doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.019

甘薯裸苗往复直插式膜上移栽装置设计与试验

侯加林[1]　张修文[1,2]　高　祥[1,2]　李　慧[2,3]　何腾飞[2,4]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东省农业机械科学研究院,济南 250100;
3.山东省丘陵山区智慧农业装备重点实验室,济南 250100;4.山东省农业科学院,济南 250100)

摘要:针对甘薯移栽机膜上移栽难以满足“小膜口、多埋节”农艺要求的问题,基于薯苗船底形移栽农艺要求,提出按压扦插新思路,设计了一种往复直插式薯苗膜上移栽装置。阐述了装置整体结构和工作原理,确定了结构参数,构建了移栽运动数学模型,并以装置的移栽轨迹为研究对象,驱动速比、苗插安装角、苗插长度为因素,理论膜口面积、理论垄内苗长为指标开展轨迹仿真试验,单因素试验确定了各因素的影响规律及最优参数范围,其中驱动速比为 1.92~2.40(°)/mm、苗插安装角为 80°~100°、苗插长度为 180~220 mm。在栽深 80 mm、最优参数范围内开展三因素三水平台架正交试验,得到最优参数组合为:驱动速比 2.24(°)/mm、苗插安装角 90°、苗插长度 204 mm,对应膜口面积 1 580 mm^2、垄内苗长 234 mm。田间验证结果显示,栽深 80 mm、最优参数组合下的实际膜口面积 1 680 mm^2、垄内苗长 221 mm,与台架试验相对误差为 6.1%、5.8%,均在可接受范围内,实现设计目标。

关键词:薯苗;移栽装置;往复直插式;膜上移栽;田间试验

中图分类号:S223.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0208-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Reciprocating Direct-insertion On-film Transplanting Device for Sweet Potato Bare-root Seedlings

HOU Jialin[1]　ZHANG Xiuwen[1,2]　GAO Xiang[1,2]　LI Hui[2,3]　HE Tengfei[2,4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan* 250100, *China*
3. *Shandong Key Laboratory of Smart Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas, Ji'nan* 250100, *China*
4. *Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that on-film transplanting of sweet potato transplanters failed to meet the agronomic requirements of "small film opening and more buried nodes", based on the agronomic requirements of hull-shaped transplanting for sweet potato seedlings, an idea of pressing and cutting was proposed, and a reciprocating direct-insertion on-film transplanting device for sweet potato seedlings was designed. The overall structure and working principle of the device were elaborated, the structural parameters were determined, and a mathematical model of transplanting motion was established. Taking the transplanting trajectory of the device as research object, with driving speed ratio, installation angle of seedling inserting rod and length of seedling inserting rod as factors, and theoretical film opening area and theoretical length of sweet potato seedlings in ridge as indicators, trajectory simulation tests were carried out. The single-factor experiment determined the influence laws and optimal parameter ranges of each factor, with the driving speed ratio being 1.92~2.40(°)/mm, the seedling insertion mounting angle of 80°~100°, and the seedling insertion length of 180~220 mm. A three-factor three-level bench orthogonal test was conducted under the conditions of transplanting depth of 80 mm and within the optimal parameter ranges, and the optimal parameter combination was obtained: driving speed ratio was 2.24(°)/mm, installation angle of seedling inserting rod was 90°, and length of seedling inserting rod was 204 mm, corresponding to a film opening area of 1 580 mm^2 and a length of sweet potato seedlings in

收稿日期:2025-09-22　修回日期:2025-12-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD2301000)、国家自然科学基金项目(32201683)、山东省自然科学基金项目(ZR2024ME137)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2025B15)

作者简介:侯加林(1963—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:jlhou@sdau.edu.cn

通信作者:李慧(1984—),女,高级工程师,博士,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail:lihuictrc@shandong.cn

ridge of 234 mm. Field verification results showed that under the conditions of transplanting depth of 80 mm and the optimal parameter combination, the actual film opening area was 1 680 mm^2 and the length of sweet potato seedlings in ridge was 221 mm, with relative errors of 6.1% and 5.8% compared with the bench test, respectively. Both errors were within an acceptable range, and the design objectives were achieved.

Key words: sweet potato seedlings; transplanting device; reciprocating direct-insertion; on-film transplanting; field experiment

0　引言

甘薯兼具低投入、高产出、多用途的特性[1]，其产量在我国主要粮食作物中位列第四[2]。甘薯种植方式繁多、农艺要求复杂，难以实现机械化种植。甘薯裸苗（薯苗）膜上移栽是覆膜垄作栽培的重要环节，需要满足茎蔓种植、浅栽、小膜口、多埋节等农艺要求[3]。目前国内薯苗膜上移栽仍以人工作业为主，劳动强度大、效率低[4]。薯苗移栽装置是提升甘薯生产机械化水平的关键设备[5-8]。

国外甘薯移栽机械化起步较早，成熟产品较多[9-11]。美国玛驰尼克公司的大型半自动链夹式薯苗移栽机，其链夹式移栽装置需经开沟、放苗、覆土工序，不仅对垄体破坏较大，且无法实现膜上移栽[12]。日本以 2ZYZ-2 型自走式移栽机、连杆式甘薯移栽机等小型自走式移栽机为主[13]，采用四连杆端面凸轮式移栽装置可实现膜上移栽，但存在“膜口大，埋节短”的问题。国内甘薯移栽机械起步较晚，近年来诸多学者开展了相关研究。周海丽等[14]提出的椭圆齿轮行星轮系后插旋转式移栽机构，有效缩小了膜上移栽的平均穴口尺寸；武广伟等[15]基于预处理苗带设计薯苗自动移栽机，通过挠性圆盘栽植器转速与机具前进速度配合实现连续类水平栽插，却无法完成膜上移栽；刘正铎[16]设计的机械臂式甘薯移栽机，采用多体动力学与离散元软件耦合方法优化移栽装置作业参数；张涛[17]设计的船底形甘薯移栽机构，通过 EDEM-ADAMS 耦合仿真优化移栽轨迹，得到薯苗船底形移栽轨迹。上述移栽装置大多无法实现薯苗膜上移栽，能实现该作业的多为钳夹式或指夹式移栽装置，但其仍存在膜口尺寸大[18]、埋节短等问题，且取苗时漏苗风险较高。

针对现有钳夹式、指夹式膜上移栽装置存在的埋节短、膜口大问题，本文基于薯苗船底形栽插法的农艺要求，提出薯苗按压扦插新思路，研发非全齿齿轮传动与复位弹簧相结合的往复直插式薯苗膜上移栽装置，分析装置移栽轨迹并明确轨迹变化的主要影响因素，采用室内台架开展移栽过程多因素正交试验，且在最优参数组合下完成田间验证试验，最终实现薯苗膜上移栽“小膜口、多埋节”的农艺要求。

