

丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制

李 慧¹, 何腾飞¹, 刘 虎¹, 史 嵩^{1,2}, 周纪磊¹, 刘学串¹, 汪宝卿^{3*}

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100;

3. 山东省农业科学院, 济南 250100)

摘 要: 针对北方丘陵山地甘薯膜上移栽机械缺乏这一产业难题, 该研究基于甘薯覆膜栽培“浅栽、多埋节”农艺需求, 以理论扦插角度、栽植深度、膜下薯苗长度、穴口长度的最优综合得分为目标, 对薯苗栽植单元取植动作时空配合参数和工作参数进行分析, 并设计了丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机, 进行了室内外试验。室内取苗试验结果表明, 在 40~50 r/min 植苗速度下, 栽植单元对黄淮海地区常用薯苗品种取苗效果较好, 取苗率在 99% 以上, 满足田间作业需求。以作业速度、薯苗基部形态、薯苗伸出夹苗刷长度为影响因素, 以膜下薯苗长度、栽深合格率和漏苗率为考核指标, 进行田间移栽正交试验。结果表明, 影响薯苗栽植指标综合评分的主次因素为薯苗伸出夹苗刷长度、薯苗基部特征、作业速度, 最优参数组合为作业速度 0.5 km/h、薯苗基部形态优、薯苗伸出长度 60 mm。验证试验结果表明, 最优参数组合下, 平均薯苗扦插深度为 73.6 mm, 膜下薯苗平均长度为 205.4 mm, 平均穴口长度为 76.5 mm, 薯苗栽植后与地面平均夹角为 53.8°, 扦插株距变异系数为 8.9%, 栽深合格率为 93.7%, 漏苗率为 3.5%, 扦插效果良好, 满足北方膜上船底形插的农艺需求。研究结果对开发适合北方丘陵山地甘薯膜上扦插的实用机具以及甘薯产业的可持续发展具有重要意义。

关键词: 农业机械; 仿形; 甘薯; 丘陵山地; 膜上扦插

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305128

中图分类号: S223.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-16-0026-10

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305128 <http://www.tcsae.org>

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 26-35. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305128 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国甘薯种植面积和出口量均居世界首位^[1], 具有区域广、跨度大等特点。针对不同作业场景, 农艺专家们探索了多种甘薯种植生产模式^[2]。丘陵山地甘薯生产量占全国总量的 62.8%^[3], 甘薯覆膜垄作栽培是北方薯区丘陵山地地区的主要种植模式, 具有增加土壤有效积温, 改善膜内土壤结构与墒情等作用, 可显著提高甘薯产量^[4-5], 有利于缓解人口增加与粮食短缺的矛盾^[6-7]。甘薯裸苗(薯苗)膜上扦插是覆膜垄作栽培模式的重要环节, 需要满足茎蔓种植、浅栽、多埋节等复杂农艺要求。目前中国丘陵山地薯苗膜上扦插主要依靠人工作业, 劳动强度大、效率低, 各穴种植姿态一致性差^[8]。丘陵山地甘薯移栽机短缺是提升甘薯生产机械化水平的短板和卡点^[9]。

目前旱地作物覆膜栽培生产方式主要用于膜上播种或移栽。其中膜上播种包括花生^[10]、棉花^[11]、马铃薯^[12]、小麦^[13]、玉米^[14]等多种作物, 主要通过研究速度补偿机

构、凸轮与曲柄组合机构、平行四杆机构等控制鸭嘴成穴器, 使其减弱入土-出土播种期间的水平移动, 从而缓解撕膜、挑膜、错位等现象导致的漏播问题。意大利 FORIGO 公司^[15]和侯守印等^[16]通过膜上侧向开穴解决覆膜播种时膜孔尺寸大、形状不规则、播种质量差等问题。膜上移栽则主要通过机械装置剪切、挤压等动作, 实现垄体膜上开穴、膜下土壤运移和回填, 以满足移栽苗位姿需求^[17]。许春林等^[18]设计了步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构, 实现了水稻钵苗膜上栽植, 在秸秆纤维地膜和塑料地膜上其开孔刀开出的膜孔宽度和长度皆满足设计需求。LIU 等^[19]和金鑫等^[20]分别采用五连杆机构和滑块机构控制鸭嘴栽植器动作, 解决膜上移栽穴口大、直立度低、穴口地膜破损等问题。YANG 等^[21]指出在相同种植频率下, 吊杯式移栽机采用锥形杯的破膜大小、地膜破损程度和成孔性能均优于多边形杯。胡飞等^[22]采用复合曲柄摇杆配合鸭嘴栽植器实现蔬菜膜上双行栽植。韩长杰等^[23]开展了半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机的成穴器参数优化研究, 发现成穴深度是影响穴口上部纵长的主要因素。

上述研究主要针对钵苗膜上直立栽种, 而甘薯膜上移栽需要采用裸苗进行浅栽、多埋节种植, 以增加产量^[24]。现有机具主要有荷兰 MICHIGAN 和意大利 CHECCHI&MAGLI 公司生产的 MT 移栽机和 OTMA 移栽机^[25-27]、胡良龙等^[28]设计的甘薯裸苗复式栽植机。这些机器主要用

收稿日期: 2023-05-07 修订日期: 2023-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201683); 国家重点研发计划项目(2020YFD1000802-3); 山东省薯类产业技术体系农业机械试验站项目(SDAIT-16-13)

作者简介: 李慧, 博士, 高级工程师, 研究方向为农业机械装备设计与理论。Email: lihuictc@shandong.cn

※通信作者: 汪宝卿, 博士, 副研究员, 研究方向为甘薯栽培与耕作。Email: xb970607@163.com

于无覆膜垄体的甘薯移栽, 通过开沟投苗覆土方式种植裸苗。针对甘薯膜上移栽模式, 朱斌彬等^[29]进行了指夹式栽植机构的运动轨迹理论分析。PAN 等^[30]研制了用于大田作业的甘薯膜上多行复式移栽机, 可实现薯苗膜上船底形栽插姿态。日本井关农机株式会社^[31]则研发了 PVH 型带夹送苗式手扶移栽机, 通过棘轮棘爪控制送苗装置跟随植苗部件运动, 可实现精准间歇送苗, 但采用棘轮棘爪也限制了作业速度的提升。LIU 等^[32]设计了一种履带式甘薯移植机, 该机器可以完成水平、垂直等多种栽植轨迹并进行自动补苗作业, 由于采用电力驱动, 连续作业时间有限。上述研究主要以膜上栽种姿态为设计目标, 忽略了破膜孔尺寸的问题, 会影响保温保墒效果^[33]。

针对北方丘陵山地甘薯膜上机械化移栽这一产业难题, 本文基于 PVH1 系列蔬菜移栽机传动及行走系统, 根据丘陵山地甘薯膜上扦插农艺需求, 设计了丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机, 重点研究并联传动式薯苗栽植单元结构参数和工作参数等, 并对不同速度下整机的薯苗穴内形态、栽植质量等性能进行田间试验。

1 丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机结构及工作原理

1.1 作业农艺需求及难点分析

北方薯苗人工膜上扦插常采用斜插、船底形插和水平插等方式, 以实现“浅栽、多埋节”的复杂农艺需求^[34]。其中船底形插法具备水平插法入土节位多和斜插法抗旱力强、易发根的优点, 结薯多而大小均匀, 因此本研究选定船底形插法为机具的实现目标。采用此法扦插时, 适用壮苗(棚内拔苗、根部较直、节间长度短)密植, 苗长 25~35 cm 左右, 苗粗 5 mm 左右, 入土 4~5 节, 露出覆膜垄体 1~2 节, 将头尾翘起如船底形, 埋入膜下 5~10 cm 深, 薯苗扦插角为 30°~60°。根据薯苗品种不同, 则船底形插埋入土下薯节长度约为 10~20 cm。同时, 根据土壤肥力及品种特性不同, 移栽株距多为 18~30 cm。

