滑块机构中以带槽钣金为主体,上端固定于链板,槽结构支持滑块的左右滑动及拉伸弹簧拉力的调节,整体充当机架并通过通孔铰接摇杆,摇杆、连杆及滑块形成摇杆滑块机构,结构示意图如图 12 所示。

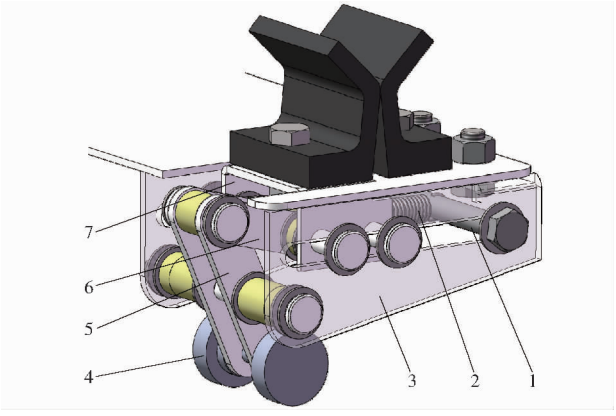

图 12　分体式夹苗装置内部结构示意图

Fig. 12　Internal structure diagram of split seedling clamping device

1. 调节杆　2. 拉伸弹簧　3. 带槽钣金　4. 滑轮　5. 摇杆　6. 连杆　7. 支撑滑块

摇杆滑块机构运动简图如图 13 所示,点 C'为橡胶夹闭合时滑块的位置,而点 C''为橡胶夹完全打开时滑块的位置,点 C 为当前位置,与点 C'水平相距 L,L 即为滑块位移。滑块与机架间存在摩擦力,该摩擦力的大小取决于杆 BC 对滑块推拉力的压力角,为最大程度削弱摩擦力的影响,需使橡胶夹开合两种状态时的杆 BC 作用的压力角保持相等,可分别以 B'、B''为圆心,杆 BO 长度为半径作圆,两圆的交点即为摇杆与机架的铰接点。设定摇杆与机架铰接处为坐标系的原点,即点 O。

根据几何关系得最大位移$L_{\max}$的表达式为

$$L_{\max} = l_{OB}(\sin\theta'' - \sin\theta') \tag{4}$$

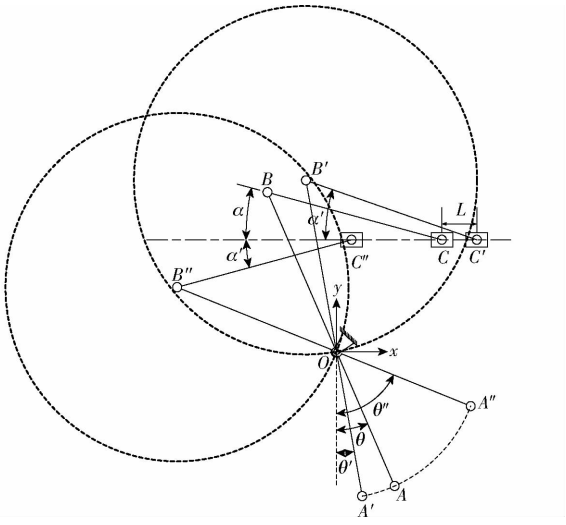

图 13　摇杆滑块机构运动简图

Fig. 13　Motion diagram of rocker slider mechanism

式中　θ'——橡胶夹闭合时杆 OA 与竖直方向的夹角,(°)

θ''——橡胶夹打开时杆 OA 与竖直方向的夹角,(°)

l_{OB}——点 O 与点 B 的距离,mm

橡胶夹最大开合应大于最小秧苗直径,同时避免超出链板宽度;为确保滑轮能够正确地通过弧板控制,应限制杆 OA 与竖直方向的夹角;因为链板之间存在一定间隙,为避免发生零件干涉,杆 OB 以及杆 BC 不能过长,由此得到取值约束条件

$$\begin{cases} 5 \leqslant L_{\max} \leqslant 15 \\ \theta' \geqslant 0° \\ \theta'' \leqslant 90° \\ 0° \leqslant \theta \leqslant \theta'' - \theta' \\ l_{OB} \leqslant 20 \\ l_{BC} \leqslant 20 \end{cases} \tag{5}$$

式中　θ——橡胶夹半开状态下杆 OA 与竖直方向的夹角,即摆角,(°)

l_{BC}——点 B 与点 C 的距离,mm

为保障滑轮对滑块位移的控制精度,在滑块目标位移固定的前提下,应尽可能增大摇杆的初末摆角差,故初始角度 θ'取 0°,而最终角度 θ''取 90°,代入约束条件符合要求,则杆 OB 长度取值范围为 5~15 mm。

由几何关系计算得到压力角为

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin\left(\dfrac{l_{OB}}{l_{BC}}\left(\cos\theta - \dfrac{\cos\theta'}{2} - \dfrac{\cos\theta''}{2}\right)\right) \\ \alpha' = \arcsin\left(\dfrac{l_{OB}}{2l_{BC}}(\cos\theta' - \cos\theta'')\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中　α——滑块当前压力角,(°)