1　移栽装置整体结构与工作原理

1.1　薯苗船底形膜上栽插农艺要求

船底形膜上移栽具备入土节位多、抗旱性强和易发根的优点[19-20]。薯苗船底形栽插农艺要求复杂[21-24]，技术难点主要在于实现薯苗浅栽、多埋节栽植及船底形位姿控制，根据 DB37/T 3355—2018《甘薯机械化生产技术规范》，船底形栽插要求薯苗入土 4～5 节、外露 1～2 节，垄内薯苗头尾翘起呈船底形，如图 1 所示（h 为栽深，mm；l 为垄内薯长，mm；η 为薯苗栽插角，(°)；d 为移栽株距；a_0 为膜口长度，mm）；栽深 h 根据土壤含水率设为 7～10 cm，薯苗栽插角 η 为 30°～60°；垄内苗长 l 因品种不同为 10～25 cm，移栽株距 d 则根据土壤肥力及品种特性为 15～25 cm。

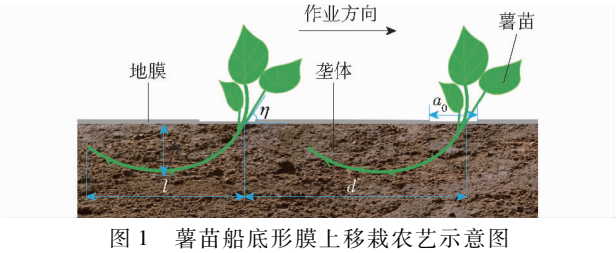


图 1　薯苗船底形膜上移栽农艺示意图

Fig. 1　Schematic of agronomic practice for transplanting sweet potato seedlings on film with a boat-bottom shape

国内暂无薯苗移栽地膜膜口尺寸的国标或行标，故本文以现有文献为设计依据。李慧等[3]设计的指夹式膜上仿形扦插移栽装置，采用船底形栽植方式，作业后膜口平均长 76.5 mm、宽 30 mm，面积达 2 295 mm^2，基于此，本文以进一步缩小该膜口面积为设计目标，以提升膜上移栽作业效果。

1.2　整体结构及工作原理

移栽装置的结构及其核心组成部件如图 2 所示（结构件 11 中红色线条表示刀刃边缘）。

工作时，移栽装置安装于移栽机摆苗盘末端，按薯苗栽深要求定位于垄上 4～6 cm 处，如图 3 所示（v 为装置的前进速度，mm/s；ω 为苗插的角速度，(°)/s；R 为薯苗和苗插的入土点；H 为苗插的回转点；S 为苗插运动轨迹的最低点；C 为苗插的出土点；红色虚线为装置的移栽轨迹线）。驱动链轮通

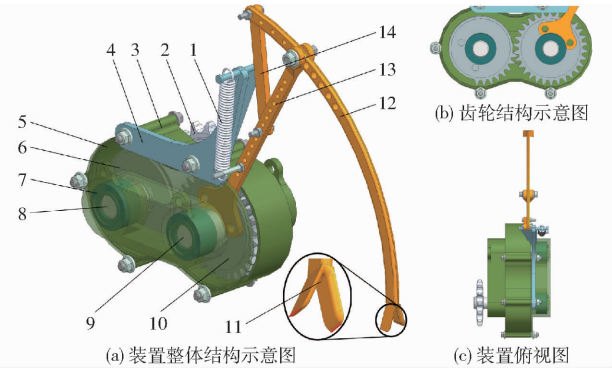


图 2 往复直插式薯苗移栽装置结构示意图

Fig. 2 Schematics of reciprocating direct-insertion sweet potato seedling transplanting device

1. 复位弹簧 2. 驱动链轮 3. 齿轮箱主壳体 4. 弹簧安装板 5. 齿轮箱端面壳体 6. 主动非全齿齿轮 7. 轴承 8. 动力输入轴 9. 动力输出轴 10. 从动移栽齿轮 11. 苗插端部叉形带刃结构 12. 苗插 13. 苗插拉杆 14. 苗插斜拉杆

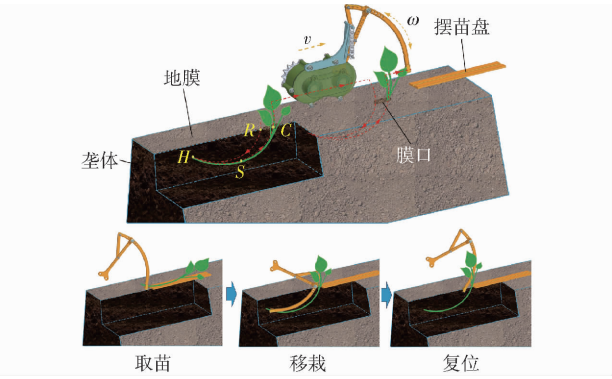


图 3 装置工作过程示意图

Fig. 3 Schematic of device working process

过动力输入轴将连续旋转动力传递至主动非全齿齿轮,该齿轮与从动移栽齿轮啮合,且从动移栽齿轮与苗插拉杆刚性连接。主动非全齿齿轮逆时针旋转,带动从动移栽齿轮顺时针转动,进而驱动苗插拉杆与苗插同步顺时针转动。苗插端部为叉形带刃结构,顺时针转动时先接触薯苗外露根部并将其按压至垄面,再切割地膜完成破膜入土,使苗插携薯苗按设定姿态入土,实现薯苗移栽。主动非全齿齿轮每旋转一周,装置完成一次工作循环,移栽一株薯苗。啮合阶段,苗插组件执行顺时针移栽动作;脱离啮合时,苗插组件在复位弹簧作用下回至初始位置,薯苗则因土壤阻力保持原有姿态。

该装置依托特殊结构设计,核心优势体现在运动方式与工作空间两方面:移栽入土阶段,苗插仅在单一纵向平面内运动,无需横向夹取动作;入土与出土过程中,仅长条形狭小零件苗插与土壤接触。上述特点使装置移栽过程的工作空间显著减小,既可稳定实现薯苗膜上移栽,又能有效缩小膜口面积。

2 移栽装置栽插运动轨迹设计与分析

2.1 轨迹设计

为揭示装置运动规律,以点 B 为坐标原点建立直角坐标系,构建移栽装置运动数学模型,分析各项参数对移栽轨迹的影响。

2.1.1 装置入土过程分析

如图 4 所示(A 为主动非全齿齿轮旋转中心;B 为从动移栽齿轮旋转中心;C 为复位弹簧上安装点;D 为复位弹簧在苗插拉杆 BE 上的安装点;E 为苗插与苗插拉杆的连接点;e 为连接点 E 的初始点;F 为苗插的终端点;f 为终端点 F 的初始点;G 为苗插与垄面线的交点;H 为苗插在垄内最低点;l_1 为苗插拉杆 BE 的长度;l_2 为苗插 EF 的直线长度;α 为苗插拉杆 BE 在初始位置时与水平线的夹角;θ 为苗插拉杆 BE 在终止位置时与水平线的夹角;δ 为苗插拉杆从初始位置到终止位置所运动的角度;φ 为苗插拉杆 BE 与圆弧 EF 在点 E 切线的夹角;φ_0 为苗插拉杆与直线 EF 的夹角),主动非全齿齿轮以角速度 ω 逆时针旋转,带动从动移栽齿轮及苗插等组件绕点 B 以角速度 ω 顺时针旋转,其角 δ 对应的圆弧区域为啮合区,啮合结束后,苗插及苗插拉杆借助复位弹簧拉