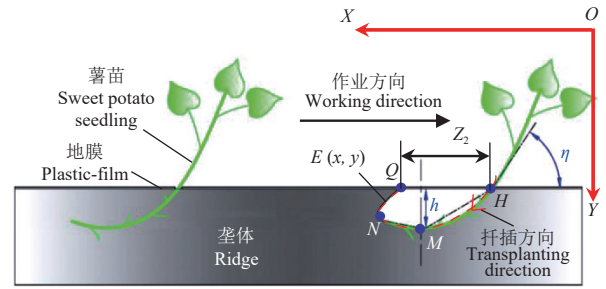
薯苗膜上扦插的难点在于, 保证船底形态的同时, 减少对地膜的破坏。而丘陵山地膜上扦插, 由于地势不平、垄体不均匀等问题, 其机械化生产还需具备整机调平和垄面仿形等功能, 以满足扦插深度。

针对甘薯膜上船底形插农艺需求, 构建图 1 所示坐标系, 机械扦插时, 扦插轨迹 $E(x, y)$ 沿移栽入土方向依次经过破膜入土点 H , 船栽苗最深点 M , 船栽苗最远点 N 和出土点 Q , 并存在如下几何关系:

$$\begin{cases} h = y_M - y_H \\ Z_1 \approx |MN| + |MH| \\ = \sqrt{(x_M - x_H)^2 + h^2} + \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2} \\ \eta = \arctan \frac{y_H}{x_H} \\ Z_2 = x_Q - x_H \end{cases} \quad (1)$$

式中 Z_1 为膜下薯苗长度, mm; Z_2 为破膜穴口长度, mm; x_H 为破膜入土点 H 的横坐标, mm; y_H 为点 H 的纵坐标 mm; x_M 为点 M 的横坐标, mm; y_M 为点 M 的纵

坐标, mm; x_N 为点 N 的横坐标, mm; y_N 为点 N 的纵坐标, mm。



注: H 为破膜入土点; Q 为出土点; M 为最深点; N 为最远点; η 为薯苗与地面夹角, ($^{\circ}$); XOY 为坐标系, X 轴与前进方向平行且相反, Y 轴垂直地面向下; Z_2 为破膜穴口长度, mm; $E(x, y)$ 为扦插轨迹; h 为扦插深度, mm。

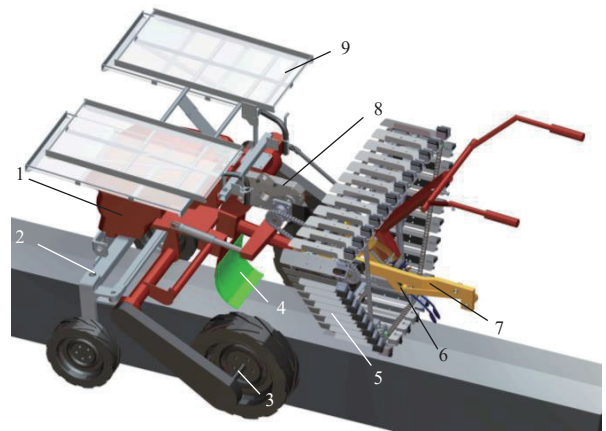
Note: H is the soil penetration point; Q is the excavation point; M is the deepest point; N is the farthest point; η is the angle between the slip and the ground, ($^{\circ}$); XOY is the coordinate, X axis is parallel and opposite to the forward direction, Y axis is vertical and downward to the ground; Z_2 is the length of the cavity of the mulched ridge, mm; $E(x, y)$ is transplanting trajectory; h is the transplanting depth, mm.

图 1 薯苗机械化船底形插模型

Fig.1 Mechanical transplanting model of sweet potato seedlings with boat-bottom placement

1.2 整机结构及工作原理

丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机由手扶式底盘、行走装置、送苗装置、植苗装置、垄面仿形系统、动力并联传动系统等组成(图 2)。



1.手扶式底盘 2.垄体导向装置 3.行走装置 4.垄面仿形系统 5.送苗装置 6.植苗装置 7.机架 8.动力并联传动系统 9.置苗架
1.Handheld chassis 2.Ridge guiding device 3.Walking device 4.Ridge surface profiling system 5.Seedling delivery device 6.Seedling planting device 7.Frame 8.Power parallel transmission system 9.Seedling rack

图 2 丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机

Fig.2 Profiling transplanter for sweet potato in hilly and mountainous region

丘陵山地薯苗扦插覆膜垄体垄高为 25~30 cm, 垄距为 80~90 cm。垄体左右侧受丘陵山地坡度影响存在偏差。丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机作业时, 先根据垄面坡度通过手扶式底盘进行整机左右调平, 保证植苗装置位于垄面中央, 同时根据垄面高度, 调整垄面仿形系统仿形装置位置, 保证扦插深度。随后动力经发动机底盘经过并联传动系统分别传至行走装置、送苗装置和植苗装置。送苗装置和植苗装置配合, 实现薯苗扦插。整机参数如表 1 所示。

表 1 丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机主要参数

Table 1 Main parameters of sweet potato seedlings profiling transplanter for hilly and mountainous region

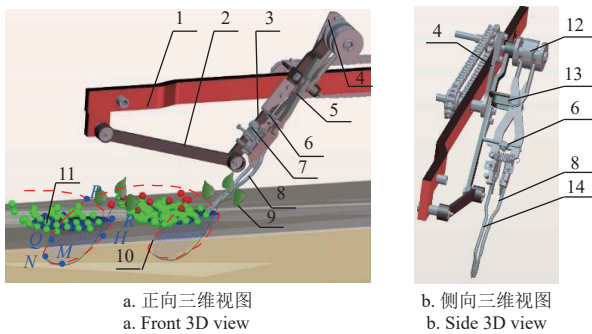
参数 Parameters	数值 Value
整机尺寸 (长×宽×高) Machine demensions (length×width×height)/mm×mm×mm	1 800×1 200×1 200
整机质量 Weight of machine/kg	210
作业幅宽 Working width/mm	650~800
扦插株距 Transplanting spacing/mm	180~300
扦插深度 Transplanting depth/mm	40~100
作业速度 Working speed/(km·h ⁻¹)	0.6~0.75

2 关键部件设计

2.1 薯苗栽植单元

2.1.1 植苗装置

植苗装置采用指夹模拟人手进行薯苗扦插, 是实现船底形插的关键, 由植苗杆件及夹苗组件构成 (图 3), 其中植苗杆件由机架、曲柄、连杆、摇杆等组成, 夹苗组件由驱动凸轮、夹指、导轨等组成, 并通过旋转轴和支架安装在连杆上, 从而随连杆运动。植苗装置作业时, 通过曲柄逆时针旋转, 带动连杆及其上夹苗组件沿船底形栽苗轨迹运动入土, 夹苗组件在经过最近点 R 时, 夹指 I 和夹指 II 在驱动凸轮作用下闭合取苗, 随后运移经过 H 、 M 、 N 等点。在经过 N 点时, 夹指张开放苗, 随后继续运移经过 Q 点出土。其中夹指 I 和夹指 II 可绕安装在支架上的旋转轴转动, 实现剪刀式开合。当两夹指与驱动凸轮高点配合时指夹张嘴, 与凸轮机构低点配合时指夹闭合。同时, 指夹开合过程有导轨和弹簧约束, 保证其在垂直于连杆方向上的稳定运动, 不发生空间上的偏移。



1.机架 2.摇杆 3.连杆 4.曲柄 5.夹苗组件 6.导轨 7.弹簧 8.夹指 I 9.薯苗 10.栽插轨迹 11.垄体 12.驱动凸轮 13.支架 14.夹指 II
1.Frame 2.Rocker 3.Connecting rod 4.Crank 5.Seedling clamping component 6.Guide rail 7.Spring 8.Finger I 9.Sweet potato seedlings 10.Transplanting trajectory 11.Ridge 12.Drive cam 13.Support frame 14.Finger II
注: P 、 R 分别为指夹扦插轨迹最高点和最近点。

Note: P and R are the highest point and closest point of the trajectory.