α'——滑块最大压力角,(°)

由上述推导结果可知,压力角 α 与杆 BC 长度

呈负相关,与杆 OB 长度呈正相关,为最大限度减小压力角以降低滑块运动阻力,结合约束条件,杆 BC 长度取 20 mm。

由几何关系得点 C 关系式为

$$\begin{cases}(x_C-x_B)^2+(y_C-y_B)^2=l_{BC}^2\\ y_C=l_{OB}\cos\theta-l_{BC}\sin\alpha\end{cases}\tag{7}$$

式中 (x_B,y_B)——点 B 坐标,mm

(x_C,y_C)——点 C 坐标,mm

联立式(6)、(7)得到滑块位移 L 关于当前角度 θ 的表达式,即

$$L=2l_{OB}\cos\left(\frac{\theta+\theta'}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta-\theta'}{2}\right)-2l_{BC}\sin\left(\frac{\alpha+\alpha'}{2}\right)\sin\left(\frac{\alpha'-\alpha}{2}\right)\tag{8}$$

计算得苗夹位移活动范围为 5 ~ 15 mm,既保障橡胶夹开合精准控制,又为后续弧板轮廓优化提供了运动学约束,确保装置在高速输送下的传动可靠性。

2.3 弧板形状设计参数

弧板的形状与尺寸参数决定夹苗装置 4 种工况的实现,需单独设计。优化凸轮轮廓可在橡胶夹打开阶段降低滑轮法向力、减小滑块驱动阻力;闭合阶段则使滑轮运动速度渐变,避免秧苗因速度突变受损。

2.3.1 推程轮廓线

在推程阶段中($t\in[t_0,t_1]$),以初始时刻 t_0 滑轮与弧板的接触点为原点,x 轴水平向右,y 轴竖直向上建立坐标系。铰接点 O 水平向左匀速运动,速度为 v,滑轮中心 A 绕点 O 转动,摆角 θ 为 OA 与竖直方向的夹角,逆时针为正,接触点 P 与点 A 的连线与 OA 垂直,结构示意图如图 14 所示。

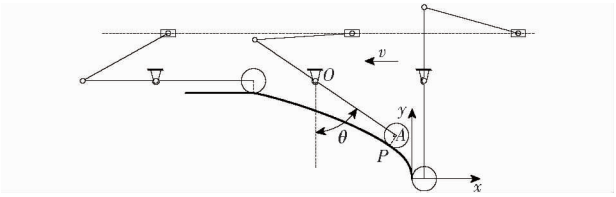

图 14 弧板结构示意图

Fig. 14 Structure diagram of cam block

由几何关系得点 O 坐标 (x_O,y_O) 和点 A 坐标 (x_A,y_A) 为

$$\begin{cases}x_O(t)=r-vt\\ y_O(t)=l_{OA}\\ x_A(t)=r-vt+l_{OA}\sin\theta\\ y_A(t)=l_{OA}-l_{OA}\cos\theta\end{cases}\tag{9}$$

式中 r——滑轮半径,mm

v——输送速度,mm/s

l_{OA}——点 A 与点 O 的距离,mm

点 P 可表示为点 A 垂直于 OA 方向向外偏移 r,得到点 P 坐标公式为

$$\begin{cases}x_P(t)=r-vt+l_{OA}\sin\theta-r\cos\theta\\ y_P(t)=l_{OA}(1-\cos\theta)-r\sin\theta\end{cases}\tag{10}$$

对 $x_A(t)$ 和 $y_A(t)$ 关于时间 t 求导,得到滑轮中心 A 的速度分量 v_{Ax}、v_{Ay} 为

$$\begin{cases}v_{Ax}=\dfrac{\mathrm{d}x_A}{\mathrm{d}t}=-v+\dot\theta l_{OA}\cos\theta\\ v_{Ay}=\dfrac{\mathrm{d}y_A}{\mathrm{d}t}=\dot\theta l_{OA}\sin\theta\end{cases}\tag{11}$$

式中 $\dot\theta$——θ 的导数,即角速度,(°)/s

当前压力角为 0°时,滑轮中心的速度方向需与摆杆 AO 的方向一致。摆杆 AO 的方向向量 $\boldsymbol{l}_{AO}$ 为

$$\boldsymbol{l}_{AO}=(-l_{OA}\sin\theta,l_{OA}\cos\theta)\tag{12}$$

若使点 A 速度方向与 $\boldsymbol{l}_{AO}$ 一致,意味着速度分量的比例需与方向向量的比例相同,即

$$\frac{v_{Ax}}{v_{Ay}}=\frac{-l_{OA}\sin\theta}{l_{OA}\cos\theta}=-\tan\theta\tag{13}$$