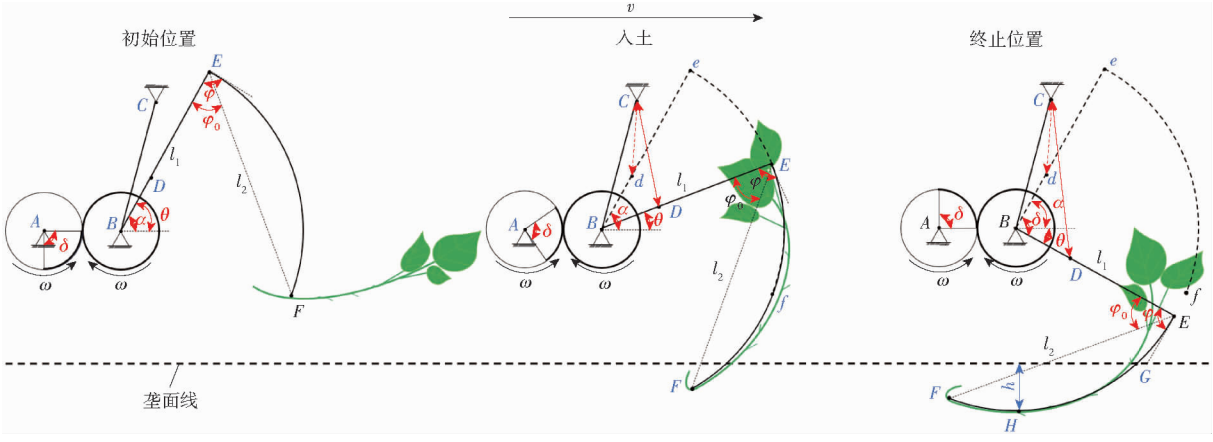


图 4 移栽装置入土过程运动数学模型

Fig. 4 Mathematical model of soil entry process motion of transplanting device

力回位，整个过程中装置以速度 v 沿 x 轴正方向运动。

根据图 4 可得点 E 的运动轨迹，点 E 的坐标 (x_E, y_E) 为

$$\begin{cases} x_E = l_1\cos\theta + vt \\ y_E = l_1\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

其中 $\theta \in [0, \alpha] \cup [\alpha - \delta, 0]$，角度 θ 随 ω 的变化关系为

$$\theta = \alpha - \omega t \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)得出点 E 坐标随 ω 的变化关系

$$\begin{cases} x_E = l_1\cos(\alpha - \omega t) + vt \\ y_E = l_1\sin(\alpha - \omega t) \end{cases} \tag{3}$$

同理得出点 B 的坐标 (x_B, y_B) 为

$$\begin{cases} x_B = vt \\ y_B = 0 \end{cases} \tag{4}$$

以点 E 为参考点，通过向量旋转可计算插苗点 F 的坐标。向量 $\boldsymbol{l}_{EB}$ 的方向正弦和余弦为

$$\begin{cases} \cos\beta = \dfrac{x_B - x_E}{l_1} \\ \sin\beta = \dfrac{y_B - y_E}{l_1} \end{cases} \tag{5}$$

式中　β——向量 $\boldsymbol{l}_{EB}$ 与 x 轴正方向的夹角

通过计算 β 的方向正弦和余弦，利用三角函数的和角公式即可推导出点 F 坐标。

由旋转公式得 $\boldsymbol{l}_{EF}$ 的坐标增量 $(\Delta x, \Delta y)$ 为

$$\begin{cases} \Delta x = l_2\cos(\beta + \varphi_0) = \\ \qquad l_2\left(\dfrac{x_B - x_E}{l_1}\cos\varphi_0 - \dfrac{y_B - y_E}{l_1}\sin\varphi_0\right) \\ \Delta y = l_2\sin(\beta + \varphi_0) = \\ \qquad l_2\left(\dfrac{y_B - y_E}{l_1}\cos\varphi_0 + \dfrac{x_B - x_E}{l_1}\sin\varphi_0\right) \end{cases} \tag{6}$$

点 F 坐标 (x_F, y_F) 为

$$\begin{cases} x_F = x_E + \dfrac{l_2}{l_1}[(x_B - x_E)\cos\varphi_0 - (y_B - y_E)\sin\varphi_0] \\ y_F = y_E + \dfrac{l_2}{l_1}[(y_B - y_E)\cos\varphi_0 + (x_B - x_E)\sin\varphi_0] \end{cases} \tag{7}$$

将式(3)、(4)代入式(7)中，最终得出点 F 坐标为

$$\begin{cases} x_F = l_1\cos(\alpha - \omega t) + vt - l_2\cos(\alpha - \omega t + \varphi_0) \\ y_F = l_1\sin(\alpha - \omega t) - l_2\sin(\alpha - \omega t + \varphi_0) \end{cases} \tag{8}$$

φ_0 与 φ 的关系式为

$$\varphi_0 = \varphi - \arcsin\frac{l_2}{2r} \tag{9}$$

式中　r——苗插 EF 半径

点 F 运动轨迹受多因素的影响，经对比分析，确定驱动角速度 ω、驱动速度 v、苗插长度 l_2 及角度 φ 为主要影响因素。在移栽过程中杆 BE 在垄上，对薯苗栽植姿态不会产生影响。

在船底形位姿下，垄内薯苗呈圆弧形(图 4)，苗插 EF 以点 B 为圆心，以初始角度 α 顺时针旋转角度 δ 后，入土姿态与薯苗船底形位姿高度契合。依据薯苗船底形移栽垄内长度为 10 ~ 25 cm、栽深 h 为 7 ~ 10 cm 的农艺要求，苗插 EF 设计为半径 200 mm、圆心角 90° 的扇形圆弧结构(圆弧长 314 mm)，初始角度 α、旋转角度 δ 分别设为 60°和 90°，移栽后垄内圆弧 EF 长度约 20 cm，可满足薯苗垄内长度农艺要求，苗插拉杆 BE 按栽深要求设计长度 l_1 为 20 cm，能适配薯苗不同栽深要求。

2.1.2　装置出土过程分析

装置出土阶段，两齿轮脱离啮合，出土速度由复位弹簧拉力决定。鉴于入土阶段已实现薯苗船底形移栽姿态，为降低出土时苗插对薯苗姿态的干扰，苗插需在非啮合时间($t < 1.5$ s)内完成急回，经仿真及土槽试验计算，确定复位弹簧整体刚度系数应不低于 5 N/mm。

弹簧上安装点 C 固定于弹簧安装板，相对装置整体位置不变。下安装点需兼顾栽深农艺要求与复位力矩需求。经力学分析，选取苗插拉杆 BE 上靠近点 B 且满足 $l_{BD} = l_1/3$ 的点 D 作为下安装点，该位置既不干扰栽深调节机构，又能通过合理力臂分配为 BE 杆提供充足复位力矩。

苗插入土深度增加时，其对接触界面土壤的扰动加剧，高应力区域占比与接触应力峰值均呈上升趋势，苗插所受阻力也随之增大，故装置运行至下止点时，苗插所受土壤阻力达到峰值。对该临界工况下的苗插组件进行受力分析，建立包含土壤阻力、弹簧拉力的力学方程，明确两者量化关系并据此确定弹簧上安装点的空间位置，受力模型见图 5(D、d 为复位弹簧在苗插拉杆 BE、Be 上的安装点；F_Z 为土壤对苗插的阻力；F_{ZX}、F_{ZY} 分别为 F_Z 在两个方向上的分力；T 为复位弹簧拉力；T_X、T_Y 分别为 T 在两个方向上的分力；G 为重力；G_X、G_Y 分别为 G 在两个方向上的分力；N_B 为点 B 对杆的支撑力)。