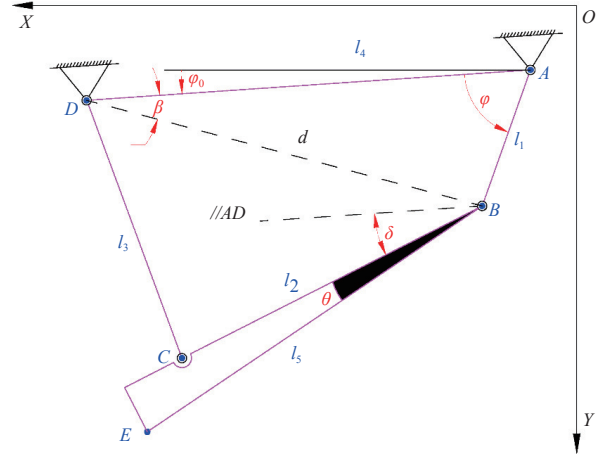
图 3 植苗装置结构及工作原理示意图

Fig.3 Structure and working principle diagram of planting mechanism

构建与甘薯膜上船底形插农艺相同的坐标系 XOY 如图 4 所示。根据解析法^[35], 确定连杆上 E 点运动轨迹即植苗轨迹 $E(x, y)$ 为

$$\begin{cases} E_x = x_A + l_1 \cos(\varphi_0 + \varphi) + l_5 \cos(\theta + \varphi_0 + \delta), \varphi \in [0, 2\pi) \\ E_y = y_A + l_1 \sin(\varphi_0 + \varphi) + l_5 \sin(\theta + \varphi_0 + \delta), \varphi \in [0, 2\pi) \\ \delta = \arccos \frac{l_2^2 + d^2 - l_3^2}{2l_2d} - \beta \\ \beta = \arcsin \frac{l_1 \sin \varphi}{d} \\ d = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_A 为点 A 横坐标, mm; y_A 为点 A 纵坐标, mm。 A 点与坐标系 O 点重合, 则 $x_A=0$, $y_A=0$ 。



注: A 为曲柄旋转中心; B 为曲柄与连杆铰接点; C 为连杆与摇杆铰接点; D 为摇杆与机架铰接点; E 为指夹夹持点; l_1 为曲柄长度, mm; l_2 为连杆长度, mm; l_3 为摇杆长度, mm; l_4 为机架长度, mm; l_5 为 $|BE|$ 长度, mm; θ 为连杆 BC 与 BE 夹角, $(^\circ)$; φ_0 为机架 AD 与 X 轴方向夹角, $(^\circ)$; φ 为曲柄转角, $(^\circ)$; δ 为 BC 与 AD 夹角, $(^\circ)$; β 为 BD 与 AD 夹角, $(^\circ)$ 。

Note: A is the rotation center of the crank; B is the hinge point between the crank and connecting rod; C is the hinge point between the connecting rod and the rocker; D is the hinge point between the rocker and the frame; E is the clamping point of the upper finger; l_1 is the length of the crank, mm; l_2 is the length of the connecting rod, mm; l_3 is the length of rocker, mm; l_4 is the length of the frame, mm; l_5 is the length of $|BE|$, mm; θ is the angle between the connection rods BC and BE , $(^\circ)$; φ_0 is the angle between the frame AD and X -axis direction, $(^\circ)$; φ is the crank angle, $(^\circ)$; δ is the angle between BC and AD , $(^\circ)$; β is the angle between BD and AD , $(^\circ)$.

图 4 植苗装置机构简图

Fig.4 Schematic diagram of planting mechanism

由于夹指在导轨上平行于连杆 BC 运动, 则 $\theta=0^\circ$ 。假定曲柄长度 l_1 已知, 则决策变量为 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 和 φ_0 , 根据曲柄摇杆成立条件^[35] 可得约束条件如下:

$$\begin{cases} g_1(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = l_1 + l_4 - l_2 - l_3 \leq 0 \\ g_2(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = l_1 + l_2 - l_3 - l_4 \leq 0 \\ g_3(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = l_1 + l_3 - l_2 - l_4 \leq 0 \\ g_4(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = 40^\circ - \arccos \frac{l_1^2 + l_3^2 - (l_4 - l_1)^2}{2l_2l_3} \leq 0 \\ g_5(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = \arccos \frac{l_1^2 + l_3^2 - (l_4 + l_1)^2}{2l_2l_3} - 140^\circ \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

植苗装置进行船底形插时, 夹苗指轨迹 $E(x, y)$ 应形成不重合的回路, 以防止因机构扰动而影响已放置薯苗的位姿; 轨迹 $E(x, y)$ 不能过扁, 即纵向高度 $|y_M - y_P|$ 与横向长度 $|x_N - x_R|$ 相差不能过大, 以同时满足扦插入土深度与取苗扦插位置; 植苗夹指关联尺寸 l_5 不宜过长; 具有船形弧线。基于此, 以四连杆机构分析图谱^[36] 为基础,

初步选定满足上述要求的 $l_1:l_2:l_3:l_4:l_5$ 为 1:2.0:2.0:2.5:3.5 等多组轨迹, 并对各比例取并集 (式 (4)), 在此并集内求解可实现膜下船底形扦插姿态的最优解。

$$l_1:l_2:l_3:l_4:l_5=1:(2.0\sim2.5):(1.5\sim4.0): \\ (2.5\sim4.5):(2.0\sim4.0) \quad (4)$$

曲柄长度 $l_1=100$ mm, 为寻求满足扦插农艺需求的较优解, 根据式 (2), 可得扦插轨迹 $E(x, y)$ 关于曲柄旋转角度 φ 的一阶导数为

$$\begin{cases} \dot{E}_x = l_5 \left[\frac{l_1 l_4 \sin \varphi}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{4d^2 l_2^2}}} - \frac{l_1 l_4 e \sin \varphi}{2d^3 l_2} + \frac{l_1 \cos \varphi}{d} - \frac{l_1^2 l_4 \sin^2 \varphi}{d^3} \right] \\ \quad \cdot \sin \left(\theta + \arccos \left(\frac{e}{2dl_2} \right) - \arcsin \left(\frac{l_1 \sin \varphi}{d} \right) \right) - l_1 \sin \varphi \\ \dot{E}_y = l_1 \cos \varphi + l_5 \cos \left(\theta + \arccos \left(\frac{e}{2dl_2} \right) - \arcsin \left(\frac{l_1 \sin \varphi}{d} \right) \right) \\ \quad \cdot \left[-\frac{l_1 l_4 \sin \varphi}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{4d^2 l_2^2}}} - \frac{l_1 l_4 e \sin \varphi}{2d^3 l_2} - \frac{l_1 \cos \varphi}{d} + \frac{l_1^2 l_4 \sin^2 \varphi}{d^3} \right] \\ e = l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos \varphi = l_2^2 - l_3^2 + d^2 \end{cases} \quad (5)$$

取苗点为指夹扦插轨迹最近点 R , 否则植苗装置与供苗装置发生干涉, 且在入土前完成取苗, 则植苗装置夹苗组件长度应大于连杆, 摇杆铰接点 C 轨迹不能触地, 约束条件如下:

$$\begin{cases} g_6(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = x_R - x_H < 0 \\ g_7(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = l_5 - l_2 > h \\ g_8(l_2, l_3, l_4, l_5, \varphi_0) = l_4 \sin \varphi_0 + l_3 - y_M - h < 0 \\ x_R = x_{\min}(E(x, y)) \\ y_M = y_{\max}(E(x, y)) \end{cases} \quad (6)$$