将 $\theta(t)$ 的解析式代入接触点 P 的坐标,得到轮廓线的参数方程

$$\begin{cases}x_P(t)=r-vt+\dfrac{l_{OA}(\mathrm{e}^{\frac{vt}{l_{OA}}}-\mathrm{e}^{-\frac{vt}{l_{OA}}})-2r}{\mathrm{e}^{\frac{vt}{l_{OA}}}+\mathrm{e}^{-\frac{vt}{l_{OA}}}}\\ y_P(t)=\dfrac{l_{OA}(\mathrm{e}^{\frac{vt}{l_{OA}}}+\mathrm{e}^{-\frac{vt}{l_{OA}}}-2)-r(\mathrm{e}^{\frac{vt}{l_{OA}}}-\mathrm{e}^{-\frac{vt}{l_{OA}}})}{\mathrm{e}^{\frac{vt}{l_{OA}}}+\mathrm{e}^{-\frac{vt}{l_{OA}}}}\end{cases}\tag{14}$$

2.3.2 远停程轮廓线

在远停程阶段中($t\in[t_1,t_2]$),摆角 θ 保持最大值 $\theta_{\max}$ 不变。由于铰接点 O 继续向左匀速运动,凸块轮廓为水平直线,得到轮廓线的参数方程

$$\begin{cases}x_P(t)=r-vt+l_{OA}\sin\theta_{\max}\\ y_P(t)=l_{OA}(1-\cos\theta_{\max})-r\end{cases}\tag{15}$$

2.3.3 回程轮廓线

在回程阶段中($t\in[t_2,t_3]$),为实现摆杆缓慢下降,选择余弦加速度运动规律,可避免刚性冲击与柔性冲击,其表达式为

$$\theta(t)=\theta_{\max}\frac{1+\cos\left(\pi\dfrac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)}{2}\tag{16}$$

将 $\theta(t)$ 的解析解代入接触点 P 的坐标,得到轮廓线的参数方程

$$\begin{cases}x_P(t)=\dfrac{vt^2(2rv-v^2t)+4L^2(r-vt)\left(1-\dfrac{1+\cos\left(\pi\dfrac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)}{2}\right)}{4L^2+v^2t^2}\\ y_P(t)=\dfrac{2Lvt(vt-2r)+4L^2\left(1-\dfrac{1+\cos\left(\pi\dfrac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)}{2}\right)}{4L^2+v^2t^2}\end{cases}\tag{17}$$

2.3.4　全程轮廓线

推程段呈上升趋势，根据推程角摆角表达式，只有当时间 t 趋近于正无穷时，摆角 θ 才能达到 90°。通过运动学分析发现，推程段的水平移动距离由铰接点速度 v 与推程时间 t_1 的乘积唯一确定，当推程段为 100 mm 时，摆角 θ 近似于 90°，误差小于 0.1°，因此推程段时间 t 可以根据输送速度 v 确定。保持段水平延伸，根据机型得到人工放苗区的距离，可确定保持段的时间。回程段平滑下降，调整合适的曲线。基于上述模型绘制凸块的全程轮廓线，各阶段过渡连续且基本无突变，如图 15 所示。

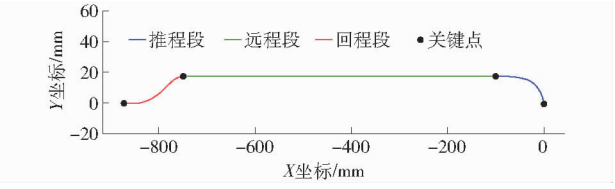

图 15　弧板轮廓线示意图

Fig. 15　Contour diagram of cam block

3　试验

为验证分体式夹苗装置的作业性能，先通过单因素试验明确核心参数的影响规律与取值范围，再采用 Box－Behnken 中心组合设计优化参数组合，最后通过田间试验验证实际作业效果，保障试验的科学性与数据可靠性。

3.1　单因素试验

研究输送速度对秧苗夹持合格率的影响规律，选取速度适配区间，为后续三因素三水平台架试验的速度水平设置提供直接数据支撑。

试验选用烟薯 25 号甘薯裸苗，选取无病虫害、无机械损伤的健壮秧苗，距根部 30 mm 处茎秆直径为 3.75～4.35 mm，茎秆含水率为 78%～82%，统一选用该规格秧苗，可排除秧苗自身差异对试验的干扰。

苗夹位移设为 2.2 节推导的最优中间值 10 mm，橡胶夹倾斜夹角设为理论最优值 20°，消除两者对试验结果的干扰；输送速度结合同类移栽机作业效率区间及台架设备性能，设定为 10～90 mm/s 的可调节范围，在此区间内合理布设梯度水平以覆盖低效、适配、超限等不同作业状态。每个因素设置 5 个梯度水平，其余两个因素固定为中间基准值设计单因素试验，每组水平取 100 株秧苗，完成放苗-输送-取苗全过程，重复试验 5 次，统计夹持合格率，记录脱落、偏移等异常现象。

试验结果如图 16 所示，输送速度对夹持合格率的影响呈“先稳定后急剧下降”的显著阈值特征，在 10～50 mm/s 区间内，夹持合格率始终保持在 90% 以上，此区间人工放苗节奏与输送速度匹配度高，操作人员可精准完成放苗动作；速度升至 70 mm/s 时，合格率降至 74.6% 左右，因速度超出人工反应阈值，部分秧苗未完全卡入夹口即被输送，偏移超差现象明显增多；速度达 90 mm/s 时，合格率进一步降至 43.6% 左右，因远超人工操作极限，漏放、错放频发，且秧苗在惯性作用下与夹口碰撞加剧，夹持稳定性急剧下降。