苗插至下止点时，苗插连杆组件瞬时角速度为 0，此时装置仅保持水平匀速运动，该工况下苗插所受土壤阻力及阻力矩达到极值。为简化分析，忽略苗插连杆组件自身重力及其竖直方向土壤支持力，仅针对该状态下的苗插连杆开展受力分析，得

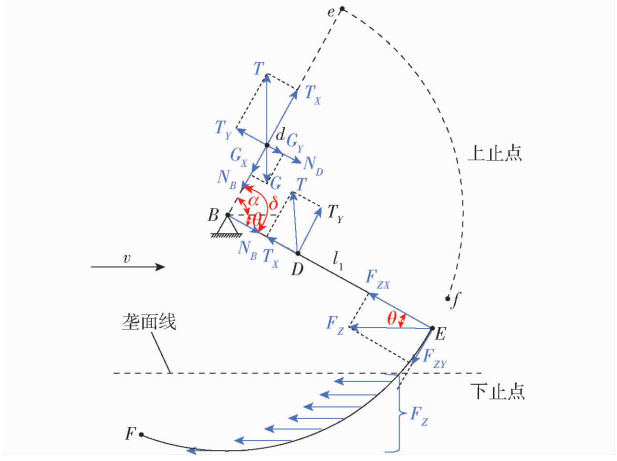


图 5 移栽过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of transplanting process

$$\begin{cases} N_B = F_{ZX} + T_X \\ T_Y - F_{ZY} = ma \\ \dfrac{T_Y l_1}{3} > F_{ZY} l_1 \end{cases} \tag{10}$$

式中 a——切向加速度

苗插所受土壤阻力以作用于点 E 的集中力 F_{ZY} 等效替代，在 BE 方向上，弹簧拉力 T 与阻力 F_Z 的分力、铰接点 B 的支持力 N_B 构成平衡。同时，弹簧法向分力 T_Y 需大于阻力法向分力，且法向力矩亦需大于阻力的法向力矩，经受力分析，当 $T_Y > 3F_{ZY}$ 时，苗插拉杆组件才会产生反向切向加速度，进而触发逆时针复位运动。

对上止点位置处点 d 开展受力分析，得

$$\begin{cases} T_X = G_X + N_B \\ T_Y = G_Y + N_D \end{cases} \tag{11}$$

苗插拉杆组件到达上止点时，在复位弹簧及复位安装板的约束下，各方向受力达到平衡状态。

对装置出土过程中苗插拉杆组件在上下止点的受力分析表明：上止点时，弹簧需在点 d 提供法向支撑力，以保证拉杆紧贴弹簧安装板并平衡苗叉拉杆组件重力；下止点时，弹簧需在点 D 提供法向动力，使苗插拉杆获得复位所需的切向加速度。结合受力条件与运动特性，弹簧上安装点应位于上止点点 d 上方 T_X 与 T_Y 夹角范围内，且弹簧竖直朝上。经方案比选，最终确定以点 d 为基准，竖直向上 90 mm 处的弹簧安装板点 C 作为弹簧上安装点。

2.2 装置轨迹试验分析

采用 Adams 软件开展装置移栽轨迹仿真分析，如图 6 所示（点 A 为轨迹入土点；点 B 为轨迹回止点；点 C 为轨迹出土点；l_3 为入土轨迹 AB 长度；l_4 为出土轨迹 BC 长度；a_0 为膜口长度），在轨迹栽深 80 mm 条件下，以驱动速比、苗插安装角、苗插长度为试验因素，理论膜口面积和理论垄内苗长为试验指标，设计单因素仿真试验，分析各因素对试验指标的影响规律[25-27]。

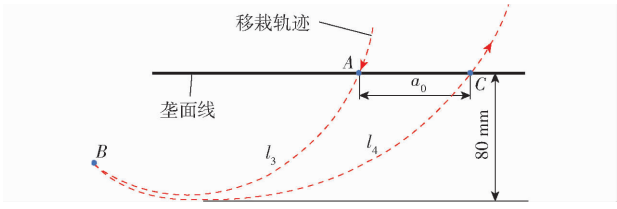


图 6 移栽轨迹示意图

Fig. 6 Schematic of transplanting trajectory

理论膜口面积和理论垄内苗长的计算公式为

$$W_m = b(a_0 + a') \tag{12}$$

$$L_r = \frac{l_3 + l_4}{2} \tag{13}$$

式中 W_m——理论膜口面积，mm^2

a'——苗插横向宽度，mm

b——苗夹最大纵向宽度，mm

L_r——理论垄内苗长，mm

2.2.1 驱动速比

根据薯苗移栽株距 150 ~ 250 mm 的农艺要求，以驱动速比为试验因素，以 0.24(°)/mm 为增量梯度设置 5 组参数（表 1），开展单因素试验，分析驱动速比对理论膜口面积与理论垄内苗长的影响。

表 1 驱动速比-株距-驱动角速度-驱动移速对应表

Tab. 1 Corresponding values of drive speed ratio-spacing between plants-drive rotational speed-drive moving speed

序号	驱动速比 n/((°)·mm^{-1})	株距 d/mm	驱动角速度 ω/((°)·s^{-1})	驱动移速 v/(mm·s^{-1})
1	2.40	150.00	180	75.00
2	2.16	166.66	180	83.33
3	1.92	187.50	180	93.75
4	1.68	214.28	180	107.14
5	1.44	250.00	180	125.00

由图 7 可知，不同驱动速比下移栽轨迹差异显著。随驱动速比的增大，倒“V”形移栽轨迹宽度逐渐减小，对应的理论膜口长度也显著减小。

驱动速比对理论膜口面积和理论垄内苗长的影响见图 8。随驱动速比增大，理论膜口面积逐渐减小，当驱动速比为 1.92(°)/mm 时减小趋势变缓；理论垄内苗长随驱动速比增大而增大，驱动速比为 1.92(°)/mm 时增大趋势变缓，且整体变化范围较小。为保证膜上移栽质量，需将膜口面积控制在合理偏小范围，结合驱动速比对理论垄内苗长影响微弱的特点，综合确定正交试验中驱动速比的因素水平为 1.92、2.16、2.40(°)/mm。