根据式 (5), 当植苗轨迹横坐标 E_x 导数为 0 时, 可得扦插最远点 N 、扦插最近点 R 的坐标及极坐标参数。当植苗轨迹纵坐标 E_y 导数为 0 时, 可得扦插最上点 P 、扦插最深点 M 的坐标及极坐标参数。已知 y_M 后, 结合农艺需求的栽插深度 h , 可得扦插入土点 H 、出土点 Q 的坐标及极坐标参数。

根据四连杆图谱轨迹, 确定杆件 $l_2 \sim l_5$ 的求解区间, 结合曲柄摇杆基本条件 (式 (3)) 和实际工作要求 (式 (6)), 根据农艺指标, 进行决策变量求解。求得植苗装置结构参数对静轨迹的影响规律如图 5 所示。由图 5 分析可知, l_2 影响扦插轨迹的整体形状, l_4 影响扦插轨迹包围区域, 并与扦插姿态和穴口长度直接相关, l_3 和 l_5 也对扦插轨迹存在一定影响。

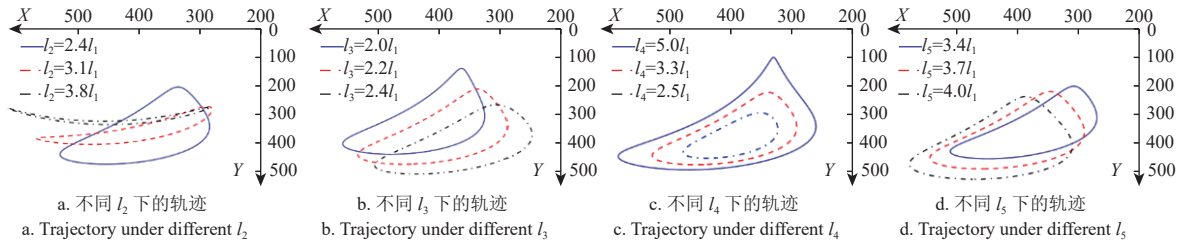


图 5 结构参数对扦插轨迹的影响

Fig.5 Effects of structural parameters on transplanting trajectory

针对扦插形态指标的重要性, 确定本试验权重分配集 $P_i=[0.1 \ 0.45 \ 0.35 \ 0.1]$, 即栽深 h 、膜下薯苗长度 Z_1 、扦插夹角 η 、穴口尺寸 Z_2 的权重分别为 0.1、0.45、0.35、0.1。通过建立指标隶属度模型 (式 (7)), 构成模糊关系矩阵 R_r (式 (8))。由模糊矩阵 R_r 与权重 P 确定模糊综合评价值 W (式 (9))。

$$r_{ij} = \frac{Y_{ij} - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}, i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$R_r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & \dots \\ r_{21} & r_{22} & \dots & \dots \\ r_{31} & r_{32} & \dots & \dots \\ r_{41} & r_{42} & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$W = P \cdot R_r \quad (9)$$

式中 r_{ij} 为指标 Y_i 第 j 个决策变量解对应的指标值获得的隶属度值; Y_{ij} 为指标 Y_i 第 j 个决策变量解对应的指标值; $Y_{\max}$ 为指标 Y_i 的最优值; $Y_{\min}$ 为指标 Y_i 的最差值。

最终根据模糊综合评价得分 W , 确定各杆长度为 $l_2=2.0 l_1$, $l_3=2.0 l_1$, $l_4=2.5 l_1$, $l_5=2.75 l_1$, $\varphi_0=0^\circ$ 。此时,

薯苗栽植后与地面夹角 η 为 55° , 栽植深度 $h=65$ mm, 膜下薯苗长度 $Z_1=195$ mm, 穴口长度 $Z_2=80$ mm, 满足北方膜上船底形插的农艺需求。

2.1.2 薯苗栽植单元送苗机构

植苗装置曲柄旋转中心 A 与坐标系 O 点重合, 则在薯苗栽植单元中坐标系 XOY 如图 6 所示。由于 $\varphi_0=0^\circ$, 则 X 轴平行机架 AD 且与机具前行方向相反。薯苗栽植单元由植苗装置和送苗装置组成, 通过并联传动系统相互配合, 实现薯苗膜上扦插。送苗装置由摆苗板、夹苗刷、送苗支架、传动装置等组成, 为实现植苗装置可靠夹持薯苗, 送苗装置应在 R 点处为植苗装置供苗, 植苗装置每运动 1 圈, 送苗装置刚好在供苗点供苗 1 株。

送苗装置与植苗装置的相对位置是保证在 R 点供苗的前提, 夹苗刷夹持苗株后, 应满足以下关系:

$$\begin{cases} h_1 = y_R \\ h_2 = x_R - l_d \end{cases} \quad (10)$$

为保证夹苗指与送苗装置不干涉, 则有

$$l_d \geq l_z/2 \quad (11)$$

式中 l_z 为植苗装置夹指宽度, mm。

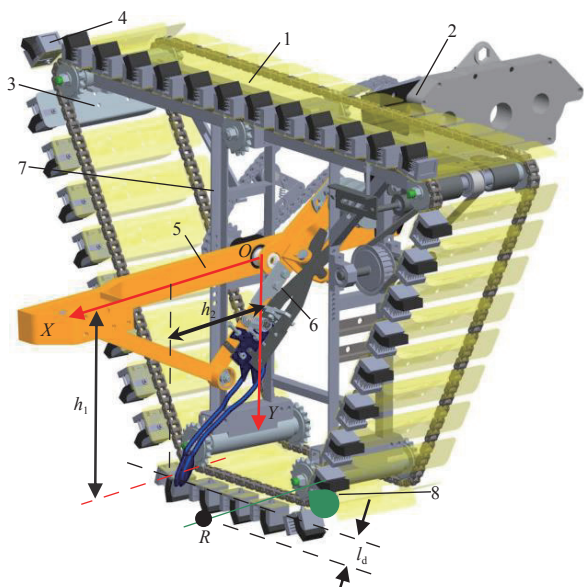
且为保证薯苗与指夹的接触,薯苗摆放后,其伸出板刷尾部的长度应满足:

$$X_L \geq l_d + l_z/2 \quad (12)$$

式中 X_L 为薯苗摆放后其伸出板刷尾部的长度, mm。且 $|l_d - l_z/2|$ 越小,夹苗越靠近根部,越容易成功。因此,根据连杆参数设计,最终确定 $l_d = l_z/2 = 10$ mm, $h_1 = 267$ mm, $h_2 = 141$ mm, $X_L \geq 20$ mm。

假设植苗装置转速为 n_1 (r/min),送苗装置转速为 n_2 (r/min),夹苗刷安装间距为 Z_1 个链齿节距,送苗装置所用链轮齿数为 Z_2 ,要求植苗装置每运动一圈,刚好下一夹苗刷到达 R 点为植苗装置供苗,则有:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (13)$$



1.送苗装置 2.并联传动系统 3.摆苗板 4.夹苗刷 5.机架 6.植苗装置 7.送苗支架 8.薯苗

1.Seedling delivery device 2.Parallel transmission system 3.Seedling placing plate 4.Seedling holding brush 5.Frame 6.Seedling planting device 7.Frame of the seedling delivery device 8.Sweet potato seedling

注: h_1 为夹苗刷放苗位置底部离植苗装置曲柄旋转中心的垂直距离, mm; h_2 为夹苗刷放苗后植苗装置持苗部位置距离曲柄旋转中心的水平距离, mm; l_d 为植苗装置运动轨迹离送苗装置的最近水平距离, mm。

Note: h_1 is the vertical distance from the bottom surface of the seedling holding brush to the center of the crank shaft, mm; h_2 is the horizontal distance from the outer surface of the seedling holding brush to the center of the crank shaft, mm; l_d is the nearest horizontal distance from the transplanting trajectory to the seedling delivery device, mm.