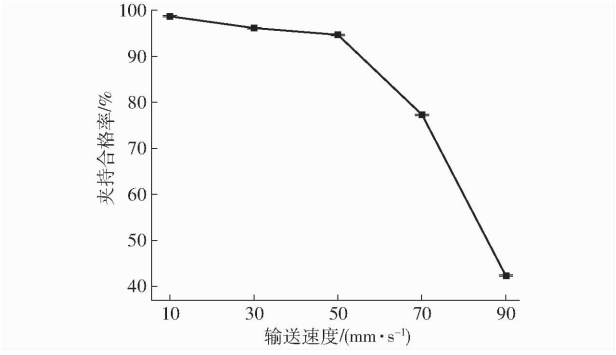

图 16　不同输送速度下与夹持合格率变化曲线

Fig. 16　Change curve of clamping qualification rate at different conveying speeds

3.2　台架试验

3.2.1　试验方案

为田间试验提供依据，探究苗夹位移、橡胶夹倾斜夹角及输送速度对秧苗夹持稳定性的影响，确定参数最优组合范围。

自主搭建送苗装置性能测试台架，通过变速箱调节输送速度，由机具固定参数可知，每个链板的间距为 76.2 mm，如图 17 所示。



图 17　台架试验

Fig. 17　Bench test

延续单因素试验的秧苗品种与基础规格，结合单因素试验以及 3.1 节分析，设 70 mm/s 为超限验证水平，为实际应用中速度选型提供安全边界参考，故输送速度设为 30～70 mm/s，苗夹位移设为 5～15 mm，橡胶夹倾斜夹角为 6.9°～33.3°。运用 Box－Behnken 中心组合设计方法，将上述变量作为试验因素，夹持合格率作为评价指标，设计三因素三水平试验，试验因素编码如表 2 所示。试验中包含 12 个因子点和 5 个中心点重复，中心点用于估计试验误差，总试验次数 17 次，符合响应面设计的统计要求。

表 2 台架试验因素编码

Tab. 2 Bench test factors and coding

编码	因素		
	输送速度 A/(mm·s^{-1})	苗夹位移 B/mm	倾斜夹角 C/(°)
-1	30	5	7
0	50	10	20
1	70	15	33

试验中,每 5 min 为 1 组,每组试验重复 3 次,分别测试每组夹持合格率 Y,取平均值。其中,每组取 100 株,观察从放苗到取苗过程秧苗被夹持的状态,输送到栽植机构时,有秧苗存在并没有明显姿态偏移即可判定夹持合格,合格株数与 100 株相比即为夹持合格率 Y。

3.2.2 试验结果与分析

试验结果如表 3 所示,夹持合格率方差分析如表 4 所示。

表 3 台架试验结果

Tab. 3 Bench test results

序号	因素			夹持合格率/%
	A/(mm·s^{-1})	B/mm	C/(°)	
1	30	5	20	90.3
2	70	5	20	70.0
3	30	15	20	89.6
4	70	15	20	81.3
5	30	10	7	92.0
6	70	10	7	78.3
7	30	10	33	90.3
8	70	10	33	71.0
9	50	5	7	88.0
10	50	15	7	92.3
11	50	5	33	86.0
12	50	15	33	92.3
13	50	10	20	94.6
14	50	10	20	93.3
15	50	10	20	95.6
16	50	10	20	93.6
17	50	10	20	94.3

由表 4 分析可知,回归模型 $P<0.01$,表明该评价指标拟合模型极显著;失拟项 $P>0.05$,不显著,表明方程模拟效果较好,A、B、C、AB、A^2、B^2、C^2 对橡胶夹夹持合格率影响极显著。

在 Design-Expert 13.0 软件下对试验数据进行多元回归拟合分析,建立分体式夹苗装置夹持合格率二次多项式回归方程为

$$Y=94.28-7.70X_1+2.65X_2-1.38X_3+3X_1X_2-9.12X_1^2-2.37X_2^2-2.26X_3^2 \quad (18)$$

式中 X_1、X_2、X_3——因素编码值

表 4 夹持合格率回归方程方差分析

Tab. 4 Clamping pass rate regression equation analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 010.14	9	112.24	66.51	<0.000 1 **
A	474.32	1	474.32	281.07	<0.000 1 **
B	56.18	1	56.18	33.29	0.000 7 **
C	15.12	1	15.12	8.96	0.020 1 **
AB	36.00	1	36.00	21.33	0.002 4 **
AC	7.84	1	7.84	4.65	0.068 1
BC	1.00	1	1.00	0.592 6	0.466 6
A^2	349.82	1	349.82	207.29	<0.000 1 **
B^2	23.55	1	23.55	13.96	0.007 3 **
C^2	21.60	1	21.60	12.80	0.009 0 **
残差	11.81	7	1.69		
失拟项	8.55	3	2.85	3.49	0.129 5
纯误差	3.27	4	0.817 0		
总和	1 021.96	16			