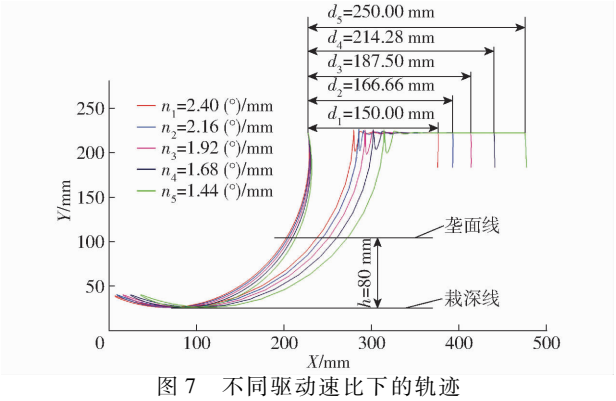


图 7　不同驱动速比下的轨迹

Fig. 7　Trajectories at different drive speed ratios

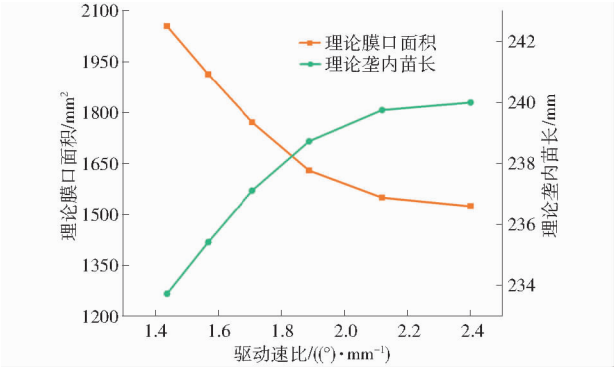


图 8　不同驱动速比下的理论膜口面积和理论垄内苗长变化曲线

Fig. 8　Variation curves of theoretical film opening area and theoretical seedling length in ridge at different driving speed ratios

2.2.2　苗插安装角

以苗插拉杆与苗插连接点处切线的夹角 φ（苗插安装角）为试验因素开展单因素试验，分析其对理论膜口面积和理论垄内苗长的影响。设定驱动速比为 2.16(°)/mm（驱动角速度 180(°)/s、驱动移速 83.33 mm/s）、栽深 80 mm，苗插安装角在 70°～110°范围内以 10°为增量梯度设置 5 组水平，其轨迹见图 9。

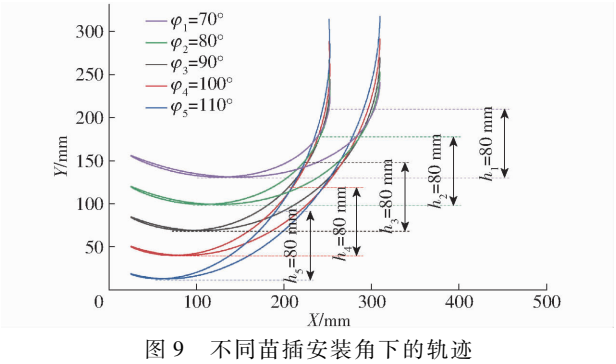


图 9　不同苗插安装角下的轨迹

Fig. 9　Trajectories at different seedling inserter installation angles

由图 9 可知，苗插安装角增大时，移栽轨迹与水平线的夹角显著递增，轨迹倾斜度持续加大，姿态依次从船底形、水平栽法转变为斜栽法，该角度对移栽轨迹姿态起决定性影响。

苗插安装角对理论膜口面积及理论垄内苗长的影响见图 10，在 70°～110°范围，二者均随安装角增大呈逐渐递减趋势。具体而言，安装角小于 80° 时，理论膜口面积在该区间内存在最大值；安装角大于 100°时，膜口面积虽符合农艺要求，但理论垄内苗长减小趋势加快，且无法满足薯苗“多埋节”的农艺要求。综合分析，正交试验中苗插安装角的适宜范围为 80°～100°。

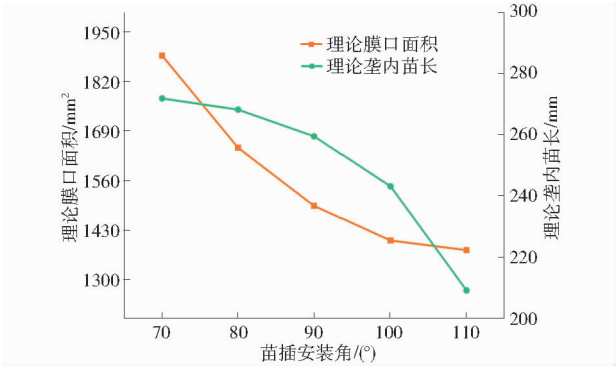


图 10　不同苗插安装角下的理论膜口面积和理论垄内苗长变化曲线

Fig. 10　Variation curves of theoretical film opening area and theoretical seedling length in ridge at different installation angles of seedling inserting rod

2.2.3　苗插长度

以苗插长度为试验因素开展单因素仿真试验，分析其对理论膜口面积和理论垄内苗长的影响。设置装置驱动速比 2.16(°)/mm，栽深 80 mm，苗插安装角为 90°，苗插长度在 180～230 mm 范围内以 10 mm 为增量梯度变化，其轨迹见图 11。由图 11 可见，苗插长度增加时，前进方向上移栽轨迹与水平线的夹角显著递减，轨迹倾斜度持续减小，轨迹末端翘起且与水平线夹角增大。

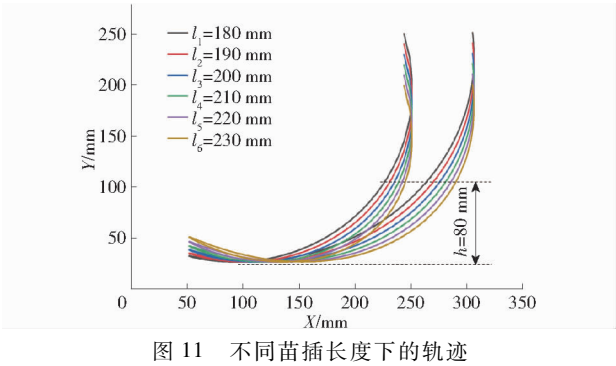


图 11　不同苗插长度下的轨迹

Fig. 11　Trajectories under different seedling inserter lengths

苗插长度对理论膜口面积及理论垄内苗长的影响见图 12。数据显示，苗插长度在 180～230 mm 区间变化时，二者均随苗插长度增加呈逐渐递增趋势。

苗插长度超过 220 mm 时，理论垄内苗长突破 250 mm，叠加移栽过程中薯苗根部超出取苗点的实际尺寸，实际垄内苗长将进一步增加。鉴于实际垄内苗长过长不利于薯苗根系发育，综合确定正交试验中苗插长度的合理取值范围为 180 ~ 220 mm。

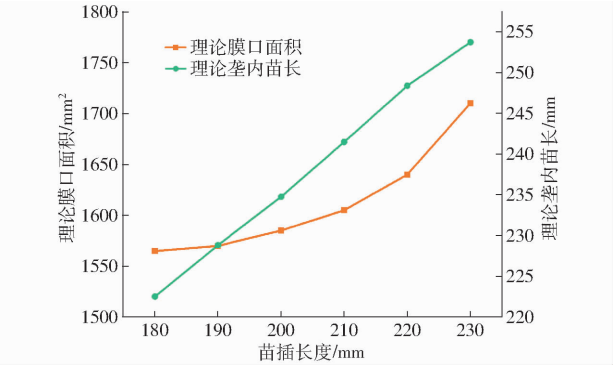


图 12 不同苗插长度下的理论膜口面积和理论垄内苗长变化曲线

Fig. 12 Variation curves of theoretical film opening area and theoretical seedling length in ridge under different lengths of seedling inserting rod