图6 薯苗栽植单元

Fig.6 Planting unit of sweet potato seedlings

2.2 并联传动系统

株距是甘薯种植的重要农艺参数,根据甘薯移栽农艺需求,对于鲜食薯和工业薯,移栽株距约为 18~30 cm 不等。自走式甘薯移栽机株距及行进速度为

$$d_z = \frac{\pi d_{\text{轮}}}{\Pi} = \frac{\pi d_{\text{轮}}}{n_1/n_{\text{地}}} \quad (14)$$

$$v = \pi d_{\text{轮}} n_{\text{地}} \quad (15)$$

式中 d_z 为移栽株距, m; $d_{\text{轮}}$ 为地轮直径, m; Π 为植苗装置曲柄转速 n_1 与地轮转速 $n_{\text{地}}$ 的比值; v 为机器前进速度, m/min。其中,根据机具底盘特性可知 $d_{\text{轮}} = 500$ mm,工作时机器前进速度 $v = 0.6 \sim 0.75$ km/h,可通过增加油门实现变速。当移栽株距为 18~30 cm 时, Π 为 5.2~8.7。

根据上述参数及 PVH1 蔬菜移栽机动力底盘传动特点设计并联传动系统如图 7 所示。其中动力经发动机到达第 I 级减速箱,并由此传给地轮,驱动其工作。随后传递给手动变速箱、横向减速箱,并传给左侧侧边齿轮箱传动系统、链传动 II、驱动植苗装置,同时传给万向传动轴、链传动 I 并驱动送苗装置。通过可调速齿轮箱调节,传动比变化范围为 5.5~7.8,移栽株距调节范围约为 20~28 cm。

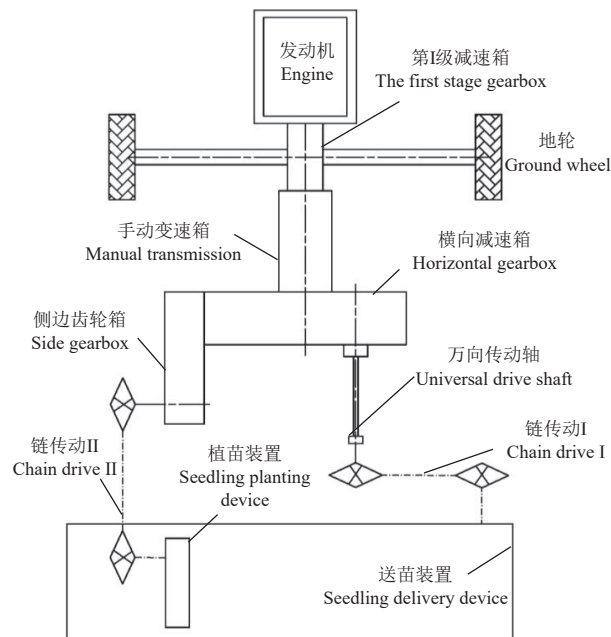
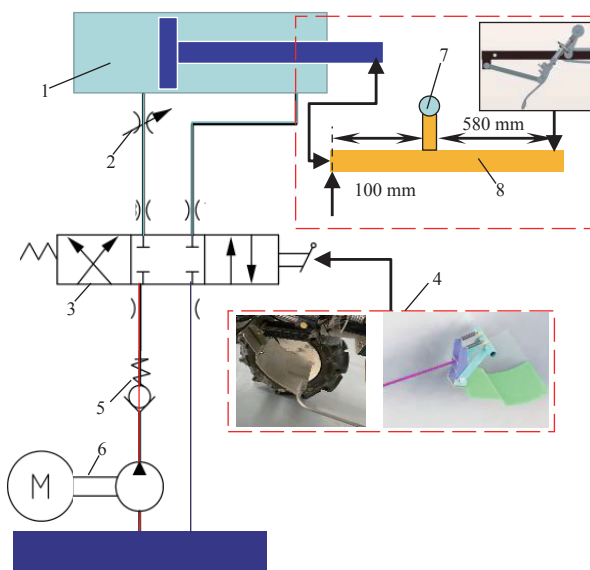


图7 并联传动系统

Fig.7 Parallel transmission system

2.3 垄面仿形系统

垄面仿形系统主要由液压缸、可调节流阀、液压控制阀、仿形装置、溢流阀、齿轮泵等组成(图 8)。



1.液压缸 2.可调节流阀 3.液压控制阀 4.仿形装置 5.溢流阀 6.齿轮泵 7.栽植单元铰接点 8.机架

1.Hydraulic cylinder 2.Adjustable flow valve 3.Hydraulic control valve 4.Profile apparatus 5.Relief valve 6.Gear pump 7.Hinge point of planting unit 8.Frame

图8 垄面仿形系统

Fig.8 Ridge surface profiling system

仿形装置位于薯苗栽植单元前方，作业时仿形装置与垄面实时紧密贴合。随着机具前行作业，丘陵山区垄面起伏，仿形装置随之高低变化，拉动液压控制阀阀芯操作杆，进而带动控制阀动作。薯苗栽植单元机架与底盘铰接，液压缸推杆与薯苗栽植单元分布在机架铰接点两侧。如图 8 所示，根据杠杆原理，系统液压缸随着控制阀动作实时伸缩，带动铰接点另一侧的薯苗栽植单元以 5.8 倍距离升降，实现仿形。

垄面仿形系统采用油泵马达总成式齿轮泵为液压系统动力源，型号为 VOITH-IPVP-3，为压力补偿控制式变量泵，在 1 500 r/min 额定转速下的流量为 7.8 L/min，系统额定工作压力为 33 MPa。

薯苗扦插时，在液压缸的作用下，薯苗栽植单元在垄面的上下运动由液压缸支撑，则有：

$$F_T = \frac{\pi}{4} D_T^2 P_1 \geq m_T g \quad (16)$$

式中 F_T 为液压缸推力，N； D_T 为活塞直径，mm； P_1 为液压缸最大液压压力，取 33 MPa； m_T 为栽植单体质量，kg； g 为重力加速度，取 9.8 N/kg。其中栽植单元质量为 55 kg，则仿形系统液压缸推力在 540 N 以上， $D_T \geq 4.6$ mm。结合系统压力，初步选定液压缸型号为 YUKEN Mini 型液压缸。

根据薯苗栽植单元关键参数与结构设计，仿形装置触地点与植苗装置最低点在 X 轴方向水平距离为 400 mm，自走底盘可实现的最大作业速度为 0.75 km/h，则液压缸必须在 1.92 s 内实现植苗装置到达垄面凸起或凹陷处。液压缸提升速度为

$$V_L = \frac{Q_L}{Z_L \pi [(D_T/2)^2 - (d_T/2)^2] \times 10^{-3}} \quad (17)$$

式中 V_L 为液压缸提升速度，m/min； Q_L 为液压缸额定流量，取 7.8 L/min； Z_L 为液压缸数量，取 1； d_T 为活塞杆直径，取 20 mm。取活塞直径 D_T 为 40 mm，计算得 V_L 为 8.3 m/min。根据扦插深度，假定仿形量为 100 mm，则液压缸对应仿形行程为 17.2 mm，提升时间为 0.12 s，满足仿形速度要求。

3 室内取苗试验

田间种植的薯苗品种不同，其形态特征各异。为验证薯苗栽植单元对不同薯苗的取苗效果，根据《甘薯机械化生产技术规范》(DB37/T 3 355-2018)，选用 5 种黄淮海地区常用的基部较直立的甘薯拔苗（长 25~35 cm）进行室内取苗试验。所选薯苗品种包括：济薯 26（即板栗薯）、龙薯 9 号、烟薯 25、普薯 32（即西瓜红）、紫薯新引 1 号（即紫罗兰）（图 9）。