注:** 为影响极显著($P<0.01$)。

3.2.3 响应面分析

通过结果分析可知,对于橡胶夹夹持合格率,输送速度与苗夹位移交互作用影响显著。当橡胶夹倾斜夹角为 20°时,响应面如图 18 所示。

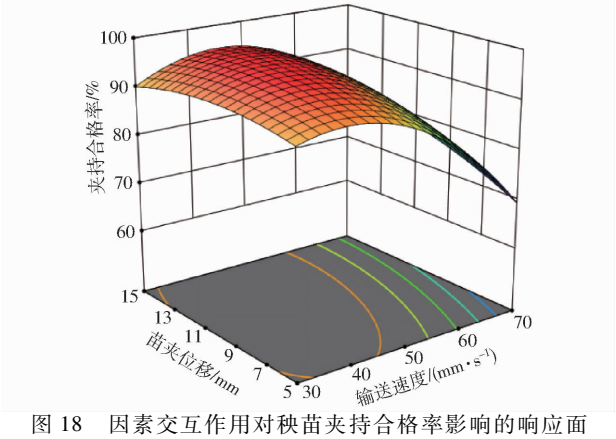

图 18 因素交互作用对秧苗夹持合格率影响的响应面

Fig. 18 Response surface of effect of factor interaction on qualified rate of seedling clamping

由图 18 可知,当输送速度维持在 30 ~ 50 mm/s 范围内,秧苗可以被平稳的放置在橡胶夹中,夹持合格率相对平稳,当输送速度增加到一定值时,人工无法准确地将秧苗放置在橡胶夹之间,从而导致部分橡胶夹存在缺苗现象,从而使夹持合格率大幅下降,即夹持合格率先平稳后急剧下降;当苗夹位移增大时,可放置秧苗的空间增加,使人工能够更轻易地放置秧苗,减少了漏苗概率,当苗夹位移增大到一定程度时,橡胶夹之间的距离过大,放置的秧苗更容易偏移,从而导致漏苗的情况,即夹持合格率先升高后下降。

3.2.4 参数优化分析

利用 Design-Expert 软件中参数优化模块进行

优化，选取最优的参数组合。构建目标函数以及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \max A \\ \text{s.t.} \begin{cases} 30\ \text{mm/s} \leqslant A \leqslant 70\ \text{mm/s} \\ 5\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 15\ \text{mm} \\ 7° \leqslant C \leqslant 33° \end{cases} \end{cases} \tag{19}$$

为尽可能保持较高输送速度的前提下提高夹持合格率，对上述指标进行优化求解，得到最优参数组合为：输送速度 49.5 mm/s、苗夹位移 12.6 mm、倾斜夹角 16.7°，此时夹持合格率为 95.3%。该优化速度接近单因素试验筛选的速度适配上限，既保障高合格率，又能最大化作业效率。

3.3　田间试验

3.3.1　试验方案

在台架试验优化参数的基础上，对比分体式与一体式夹苗装置实际作业效果，验证该装置田间适用性。2025 年 5 月在山东火绒农业科技发展有限公司甘薯种植基地进行田间试验。2025 年 6 月在山东省威海市文登区榛子崖村种植区进行田间试验，如图 19 所示。



图 19　田间试验

Fig. 19　Field test

选用烟薯 25 号甘薯裸苗，距根部 30 mm 处茎秆直径为 3.5 ~ 4.5 mm，其中包含不同生长状态的秧苗，无病虫害、机械损伤，该规格与田间实际移栽用苗一致，可真实验证装置在实际作业条件下的夹持稳定性、低损伤特性及效率优势。试验仪器有秒表（精度 0.01 s）和高速摄像机（帧率不低于 120 f/s）。

结合前文试验优化结果，为便于机具实际调整，将分体式夹苗装置核心参数确定为整数：苗夹位移 12 mm、倾斜夹角 17°。为明确分体式与一体式夹苗装置的最高工作速度差异，以输送速度（A）和放苗方式（D）为试验因素设计全因子试验，试验因素与编码如表 5 所示，其中输送速度可通过机具前进速度调节。试验采用单人作业模式，每 5 min 为 1 组，每组重复 3 次，取 100 株秧苗进行测试；同步采用高速摄像机记录人工分苗-放苗全过程的状态与用时，以输送至栽植机构时秧苗无脱落且无明显姿态偏移为夹持合格判定标准，合格株数与 100 株相比即为夹持合格率 Y_1；以茎秆表皮破损、汁液渗出、弯曲变形或根系断裂为损伤判定标准，损伤株数与 100 株的比值即为秧苗损伤率 Y_2，最终取多组试验平均值作为结果。