3 移栽装置性能台架试验

3.1 台架试验设计

为探究试验因素对装置作业性能的影响并确定最优参数，依据单因素轨迹试验结果，以驱动速比、苗插安装角和苗插长度为试验因素，膜口面积、垄内苗长为评价指标，开展三因素三水平的二次旋转正交组合台架优化试验（图 13）。试验因素编码见表 2。

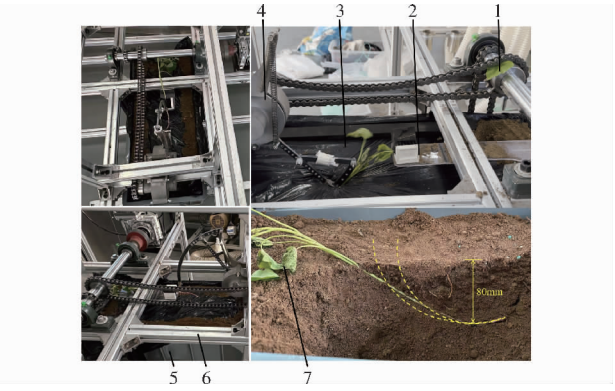


图 13 移栽装置台架试验

Fig. 13 Bench test of transplanting device

1. 驱动链轮 2. 摆苗盘 3. 地膜 4. 移栽装置 5. 土槽 6. 试验台架 7. 薯苗

3.2 试验结果与方差分析

正交试验方案与结果见表 3，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。采用 Design-Expert 13 对台架试验结果进行方差分析，剔除不显著因素后，得到膜口面积和垄内苗长二次回归模型

表 2 正交试验因素编码

Tab. 2 Factors coding of orthogonal experiment

编码	因素		
	驱动速比 x_1/((°)·mm^{-1})	苗插安装角 x_2/(°)	苗插长度 x_3/mm
-1	1.92	80	180
0	2.16	90	200
1	2.40	100	220

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experimental schemes and results

序号	因素			膜口面积	垄内苗长
	X_1	X_2	X_3	Y_1/mm²	Y_2/mm
1	0	-1	1	1 889	225.2
2	1	1	0	1 656	222.5
3	0	0	0	1 581	230.0
4	-1	0	-1	1 840	210.0
5	0	0	0	1 590	234.0
6	1	0	1	1 735	228.5
7	0	0	0	1 580	234.0
8	-1	0	1	1 894	220.5
9	0	0	0	1 584	232.0
10	0	0	0	1 595	233.0
11	-1	-1	0	2 025	221.5
12	0	1	1	1 842	227.0
13	0	-1	-1	1 946	222.8
14	0	1	-1	1 610	210.0
15	-1	1	0	1 750	210.0
16	1	0	-1	1 590	219.0
17	1	-1	0	1 760	225.5

$$Y_1 = 1\,586 - 96X_1 - 95.25X_2 + 46.75X_3 + 42.75X_1X_2 + 22.75X_1X_3 + 72.25X_2X_3 + 77.38X_1^2 + 134.37X_2^2 + 101.38X_3^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 232.6 + 4.19X_1 - 3.19X_2 + 4.92X_3 + 2.12X_1X_2 + 3.65X_2X_3 - 7.24X_1^2 - 5.49X_2^2 - 5.86X_3^2 \quad (15)$$

由表 4 可知，膜口面积（Y_1）、垄内苗长（Y_2）回归方程均极显著，且失拟项 $P > 0.05$，表明模型无失拟，与实际情况贴合；二者决定系数 R^2 分别为 0.997 7、0.987 8，说明方程计算结果与实际值高度吻合，可用于结果分析。

Y_1 各试验因素均影响显著（$P < 0.05$）；Y_2 的 X_1、X_2、X_3、X_1X_2、X_2X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 均影响显著（$P < 0.05$）。各因素对 Y_1 的显著性影响由大到小为：驱动速比、苗插安装角、苗插长度；对 Y_2 的显著性影响由大到小为：苗插长度、驱动速比、苗插安装角。

3.3 响应曲面分析

为更直观地分析各因素对 Y_1、Y_2 的影响，采用 Design-Expert 13 软件生成模型因素交互曲面，如图 14、15 所示。

表 4　方差分析

Tab. 4　Analysis of variance

方差来源	膜口面积					垄内苗长				
	平方和	自由度	均方和	F	P	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	3.544×10^5	9	39 378.38	502.55	<0.000 1 ***	1 035.95	9	115.11	62.91	<0.000 1 ***
X_1	73 728.00	1	73 728.00	940.92	<0.000 1 ***	140.28	1	140.28	76.67	<0.000 1 ***
X_2	72 580.50	1	72 580.50	926.28	<0.000 1 ***	81.28	1	81.28	44.42	0.000 3 ***
X_3	17 484.50	1	17 484.50	223.14	<0.000 1 ***	194.04	1	194.04	106.06	<0.000 1 ***
X_1X_2	7 310.25	1	7 310.25	93.29	<0.000 1 ***	18.06	1	18.06	9.87	0.016 3 *
X_1X_3	2 070.25	1	2 070.25	26.42	0.0013 **	0.25	1	0.25	0.136 6	0.722 6
X_2X_3	20 880.25	1	20 880.25	266.48	<0.000 1 ***	53.29	1	53.29	29.13	0.001 0 **
X_1^2	25 207.96	1	25 207.96	321.71	<0.000 1 ***	220.55	1	220.55	120.54	<0.000 1 ***
X_2^2	76 027.96	1	76 027.96	970.27	<0.000 1 ***	126.79	1	126.79	69.30	<0.000 1 ***
X_3^2	43 271.12	1	43 271.12	552.23	<0.000 1 ***	144.71	1	144.71	79.09	<0.000 1 ***
残差	548.5	7	78.36			12.81	7	1.83		
失拟项	386.50	3	128.83	3.18	0.146 4	1.61	3	0.535 8	0.191 4	0.897 2
误差	162.00	4	40.50			11.20	4	2.80		
总和	3.550×10^5	16				1 048.76	16			