室内取苗试验时，在 40~50 r/min 植苗速度下，给送苗装置供给上述 5 种薯苗，检验栽植单元植苗装置取苗成功率，每种薯苗分别连续供苗 300 株，取苗过程通过高速摄像系统（Photron FASTCAM MiniUX50 型）进行拍摄记录，拍摄速度为 250 帧/s。室内试验结果表明（表 2），在 40、50 r/min 植苗速度下，5 种薯苗的取苗成功率均不低于 99%，满足移栽需求。

同时，针对未被成功取到的苗株，通过调取高速录

像进行分析发现，基部薯苗叶片数较多，且苗株叶片较长时，植苗装置已成功夹取基部并沿船底形轨迹运移薯苗，但长叶片仍被夹苗刷夹持，导致薯苗叶片挂在夹苗刷上；薯苗筛选时未排查特别弯曲的植株个体，导致其基部偏离取苗点较远，不在夹指夹取范围内。综上可知，取苗效果与苗株特性有关，保证薯苗基部的直立度在夹指张开后的取苗范围内是取苗成功的关键。根据植苗装置参数及室内试验结果可得， R 点上下约 15 mm 以内，左右约 20 cm 以内时，指夹取苗成功率高。

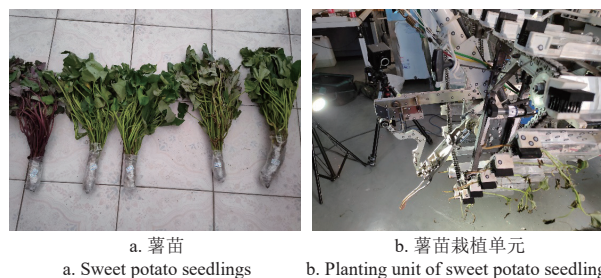


图 9 栽植单元室内取苗试验
Fig.9 Indoor test of sweet potato seedlings taking by using planting unit

表 2 室内取苗试验结果

Table 2 The results of indoor test of taking sweet potato seedlings

品种 Varieties	薯苗基部参数* Parameters of sweet potato seedling bases			取苗成功率 Seedling picking success rate/%	
	直立程度 Verticality level/mm	直径 Diameter/mm	叶片数 Number of leaves	40 r·min ⁻¹	50 r·min ⁻¹
济薯 26 Jishu26	8.1	4-5	3-4	100.0	99.7
龙薯 9 号 Longshu 9	10.3	3-4	3-4	100.0	100.0
烟薯 25 Yanshu 25	14.3	4-5	3-4	100.0	99.7
普薯 32 Pushu 32	13.6	4-5	3-4	100.0	100.0
紫罗兰 Zhiluolan	16.8	2-3	4-5	99.3	99.0

注：*薯苗基部是指薯苗从根部往上 8 cm 内的范围，直立程度则表示薯苗基部弯曲后宽度。

Note: *The base of the sweet potato seedlings is the range from the bottom to the upwards within 8 cm, and the verticality level indicates the width of the base of the sweet potato seedlings stem.

4 田间试验

4.1 试验条件

2022 年 5 月初，在山东省济宁市泗水县圣水峪镇进行丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机的田间试验（图 10）。试验根据《甘薯机械化生产技术规范》(DB37/T 3 355-2018) 和《旱地栽植机械》标准 (JB/T10291-2013)，采用长 280~320 mm，茎粗约 4 mm 的薯苗进行作业，作业品种为济薯 26（鲜食型甘薯品种）。

4.2 作业参数正交试验

4.2.1 试验方法

根据覆膜栽培实际需求和当地土壤肥力情况，设定扦插株距 24 cm，以作业速度 X_V 、薯苗基部特征 X_T 、薯苗伸出夹苗刷长度 X_L 为因子进行三因素三水平（表 3）田间移栽正交试验。



图 10 丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机田间试验

Fig.10 Field test of profiling transplanter for sweet potato in hilly and mountainous area

表 3 田间正交试验因素及水平

Table 3 Factors and levels of field orthogonal test

水平 Level	作业速度 Working velocity $X_V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	薯苗基部特征* Characteristics of sweet potato seedling bases X_T	薯苗伸出长度 Length of extended brush part X_L/mm
1	0.5	优	20
2	0.6	良	40
3	0.7	中	60

注：*薯苗基部直立度 $\leq 8\text{ mm}$ 为优， $8\text{ mm}<\text{直立度}\leq 12\text{ mm}$ 为良， $12\text{ mm}<\text{直立度}\leq 16\text{ mm}$ 为中。

Note: * the seedling base is optimal, good and moderate when the width of the seedling base within 8 cm from the root of the sweet potato seedling base is $\leq 8\text{ mm}$, $8\text{--}12\text{ mm}$, $12\text{--}16\text{ mm}$, respectively.

根据当地春薯种植初期保温及作物生长期抑制杂草生长的需求，选用 0.01 mm 黑膜进行覆膜，共 9 组试验。每组试验分别移栽 200 m，试验后每组选取 60 m 长度，测量种植成功的每穴薯苗平均长度 Y_1 、栽深合格率 Y_2 和漏苗率 Y_3 。移栽一周后，待薯苗生根，以垄面为基准线，剖开土壤纵截面，测量甘薯的种植深度，并以薯苗与垄面交汇点为基点，扯出薯苗，测量膜下薯苗长度等参数。统计漏苗率、株距变异系数、栽深合格率等移栽质量评价指标，计算方法如下：

$$Y_1 = \frac{\sum_{k=1}^n L_k}{n_k} \quad (18)$$

$$Y_2 = \frac{N_h}{n} \times 100\% \quad (19)$$

$$Y_3 = \frac{N_{LZ}}{N'} \times 100\% \quad (20)$$

式中 L_k 为膜下薯苗长度，mm； n_k 为扦插成功的薯苗株数； N_h 为栽植深度合格的薯苗总株数； n 为测定的总株数； N_{LZ} 为漏栽薯苗株数； N' 为测试长度内的理论扦插株数。

4.2.2 作业参数试验结果及分析

丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机膜上扦插正交试验田间试验结果见表 4。分析可知，平均膜下薯苗长度 Y_1 为 216.9 mm，平均栽深合格率 Y_2 为 97.3%，平均漏苗率 Y_3 为 4.1%，满足薯苗膜下浅栽、多埋节的农艺需求。

对田间试验结果进行多因素方差分析（表 5），结果表明，各因素对膜下薯苗平均长度 Y_1 的影响大小顺序

为薯苗伸出长度 X_L 、作业速度 X_V 、薯苗基部形态 X_T ，对栽深合格率 Y_2 的影响大小顺序为薯苗伸出长度 X_L 、作业速度 X_V 和薯苗基部形态 X_T ，对漏苗率 Y_3 的影响大小顺序为作业速度 X_V 、薯苗基部形态 X_T 、薯苗伸出长度 X_L 。其中，作业速度和基部特征对漏苗率影响显著，这主要是因为薯苗基部形态直接影响了薯苗夹持段是否经过取苗点，同时作业速度过快，会影响人工摆苗质量，使得薯苗不在夹指取苗范围内。同时，薯苗伸出长度对膜下薯苗长度影响显著，这主要是因为薯苗伸出长度多，则夹指取苗入土后，多伸出的薯苗全部入土，且薯苗伸出长度三个水平皆大于等于设计值，因此膜下薯苗长度在不同水平下大于等于理论设计值。