表 5　田间试验因素编码

Tab. 5　Field test factors and coding

编码	因素	
	输送速度 A/(mm·s^{-1})	放苗方式 D
-1	30	一体式
-0.5	40	
0	50	
0.5	60	
1	70	分体式

3.3.2　试验结果与分析

采用全因子试验，为估计试验误差，额外重复中心点组合 3 次。试验结果如表 6 所示，拟合试验数据，夹持合格率与损伤率方差分析如表 7 所示。

表 6　田间试验结果

Tab. 6　Field test results　　%

序号	因素		夹持合格率	损伤率
	A/(mm·s^{-1})	D		
1	30	一体式	96.2	2.5
2	30	分体式	97.2	2.3
3	40	一体式	88.0	3.4
4	40	分体式	95.8	3.5
5	50	一体式	66.5	5.6
6	50	分体式	93.5	5.2
7	60	一体式	44.0	9.6
8	60	分体式	70.5	6.8
9	70	一体式	13.5	15.4
10	70	分体式	48.0	10.2
11	50	分体式	95.2	5.0
12	50	分体式	92.8	5.6
13	50	分体式	92.0	5.0

由表 7 分析可知，在各因素水平范围内，A、D 交互作用对夹持合格率 Y_1 和损伤率 Y_2 影响极显著，对影响不显著项进行剔除后进行方差拟合，得出夹持合格率和损伤率的多元二次回归方程式为

$$\begin{cases} Y_1 = 80.72 - 33.31X_1 + 10.36X_4 + 8.57X_1X_4 - 17.44X_1^2 \\ Y_2 = 5.58 + 5.11X_1 - 0.741\,2X_4 - 1.29X_1X_4 + 1.96X_1^2 \end{cases} \tag{20}$$

式中　X_4——因素编码值

由结果可知，不同放苗方式在不同输送速度下夹持合格率和损伤率曲线如图 20 所示。

由图 20 可知，一体式夹苗装置从 30 mm/s 开始夹持合格率急剧下降，损伤率急剧上升，而分体式夹苗装置在 30 ~ 50 mm/s 区间内较为稳定，超过 50 mm/s 后开始下降，反映了分体式夹苗装置放苗过程较为简单，易操作。在人工合理的劳动强度内，分

表 7 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	8 359.68	4	2 089.92	209.93	<0.000 1 **
	A	5 547.78	1	5 547.78	557.27	<0.000 1 **
	D	1 259.04	1	1 259.04	126.47	<0.000 1 **
	AD	367.22	1	367.22	36.89	0.000 3 **
	A^2	674.58	1	674.58	67.76	<0.000 1 **
	残差	78.44	8	9.81		
	失拟项	74.08	5	14.82	7.98	0.058 9
	纯误差	4.37	3	1.46		
	总和	8 438.12	12			
Y_2	模型	157.94	4	39.49	97.78	<0.000 1 **
	A	130.56	1	130.56	323.31	<0.000 1 **
	D	6.45	1	6.45	15.97	0.004 0 **
	AD	8.32	1	8.32	20.60	0.001 9 **
	A^2	8.53	1	8.53	21.12	0.001 8 **
	残差	3.23	8	0.403 8		
	失拟项	2.99	5	0.598 1	7.48	0.064 2
	纯误差	0.24	3	0.080 0		
	总和	161.17	12			

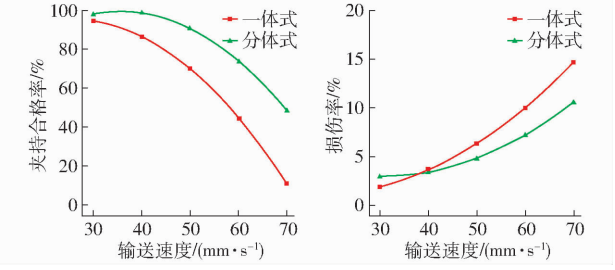

图 20 一体式与分体式放苗对比曲线

Fig. 20 Comparison curves of integrated and split seedling release

体式夹苗装置有效提高放苗速度上限,提高工作效率。

利用 Design-Expert 软件中参数优化模块进行优化,构建目标函数以及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \max A \\ \text{s.t.} \quad 30\ \text{mm/s} \leqslant A \leqslant 50\ \text{mm/s} \end{cases} \tag{21}$$

在保证高合格率的前提下提高输送速度,对上述指标进行优化求解,得到最优参数为:输送速度 44.0 mm/s,此时夹持合格率为 97.0%,损伤率为 3.9%。台架优化速度与田间最优速度的差异,是结合田间实际工况干扰、参数加工取整需求及工况适应性调整形成的合理适配,既保留了理论优化的核心逻辑,又满足工程应用的实际需求。

夹苗装置的工作间距为 76.2 mm,装置每经过一个间距距离,即记为 1 次放苗成功。经计算一体式单次放苗需 2.5 s,而分体式单次放苗仅 1.73 s,平均单人每小时放苗量达 2 080 株,摆苗效率提升 31%。在规模化种植场景中,该效率提升可减少人工投入、降低劳动强度,显著增强移栽作业的规模化适配性。

4 结论

(1)明确关键部件设计参数与约束逻辑。橡胶夹采用双倾斜面结构,倾斜夹角 6.9°~33.3°可平衡夹持稳定性与减损需求;摇杆滑块机构杆 OB 长度为 5~15 mm、杆 BC 长度为 20 mm,保障开度精准控制;弧板三段式轮廓设计实现橡胶夹“轻松打开、缓慢闭合”。