注：* 表示影响显著（$P<0.05$）；** 表示影响非常显著（$P<0.01$）；*** 表示影响极显著（$P<0.001$）。

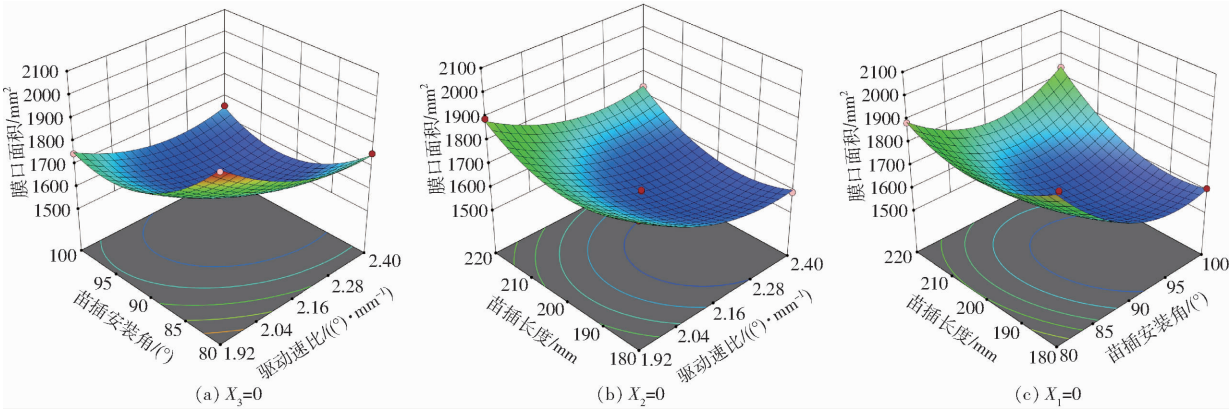


图 14　因素交互作用对膜口面积影响的响应曲面

Fig. 14　Response surfaces of effect of factor interaction on film opening area

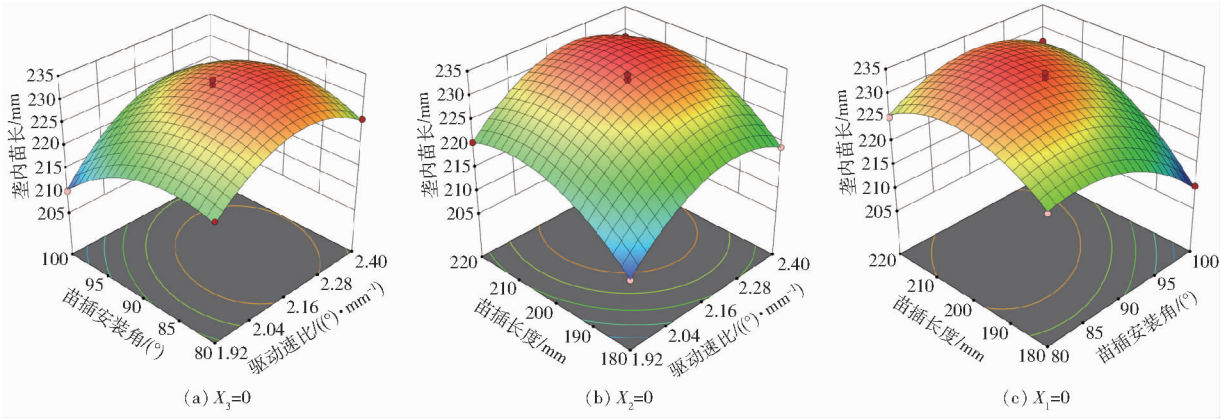


图 15　因素交互作用对垄内苗长影响的响应曲面

Fig. 15　Response surfaces of effect of factor interaction on seedling length in ridge

表 4 方差分析显示 X_1X_2、X_1X_3 和 X_2X_3 对 Y_1 影响显著，各因素交互作用响应面分析表明，固定一因素时，Y_1 随另外两因素增大先快速减小后略增大，因素两两交互作用显著。其中 X_3 对 Y_1 的影响曲线平缓，X_1 的影响曲线陡峭，印证 X_1 对于 Y_1 的主导作用。驱动速比为 2.16 ~ 2.28 (°)/mm、苗插安装角为85° ~ 95°、苗插长度为 200 ~ 210 mm 时，Y_1 最小。

表 4 方差分析显示 X_1X_2、X_2X_3 对 Y_2 影响显著，各因素交互作用响应面分析表明，X_2 固定时，Y_2 随 X_1 增加先快速增大后略减小，随 X_3 增加整体增大。X_1 或 X_3 固定时，Y_2 均随 X_2 的增加先增后减。驱动速比为 2.16 ~ 2.28 (°)/mm、苗插安装角为 85° ~ 95°、苗插长度为 190 ~ 210 mm 时，Y_2 最大。

为确定移栽装置最优工作参数组合，对二次回归正交试验结果进行优化分析，建立优化目标函数及约束条件

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \max Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 1.92(°)/\text{mm} \leqslant x_1 \leqslant 2.40(°)/\text{mm} \\ 80° \leqslant x_2 \leqslant 100° \\ 180\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 220\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

得到最优参数组合为：驱动速比 2.24 (°)/mm，苗插安装角 89.88°，苗插长度 204.42 mm，该组合下膜口面积为 1 580 mm^2，垄内苗长 234 mm。结合实际工况，确定最优工作参数为驱动速比 2.24 (°)/mm，苗插安装角 90°，苗插长度 204 mm。

3.4 作业过程分析

装置台架试验过程见图 16，初始状态下，链轮开始向移栽装置输入动力，装置开始作业；取苗阶段，苗插端部叉形结构触达薯苗并施加下压力，将薯苗压至地膜处；破膜阶段，叉形结构刃边缘切割地膜，同步完成薯苗膜上定位；入土阶段，苗插携薯苗入土，薯苗根部因苗插和土壤阻力弯折；下压至最深点时，薯苗“船底形”入土姿态定型，齿轮箱内部两齿轮脱离啮合，苗插进入复位阶段，在复位弹簧拉力作用下，苗插沿原路径返回，薯苗受土壤阻力留存于土中，至此完成一次膜上移栽作业。各环节衔接连贯，保障了移栽的高效与精准。

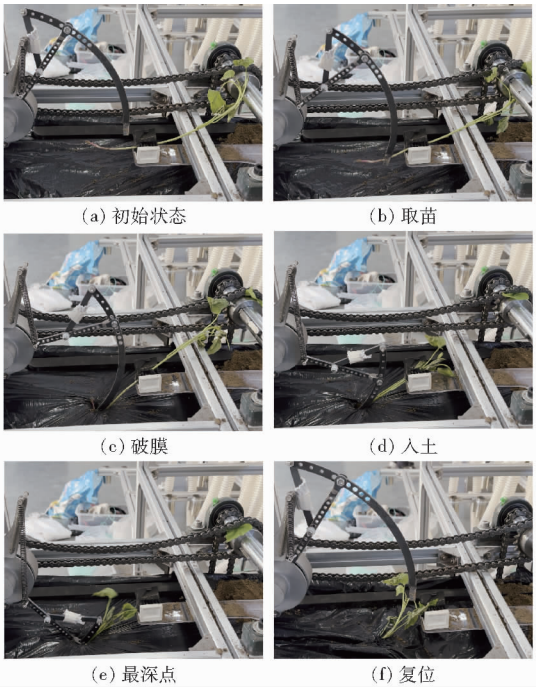


图 16 台架试验装置工作过程

Fig. 16 Working process of bench test device

4 移栽装置性能试验

为验证移栽装置实地移栽效果及台架试验结果准确性，将该装置搭载于移栽机对应位置（图 17），于 2025 年 6 月 25 日在山东省济南市章丘区山东省农业机械科学研究院田间试验基地，基于最优参数组合开展田间作业性能试验。