表 4 田间试验方案与结果

Table 4 Field test scheme and results

试验序号 Test No.	X_V	X_T	X_L	膜下薯苗长度 Length of seedlings under film/mm	栽深合格率 Transplanting depth qualified rate/%	漏苗率 Leakage rate /%
1	1	1	1	196.2	96.7	0.20
2	1	2	2	214.5	97.2	0.10
3	1	3	3	235.6	96.3	4.85
4	2	1	2	218.1	98.4	0.90
5	2	2	3	232.6	98.5	2.70
6	2	3	1	200.1	96.9	6.40
7	3	1	3	237.5	97.6	4.00
8	3	2	1	198.6	95.9	8.00
9	3	3	3	219.2	98.1	10.00

表 5 多因素方差分析结果

Table 5 Results of multivariate analysis of variance

源 Source	指标 Index	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	P
X_V	Y_1	13.500	13.500	0.149
	Y_2	0.327	0.327	0.554
	Y_3	47.320	47.320	0.005
X_T	Y_1	1.602	1.602	0.572
	Y_2	0.327	0.327	0.554
	Y_3	43.470	43.470	0.006
X_L	Y_1	2 046.607	1 023.303	0.000
	Y_2	3.082	1.541	0.254
	Y_3	2.507	1.254	0.497

注： $P<0.05$ 表示影响显著， $P\geq 0.05$ 表示影响不显著。
Note: $P<0.05$ means the effect is significant, and $P\geq 0.05$ means the effect is non-significant.

4.2.3 最优作业参数求解

为分析作业速度、薯苗基部特征和伸出长度对丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机膜上扦插作业质量的综合影响效果，应用模糊综合评价法对正交试验结果进行优化求解（式（9）），找出最佳参数组合。根据田间试验栽植性能指标的重要性，确定本试验权重分配集 $P_2=[0.30\ 0.15\ 0.55]$ ，即每穴薯苗平均埋节数 Y_1 、栽深合格率 Y_2 和漏苗率 Y_3 的权重分别为 0.35、0.15、0.5。由模糊矩阵（式（7）～（8））与权重分配集 P_2 确定模糊综合评价，评价结果见表 6。

将各因素按综合评分进行极差分析，求得作业速度 X_V 、薯苗基部特征 X_T 、薯苗伸出夹苗刷长度 X_L 等因子在权重 P_2 下的不同水平下的试验结果综合得分总值及各因素对综合得分影响优劣的极差值，分析结果表明（见表 7）。影响薯苗栽植指标综合评分的主次因素为：薯苗伸出夹苗刷长度 X_L 、薯苗基部特征 X_T 、作业速度 X_V ，最优工作参数组合为作业速度 X_V 为水平 S、薯苗基部特

征 X_T 为水平 S 、薯苗伸出夹苗刷长度 X_L 为水平 U 时，即作业速度 0.5 km/h ，薯苗基部形态优，薯苗伸出长度 60 mm 时，作业漏苗率、株距稳定性及栽深合格率等移栽质量较好。

表 6 模糊综合评价结果
Table 6 Results of fuzzy comprehensive evaluation

试验号 Test No.	指标隶属度值 Indicator value r_{ij}			综合评分 Composite score W
	Y_1	Y_2	Y_3	
1	0	0.05	0.53	0.58
2	0.13	0.08	0.54	0.75
3	0.29	0.02	0.28	0.59
4	0.16	0.14	0.50	0.80
5	0.26	0.15	0.40	0.81
6	0.03	0.06	0.20	0.28
7	0.30	0.10	0.33	0.72
8	0.02	0	0.11	0.13
9	0.17	0.13	0	0.29

表 7 模糊综合评价结果极差分析
Table 7 Range analysis of fuzzy comprehensive evaluation results

水平 Level	X_V	X_T	X_L
1	1.92	2.10	0.38
2	1.89	1.69	0.88
3	1.15	1.17	2.17
极差 Range	0.26	0.31	0.60

4.3 扦插结果验证

在最佳参数组合下进行田间验证试验。连续作业 $1\,333\text{ m}^2$ ，随机选取 3 段 60 m 长度，如图 11 所示，测量薯苗扦插深度、膜下薯苗长度、破膜穴口长度、薯苗扦插角和漏苗率。



图 11 扦插结果检测
Fig.11 Detection of transplanting results

最终测量结果表明，平均薯苗扦插深度为 73.6 mm ，膜下薯苗平均长度为 205.4 mm ，平均穴口长度为 76.5 mm ，薯苗栽植后与地面平均夹角为 53.8° ，满足北方膜上船底形插的农艺需求，且与理论设计值相近。同时，扦插株距变异系数为 8.9% ，栽深合格率为 93.7% ，漏苗率为 3.5% ，扦插效果好。

5 结 论

1) 针对北方薯区丘陵山地甘薯膜上机械化移栽这一产业难题，设计了丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机，重点研究了薯苗栽植单元、并联传动系统、垄面仿形系统等关键部件参数：以栽深、膜下薯苗长度、扦插夹角、穴口尺寸的最优综合得分为目标，确定各杆长度关系为 $1:2.0:2.0:2.5:2.75$ ；根据空间配合需求，确定了送苗装置与植苗装置的相对位置和传动参数；根据农艺株距需求和底盘特征，确定传动比为 $5.2\sim 8.7$ 。

2) 对丘陵山地仿形扦插甘薯移栽机薯苗栽植单元进行室内取苗试验，结果表明在 $40\sim 50\text{ r/min}$ 植苗速度下，栽植单元对黄淮海地区常用薯苗品种取苗效果较好，取苗成功率皆在 99% 以上，满足田间作业需求。

3) 以作业速度、薯苗基部形态、薯苗伸出板刷长度为影响因素，薯苗平均埋节数 Y_1 、栽深合格率 Y_2 和漏苗率 Y_3 为指标，进行田间移栽正交试验，结果表明，影响薯苗栽植指标综合评分的主次因素为：薯苗伸出夹苗刷长度、薯苗基部特征、作业速度，最优参数组合为作业速度 0.5 km/h ，薯苗基部形态优，薯苗伸出长度 60 mm 。验证试验结果表明，最优参数组合下，平均薯苗扦插深度为 73.6 mm ，膜下薯苗平均长度为 205.4 mm ，平均穴口长度为 76.5 mm ，薯苗栽植后与地面平均夹角为 53.8° ，扦插株距变异系数为 8.9% ，栽深合格率为 93.7% ，漏苗率为 3.5% ，扦插效果良好，满足北方膜上船底形插的农艺需求。

[参 考 文 献]

[1] Food and Agriculture Organizaition of the United Nations (FAO). State of Food and Agriculture 2019 Report [EB/OL], 2019-10-15, <http://www.fao.org/statistics/zh/>.

[2] 胡良龙, 计福来, 王冰, 等. 国内甘薯机械移栽技术发展动态[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 289-291,317. HU Lianglong, JI Fulai, WANG Bing, et al. Latest developments of sweet potato mechanical transplanting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 289-291,317. (in Chinese with English abstract)

[3] 宋晓东, 杨琳. 7 亿亩农田受困“微农机”短缺[J]. 半月谈, 2022, 6: 65-67.

[4] 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 sweetpotato roots affected by environment factors and agronomic measures[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2017, 35(2): 11-22. (in Chinese with English abstract)

[5] 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.

[6] CHUEYEN H V, EUN J B. Nutritional Quality of Foods: Sweet Potato[M]. New York: Springer Science, 2013: 247-256.