(2)台架试验优化了核心作业参数。以苗夹位移、橡胶夹倾斜夹角、输送速度为影响因素,夹持合格率为评价指标,经响应面分析得出最优参数组合:输送速度 49.5 mm/s、苗夹位移 12.6 mm、倾斜夹角 16.9°,此时夹持合格率达 95.28%,验证了参数设计的合理性。

(3)进行田间试验验证作业效果。分体式夹苗装置在输送速度 44.0 mm/s 下,夹持合格率达 97.0%、损伤率为 3.9%;相较于一体式工作效率提升 31%,单人每小时放苗量 2 080 株。在 30~50 mm/s 区间内性能稳定,可满足不同规模需求,提供了“低成本、高可靠、易推广”的甘薯机械化移栽方案。

参 考 文 献

[1] 穆桂脂,王千翼,郑德慧,等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2023,39(24):1-10.
MU Guizhi, WANG Qianyi, ZHENG Dehui, et al. Design and experiment of the seedling planting device for a sweet potato horizontal multiple transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(24):1-10. (in Chinese)

[2] 蒋兰,汤庆,吴崇友,等. 油菜毯状苗移栽机切缝-栽插装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(11):212-222.
JIANG Lan, TANG Qing, WU Chongyou, et al. Optimal design and experiment of furrow-cutting and planting mechanism for rapeseed blanket seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(11):212-222. (in Chinese)

[3] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):16-25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging fevice of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(10):16-25. (in Chinese)

[4] 周强. 线式自动供苗甘薯移栽机的设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
ZHOU Qiang. Design and experiment of sweet potato transplanter for linear automatic seedlings[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2022. (in Chinese)

[5] 韩军伟. 甘薯裸苗自动有序分苗装置设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2021.
HAN Junwei. Study on design and experimental of automatic and orderly seedling separation equipment for sweet potato seedlings [D]. Taian: Shandong Agricultural University,2021. (in Chinese)

[6] 何元文,姚俊豪,聂虎子,等. 广东省甘薯生产全程机械化现状与思考[J]. 现代农业装备,2024,45(3):84 - 87,100.
HE Yuanwen, YAO Junhao, NIE Huzi, et al. Current situation and thoughts on the full-process mechanization of sweet potato production in Guangdong Province[J]. Modern Agricultural Equipment,2024,45(3):84 - 87,100. (in Chinese)

[7] 张云鹏. 甘薯水平移栽装置的设计与试验研究[D]. 海口:海南大学,2023.
ZHANG Yunpeng. Design and experimental study of horizontal transplanting device for sweet potato[D]. Haikou: Hainan University,2023. (in Chinese)

[8] 朱倩. 甘薯苗膜上侧插平栽装置的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2024.
ZHU Qian. Design and test of sweet potato seedlings side-inserting horizontal transplanting device on mulch film[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2024. (in Chinese)

[9] 武广伟,王瑞雪,李鑫,等. 国内外甘薯移栽技术装备研究现状及展望[J]. 农机化研究,2024,46(7):1 - 8.
WU Guangwei, WANG Ruixue, LI Xin, et al. Research status and prospect of transplanting technology and equipment of sweet potato at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(7):1 - 8. (in Chinese)

[10] 朱斌彬. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计与仿真[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
ZHU Binbin. Design and simulation of the seedling transplanting machine with sandwich type sweet potato[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2017. (in Chinese)

[11] ZHANG G, WEN Y, TAN Y, et al. Identification of cabbage seedling defects in a fast automatic transplanter based on the maxiou algorithm[J]. Agronomy,2020,10(1):65.

[12] YANG Q, XU L, SHI X, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,147: 131 - 145.

[13] 庄如月. 甘薯裸苗移栽机构优化设计与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2021.
ZHUANG Ruyue. Optimization design and experimental study on trans-plating mechanism of sweet potato seed seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)

[14] 农业农村部南京农业机械化研究所. 一种甘薯种植用薯苗移栽投苗机构:202021383933.0[P]. 2021 - 03 - 23.

[15] 张涛. 基于“船底形”位姿的甘薯裸苗膜上移栽装置设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2021.
ZHANG Tao. Design and experiment of transplanting device for naked sweet potato seedlings on film based on “boat shape” posture[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2021. (in Chinese)

[16] 何宇凡. 基于苗带的甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2022.
HE Yufan. Design and experiments of an automatic transplanter for sweet potato naked seedlings based on seedling belts[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2022. (in Chinese)

[17] 武广伟,安晓飞,颜丙新,等. 基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1): 99 - 109.
WU Guangwei, AN Xiaofei, YAN Bingxin, et al. Design and experiment of automatic transplanter for sweet potato naked seedlings based on pretreatment seedling belt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53 (Supp. 1):99 - 109. (in Chinese)

[18] 华正雨. 挠性圆盘式蔓越莓移栽机设计与仿真分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
HUA Zhengyu. Design and simulation of flexible disc transplanting machine for cranberry seedling[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2016. (in Chinese)