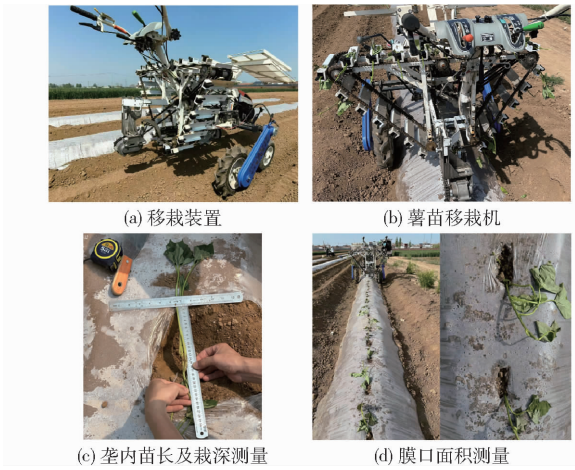


图 17 移栽装置田间试验

Fig. 17 Field test of transplanting device

该装置田间试验膜口面积平均值为 1 680 mm^2，垄内苗长平均值为 221 mm，与台架试验结果的相对误差分别为 6.1%、5.8%。误差主要源于田间复杂地形、机具振动等环境因素。总体来看，田间试验与台架试验结果基本一致。

5 结论

（1）针对薯苗膜上移栽“小膜口、多埋节”农艺需求，设计往复直插式薯苗膜上移栽装置。分析装置移栽运动轨迹，明确轨迹变化主要影响因素，并开展各关键因素的单因素轨迹仿真试验。

（2）以驱动速比、苗插安装角、苗插长度为试验因素，膜口面积、垄内苗长为试验指标开展台架正交试验，得到最优参数组合为：驱动速比 2.24 (°)/mm，苗插安装角 90°，苗插长度 204 mm。该组合下膜口面积为 1 580 mm^2，垄内苗长为 234 mm。

（3）基于最优参数组合开展田间试验，结果显示膜口面积平均值为 1 680 mm^2，垄内苗长平均值为 221 mm；与台架试验结果的相对误差分别为 6.1%、5.8%，验证了台架试验结果可靠，且该装置可实现薯苗“小膜口、多埋节”移栽，满足实际作业要求。

参 考 文 献

[1] 胡良龙,胡志超,谢一芝,等. 我国甘薯生产机械化技术路线研究[J]. 中国农机化,2011(6):20 - 25.
HU Lianglong, HU Zhichao, XIE Yizhi, et al. Study on the route of mechanization of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) production technology in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(6): 20 - 25. (in Chinese)

[2] 马代夫,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. 江苏农业学报,2012,28(5):969 - 973.
MA Daifu, LI Qiang, CAO Qinghe, et al. Development and prospect of sweet potato industry and its technologies in China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2012,28(5):969 - 973. (in Chinese)

[3] 李慧,何腾飞,刘虎,等. 丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制[J]. 农业工程学报,2023,39(16):26 - 35.
LI Hui, HE Tengfei, LIU Hu, et al. Development of the profiling up-film transplanter for sweet potato in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 26 - 35. (in Chinese)

[4] 陆建珍,汪翔,秦建军,等. 我国甘薯种植业发展状况调查报告(2017 年)——基于国家甘薯产业技术体系产业经济固定观察点数据的分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):393 - 398.
LU Jianzhen, WANG Xiang, QIN Jianjun, et al. Survey report on the development status of China's sweet potato planting industry (2017) — an analysis based on data from fixed observation points for industrial economy of the national sweet potato industry technology system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(23): 393 - 398. (in Chinese)

[5] 朱倩,王公仆,张万枝,等. 甘薯种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2025,46(7):36 - 42.
ZHU Qian, WANG Gongpu, ZHANG Wanzhi, et al. Research progress on key technologies and equipments of sweet potato planting mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025,46(7):36 - 42. (in Chinese)

[6] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). State of food and agriculture 2019 report[EB/OL]. (2019 - 10 - 15). http//www.fao.org/statistics/zh/.

[7] 汪宝卿,张立明. 环境因素和农艺措施影响甘薯根系生长发育的研究进展[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2017,35(2):11 - 22.
WANG Baoqing, ZHANG Liming. Research progress on growth and development of sweet potato roots affected by environment factors and agronomic measures[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2017, 35(2): 11 - 22. (in Chinese)

[8] HOU F Y, DONG S X, XIE B T, et al. Mulching with plastic film improved the root quality of summer-sown sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) in northern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(5): 982 - 991.

[9] 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)

[10] 张云鹏,谭芊,许鹏,等. 基于 EDEM - ADAMS 的甘薯水平移栽机构优化设计[J]. 中国农机化学报,2024,45(1):35 - 41,337.
ZHANG Yunpeng, TAN Qian, XU Peng, et al. Optimization design of sweet potato horizontal transplanting mechanism based on EDEM - ADAMS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 35 - 41,337. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 严伟,张文毅,胡敏娟,等. 国内外甘薯种植机械化研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2018,39(2):12 - 16.
YAN Wei, ZHANG Wenyi, HU Minjuan, et al. Present situation of research and expectation on plant mechanization of sweet potato in China and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(2):12 - 16. (in Chinese)

[13] 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 Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(3):35 - 40. (in Chinese)

[14] 周海丽,颜梦莹,薛洪彬,等. 椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的设计与试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(1):96 - 104.
ZHOU Haili, YAN Mengying, XUE Hongbin, et al. Design and tests on the transplanting mechanism of planetary gear train with elliptical gears for sweet potatoes[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025,53(1):96 - 104. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 刘正铎. 机械臂式甘薯移栽机关键技术与移栽机理研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
LIU Zhengduo. Key technology and transplanting mechanism of sweet potato transplanter with mechanical arm[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[17] 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)

[18] LI L, XU Y, PAN Z, et al. Design and experiment of sweet potato up-film transplanting device with a boat-bottom posture[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1716.

[19] 李仁崑,赵娇娜,张新,等. 甘薯移栽方式与产量性状的关系[J]. 作物杂志,2015(5):164 - 166.
LI Renkun, ZHAO Jiaona, ZHANG Xin, et al. Relationships between transplanting methods and yield characters of sweet potato[J]. Crops, 2015(5):164 - 166. (in Chinese)

[20] 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 Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(6):21 - 26. (in Chinese)

[21] 李江辉,贾峥嵘,王凌云,等. 甘薯垄作覆膜的增温保墒效果及其对产量的影响[J]. 山西农业科学,2016,44(4):494 - 497.
LI Jianghui, JIA Zhengrong, WANG Lingyun, et al. Effect of ridge tillage with plastic film mulching on temperature increase and preservation of soil moisture and yield of sweet potato[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2016,44(4):494 - 497. (in Chinese)

[22] PAN Z, LI L, CHEN D, et al. Design and optimization of a boat bottom shaped transplanting device for sweet potato (*Ipomoea batatas*) with low seedling damage rate[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2817.

[23] 马代夫,鄂文弟. 甘薯绿色轻简化栽培技术手册[M]. 北京:中国农业出版社,2021.

[24] 朱斌彬,吕钊钦. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计[J]. 农机化研究,2018,40(6):120 - 123,161.
ZHU Binbin, LÜ Zhaoqin. Design of transplanting machine for nude seedling with belt[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 120 - 123,161. (in Chinese)

[25] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):68 - 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip straw cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 - 79. (in Chinese)

[26] 王秀,刘蒙滋,翟长远,等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(9): 122 - 132.
WANG Xiu, LIU Mengzi, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of a vegetable transplanting clip stem seedling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 122 - 132. (in Chinese)

[27] 胡建平,潘杰,陈凡,等. 基于 EDEM - RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (5): 75 - 85, 301.
HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM - RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75 - 85, 301 (in Chinese)