[7] 宋安东, 裴广庆, 王风芹, 等. 中国燃料乙醇生产用原料的多元化探索[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 302-307. SONG Andong, PEI Guangqing, WANG Fengqin, et al. Exploration on the diversified materials for fuel ethanol production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 302-307. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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(6): 20-25.
HU Lianglong, HU Zhichao, XIE Yizhi, et al. Study on the route of mechanization of sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) production technology in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 6(6): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. 农机装备发展行动方案《2016-2025》发布 [EB/OL]. 2016-12-23, https://www.gov.cn/xinwen/2016-12/23/content_5152119.htm.
- [10] 康建明, 向阳, 张春艳, 等. 气吸滚筒式花生穴播器播种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 1-11.
KANG Jianming, XIANG Yang, ZHANG Chunyan, et al. Analysis and experiments of the seed feeding performance of air-suction roller dibbler for peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(14): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [11] 苑严伟, 白圣贺, 牛康, 等. 棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 1-11.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙伟, 刘小龙, 王虎存, 等. 双曲柄多杆式马铃薯膜上打孔种植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 34-42.
SUN Wei, LIU Xiaolong, WANG Hucun, et al. Design and test of double crank multi-rod hill-drop potato planter on plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘军干, 王天辰, 阎发旭, 等. 直插式覆膜小麦穴播机的设计[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 55-58.
LIU Jungan, WANG Tianchen, YAN Faxu, et al. Design of Film-mulching wheat hill seeder with vertical dropping mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(5): 55-58. (in Chinese with English abstract)
- [14] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 32-38.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [15] FORIGO. Forigo agricultural machines[EB/OL]. 2014-10-23, <https://www.forigo.it/>.
- [16] 侯守印, 王升哲, 竹筱歆, 等. 纤维基膜侧开式滑切破膜播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 155-165.
HOU Shouyin, WANG Shengzhe, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of side-open sliding cutting film broken seeding unit based on straw fiber film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 155-165. (in Chinese with English abstract)
- [17] JI J, JIN X, DU X, et al. Motion trajectory analysis and performance test of up-film punch transplanting mechanism[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(2): 30-38.
- [18] 许春林, 吕志军, 辛亮, 等. 步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 90-96.
XU Chunlin, LV Zhijun, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of walk-type potted rice seedling transplanting mechanism on film perforating part[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [19] LIU J, CAO W, TIAN D, et al. Kinematic analysis and experiment of planetary five-bar planting mechanism for zero-speed transplanting on mulch film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 84-87.
- [20] 金鑫, 杜新武, 杨传华, 等. 移栽机曲柄滑槽式栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 83-90.
JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on crank-chute planting mechanism of transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 83-90.
- [21] YANG Q, ZHANG R, JIA C, et al. Study of dynamic hole forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2022, 8: 896881.
- [22] 胡飞, 郭栋, 陈彩蓉, 等. 复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 62-69.
HU Fei, GUO Dong, CHEN Cairong, et al. Design and experiment on compound crank rocker double-row planting device of vegetable plug seedling up-film transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 62-69. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩长杰, 徐阳, 尤佳, 等. 半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机成穴器参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 48-56.
HAN Changjie, XU Yang, YOU Jia, et al. Parameter optimization of opener of semi-automatic transplanter for watermelon seedlings raised on compression substrate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 48-56. (in Chinese with English abstract)
- [24] 盛家廉, 袁宝忠. 甘薯栽培技术 [M]. 北京: 农业出版社, 1978.
- [25] HERGERT G B, HESLOP L C, COMOTON B A, et al. Status of Mechanization Technology for Tomato Transplanting [M]. Ottawa: Agriculture Canada, 1987: 1-7.
- [26] BOOTS W S, ALTMAN J C. Seedling transplanter: US4290373[P]. 1981-09-22.
- [27] MURRAY M D. Transplanter machine: US2831442 A[P]. 1958-04-22.
- [28] 胡良龙, 王冰, 王公仆, 等. 2ZGF-2 型甘薯复式栽植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 8-16.
HU Lianglong, WANG Bing, WANG Gongpu, et al. Design and experiment of type 2ZGF-2 duplex sweet potato transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(10): 8-16. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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, LV Zhaoqin. Design of transplanting machine for nude seedling with belt[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(6): 120-123,161. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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.
- [31] 村并昌实, 太久保嘉彦, 山根畅宏, 等. 苗移植机: CN201310573188.4[P]. 2014-08-20.
- [32] LIU Z, LV Z, ZHENG W, et al. Trajectory control of two-degree-of-freedom sweet potato transplanting robot arm[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 26294-26306.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 魏文军, 高英武, 张云文, 等. 机械原理 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005.
- [36] HRONES J A, NELSON G L. 四连杆机构分析图谱 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1966.

Development of the profiling up-film transplanter for sweet potato in hilly and mountainous region

LI Hui¹, HE Tengfei¹, LIU Hu¹, SHI Song^{1,2}, ZHOU Jilei¹, LIU Xuechuan¹, WANG Baoqing^{3*}

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China; 2. Huang Huai Hai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China; 3. Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100, China)

Abstract: Sweet potato is one of the most favorite crops that is widely cultivated from the tropical to temperate regions. There is an ever-increasing need to produce more sweet potatoes on the existing arable land under the challenges of labor scarcity and population growth. However, it is still lacking the optimal machinery to transplant the spring sweet potato seedlings on mulched ridge planting system, especially in the hilly and mountainous region of northern China. In this study, a profiling transplanter was designed for the "shallow planting and multiple buried joints" of sweet potato seedlings, according to the agronomic requirements of "shallow cultivation and multiple burying nodes". The boat-bottom planting placement of mulch raised the beds' cultivation system of sweet potatoes. The space-time coordination and working parameters of the transplanting unit were optimized to consider the transplanting angle, transplanting depth, seedling length under the film and hole length. Indoor and outdoor tests were also carried out to verify the model. The indoor seedling-taking tests showed that the planting unit posed the super seedling taking effect on the five sweet potato varieties, which were widely planted in Huang-Huai-Hai area. More narrowly, the seedling picking success rates of the planting unit were more than 99% under the rotating speeds of 40-50 r/min, which fully met the needs of field operation. Furthermore, the orthogonal experiment of field transplanting was carried out in the field, in which the influencing factors were taken as the operation speed, the shape of sweet potato seedlings base, the length of seedlings extending out of the brush, and the average number of buried nodes, the qualified rate of transplanting depth, and the missing rate determined as the evaluation indexes. The field experiment showed that the influence factor on the average number of buried nodes was ranked in the descending order of the length of seedlings extending out of the brush, the operation speed, and the shape of the sweet potato seedlings base. By contrast, the influence factor on the qualified rate of transplanting depth was the length of seedlings extending out of the brush, the shape of the sweet potato seedlings base, and the operation speed. The influencing factors on the missing seedling rate were the operation speed, the shape of sweet potato seedlings base, and the length of seedlings extending out of the brush. The operating parameters were optimized using fuzzy evaluation and range analysis. As such, each factor on the comprehensive score of field experiment performances was ranked in the descending order of the length of seedlings extending out of the brush, the shape of the sweet potato seedlings base, and operation speed. The optimal combination of parameters was as follows: the operation speed of 0.5 km/h, the most upright sweet potato seedlings base, and the extension length of sweet potato seedlings of 60 mm. Finally, the transplanting efficacy of the sweet potato seedlings profiling transplanter was evaluated under the optimal operation parameters in the hilly and mountainous regions. The results showed that the average transplanting depth, the transplanted seedling length under the film, the hole length, and the transplanting angle were 73.6, 205.4, 76.5 mm and 53.8°, respectively. Meanwhile, the transplanting space variation coefficient, the qualified rate of planting depth, and the rate of missing seedlings were 8.9%, 93.7%, and 3.5%, respectively. The performance fully met the agronomic requirements of "shallow cultivation and multiple burying nodes" for the boat-bottom planting placement and the regulations of transplanting quality on dry land transplanting equipment. This finding is of considerable importance to developing the transplanting machine for planting spring sweet potato seedlings on mulched ridge planting systems in the hilly and mountainous regions of northern China, as well as for sustainable development of the sweet potato industry.

Keywords: agricultural machinery; profiling; sweet potato; hilly and mountains region; transplanting on mulched ridge