[19] 贺益龙. 吊篮式移栽机旋转杯式喂苗机构的设计与试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2014.
HE Yilong. Hanging basket transplanting machine rotating cup-type feed seedlings institutions design[D]. Shihezi: Shihezi University,2014. (in Chinese)

[20] 赵雄,周振康,程迪,等. 尖嘴形取苗-直线投苗特性取苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(9):395 - 404,449.
ZHAO Xiong, ZHOU Zhenkang, CHENG Di, et al. Optimization design and experiment of needle shaped seedling picking-straight line seedling feeding characteristics seedling picking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(9):395 - 404,449. (in Chinese)

[21] 张永政,曹成茂,秦宽,等. 线式供苗全自动甘薯移栽机设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2022,3(2): 28 - 36.
ZHANG Yongzheng, CAO Chengmao, QIN Kuan, et al. Design and experiment of automatic sweet potato transplanter with linear seedling supplying[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English),2022,3(2):28 -

36. (in Chinese)
[22] 周洵泽,严伟,王云霞,等. 甘薯机械化移栽分苗取苗技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(3):35 - 40.
ZHOU Xunze, YAN Wei, WANG Yunxia, et al. Research status and prospect of sweet potato mechanized transplanting technology[J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2023,44(3):35 - 40. (in Chinese)
[23] 赵海,刘新鑫,潘志国,等. 甘薯种植农艺及机械化种植技术研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):21 - 26.
ZHAO Hai, LIU Xinxin, PAN Zhiguo, et al. Agronomic characteristics and mechanized planting technology of sweet potato [J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2021,42(6):21 - 26. (in Chinese)
[24] 董欣,杨波,徐允飞,等. 烟草钵苗移栽机成穴机构的运动学仿真分析[J]. 农机化研究,2017,39(3):37 - 41.
DONG Xin, YANG Bo, XU Yunfei, et al. Kinematic analysis and simulation of cavitation mechanism of tobacco seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(3):37 - 41. (in Chinese)
[25] 赖庆辉,赵瑾汶,苏微,等. 基于 DEM - CFD 的气吸式三七种苗定向移栽装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):60 - 70.
LAI Qinghui, ZHAO Jinwen, SU Wei, et al. Design and test of air suction directional transplanting device for *Panax notoginseng* seedlings based on DEM - CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(7):60 - 70. (in Chinese)
[26] 徐亚雷,杨红光,潘志国,等. 甘薯裸苗斜插式栽植机构及电控系统研制[J]. 中国农机化学报,2024,45(6):53 - 57,71.
XU Yalei, YANG Hongguang, PAN Zhiguo, et al. Development of oblique-planting mechanism for sweet potato seedlings and its electric control system[J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2024,45(6):53 - 57,71. (in Chinese)
[27] 王旭. "船底形"甘薯起垄覆膜移栽复式作业机设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
WANG Xu. Design and experimental study of "boat bottom-shaped" sweet potato ridging and film covering compound transplanter[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)

(上接第 15 页)

[80] 于英杰,李沛航,赖庆辉,等. 基于 DEM - MBD 耦合的咖啡采摘过程仿真与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):157 - 167.
YU Yingjie, LI Peihang, LAI Qinghui, et al. Simulation and experiment of coffea picking process based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):157 - 167. (in Chinese)
[81] 于英杰,王剑,赖庆辉,等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):124 - 133.
YU Yingjie, WANG Jian, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):124 - 133. (in Chinese)
[82] 散鋆龙,牛长河,乔圆圆,等. 林果机械化收获研究现状、进展与发展方向[J]. 新疆农业科学,2013,50(3):499 - 508.
SAN Yunlong, NIU Changhe, QIAO Yuanyuan, et al. Development of fruit mechanized harvest and its relevant research[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2013,50(3):499 - 508. (in Chinese)
[83] 杨永, 曾祥坤. 一种椰子抓取采摘机械手设计及其工作空间仿真分析[J]. 农机化研究,2015,37(5):132 - 135.
YANG Yong,ZENG Xiangkun. Design of the manipalator for picking coconut and simulation of its work space[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(5):132 - 135. (in Chinese)
[84] ZHENG H, FU Y, WANG Z, et al. Design and experiment of coconut picking robot with climbing[J]. Smart Agricultural Technology,2024,9:100617.
[85] MEGALINGAM R K, MANOHARAN S K, MOHANDAS S M, et al. Amaran: an unmanned robotic coconut tree climber and harvester[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2020,26(1):288 - 299.
[86] DUBEY A P, PATTNAIK S M, BANERJEE A, et al. Autonomous control and implementation of coconut tree climbing and harvesting robot[J]. Procedia Computer Science,2016,85:755 - 766.
[87] PARVATHI S, SELVI S T. Design and fabrication of a 4 Degree of Freedom (DOF) robot arm for coconut harvesting[C]// 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). IEEE, 2017: 1 - 5.
[88] WIBOWO T S, SULISTIJONO I A, RISNUMAWAN A, et al. End-to-end coconut harvesting robot [C]//2016 International Electronics Symposium (IES). Denpasar: IEEE, 2016: 444 - 449.