

非圆齿轮-连杆组合式水稻钵苗膜上移栽机构 优化设计与试验

辛亮 王明成 张浩 孙国玉 王航 庄智圆

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为实现机械化一体式水稻钵苗膜上移栽要求,提出非圆齿轮-连杆组合式行星轮系移栽机构,用一套机构实现取苗、送苗、破膜挖穴和栽植4个工序协同配合作业,满足水稻钵苗膜上移栽所需的轨迹与姿态要求。对移栽机构进行理论分析并建立运动学模型,结合优化目标,基于 Matlab GUI 平台开发了数字可视化优化设计软件,通过人机交互获得1组满足移栽要求的机构参数。根据优化参数对机构开展结构设计与三维建模,通过 ADAMS 软件完成了虚拟样机仿真验证。研制了水稻钵苗膜上移栽机构物理样机与多功能试验测试台架,开展了移栽机构在空转和带苗状态下运动学特性和工作性能试验,结果表明,理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹和物理样机台架试验轨迹在误差允许范围内保持一致,验证了移栽机构设计的一致性与正确性,性能试验结果:取苗成功率为94%,移栽成功率为92.36%,栽植株距变异系数为2.67%,满足移栽作业要求,验证了水稻钵苗膜上移栽机构设计的合理性与可行性。

关键词: 水稻钵苗膜上移栽; 齿轮-连杆组合机构; 非圆行星轮系; 优化设计

中图分类号: S223.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0063-08

OSID:



Optimization Design and Experiment of Non-circular Gear – Linkage Combination Type Transplanting Mechanism of Rice Pot Seedling on Film

XIN Liang WANG Mingcheng ZHANG Hao SUN Guoyu WANG Hang ZHUANG Zhiyuan

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To achieve the mechanized integrated transplanting requirement of rice pot seedlings on film, a non-circular gear – linkage combined planetary gear system transplanting mechanism was proposed. This mechanism enabled a single set of components to achieve the coordinated operation of four processes: seedling picking, seedling delivery, film perforation and digging, and planting meeting the trajectory and attitude requirements of rice pot seedling transplanting on film. The transplanting mechanism was theoretically analyzed, and a kinematic model was established. Combining optimization objectives, a digital visualization optimization design software for the mechanism was developed based on the Matlab GUI platform, resulting in a set of mechanism parameters that met the transplanting requirements through human-computer interaction. Based on the optimized parameters, a comprehensive structural design of the mechanism was conducted, and a 3D model was established. Virtual prototype simulation was performed by using ADAMS software. A physical prototype of the rice pot seedling transplanting mechanism on film and a multifunctional test bench were developed. The kinematic characteristics and performance of the transplanting mechanism under idle and seedling-carrying states were studied. The results showed that the theoretical trajectory, virtual prototype simulation trajectory, and physical prototype test bench trajectory remained consistent within an acceptable error range, validating the consistency and correctness of the design of the transplanting mechanism. The performance test showed a seedling extraction success rate of 94%, a transplanting success rate of 92.36%, and a coefficient of variation of planting spacing of 2.67%, meeting the requirements of transplanting operation. This validated the rationality and feasibility of the design of the rice pot seedling transplanting mechanism on film.

Key words: rice pot seedling transplanting on film; gear – linkage combined mechanism; non-circular planetary wheel system; optimization design

收稿日期: 2024-05-28 修回日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105247)、黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2023E001)、中央支持地方高校改革发展资金优秀青年项目和东北农业大学“学术骨干”基金项目

作者简介: 辛亮(1989—),男,副教授,博士,主要从事移栽机械优化设计研究,E-mail: xinliang@neau.edu.cn

0 引言

水稻是我国主要粮食作物,对保障粮食安全起到举足轻重的作用。近些年我国为优化水稻种植技术、提高优质水稻单产水平、提质增效发展,提出了水稻钵苗膜上移栽农艺技术。该技术是将带独立营养钵土的水稻秧苗无损移栽于覆膜田中,充分利用水稻钵苗移栽不伤根、无缓苗期、低节分蘖,可大幅度提高单产 10% 以上及扩大优质水稻种植区域的优点,同时膜上种植提高有效积温和穗数、节水、防止水土流失,可大幅度减少化肥除草剂使用,改善土壤状况,实现钵苗移栽与膜上种植农艺的有效结合^[1-3],是目前实现高产、提质、节水、增效的精品水稻生产重要途径。但是目前这种农艺仅能通过人工操作实现,影响了该农艺的大面积推广与应用。

目前国内外缺乏对于轻简化一体式水稻钵苗膜上移栽装备核心部件的研究与应用^[4-5],市场上现有相关装备仅能单独完成水稻钵苗移栽或膜上插秧作业。国外日本井关公司提出的顶出式水稻钵苗摆栽机(APGP6 型),通过 4 套机构分别完成顶出、翻转、输送、栽植 4 个工序,作业过程衔接较多,结构工艺复杂,成本高,不适宜我国现阶段应用^[6-8]。国内对水稻钵苗移栽机构进行了系列研究,文献[9-11]提出各种杆式机构实现了水稻钵苗移栽性能,文献[12-15]提出系列行星轮系机构实现了双臂高速取出式水稻钵苗移栽,为高效轻简化移栽机构提供设计思路。国内外目前出现的水稻膜上移栽装备大多仅能单独实现覆膜、打孔或直接在膜上插秧作业。文献[16-20]将膜上开孔装置进行分体式设计但穴口质量一般,较难保证秧苗与破膜位置的精准配合,陈海涛等^[21-23]在栽植臂固装开孔装置,易产生干涉现象或破膜轨迹不理想的状态,许春林等^[24]提出配置在移栽臂上的一体探出式破膜机构,提高了破膜与栽植作业配合精准度。针对水稻钵苗膜上移栽,文献[25-26]提出并置双行星轮系水稻钵苗膜上移栽机构,可以实现水稻钵苗移栽与破膜挖穴轨迹姿态的协同动作,但靠一个处于悬臂状态的挖穴单杆进行作业,仅实现了轨迹要求,难以保证较好的挖穴姿态与受力要求。

根据以上存在的问题和水稻钵苗膜上移栽农艺指导要求,本文开展以纯机械式机构实现钵苗移栽与破膜挖穴协同配合作业的技术方案,研究基于行星轮系机构构型的组合式移栽机构,仅用一套机构实现一次性完成取苗、送苗、破膜挖穴和栽植协同配合作业。

1 设计要求与工作原理

1.1 设计要求

为了满足水稻钵苗膜上移栽一体化协同作业的农艺指导要求,结合课题组前期研究基础,首先提出一体式水稻钵苗膜上移栽机构整体设计要求与策略,共分为 4 个关键作业阶段,分别为取苗、送苗、破膜挖穴和配合栽植过程。

取苗阶段,拟采取非圆行星轮系机构实现“8”形轨迹的拔取式水稻钵苗移栽方式,初始位置机构运转驱动移栽臂部件向秧箱钵苗位置运动,随着移栽臂取秧夹张开移动收拢秧苗,在取苗点位置控制取秧夹以适当角度夹紧苗茎秆底部位置,并随行星轮系移栽机构运转向后上方摆动关键位移,实现快速拔取钵苗动作,此过程防止苗茎的横向损伤,直至取秧夹运行到取苗拐点处,取苗阶段完成,同时该阶段利用组合机构控制耦合的破膜挖穴部件远离秧箱等位置,防止发生干涉,如图 1a、1b 所示。

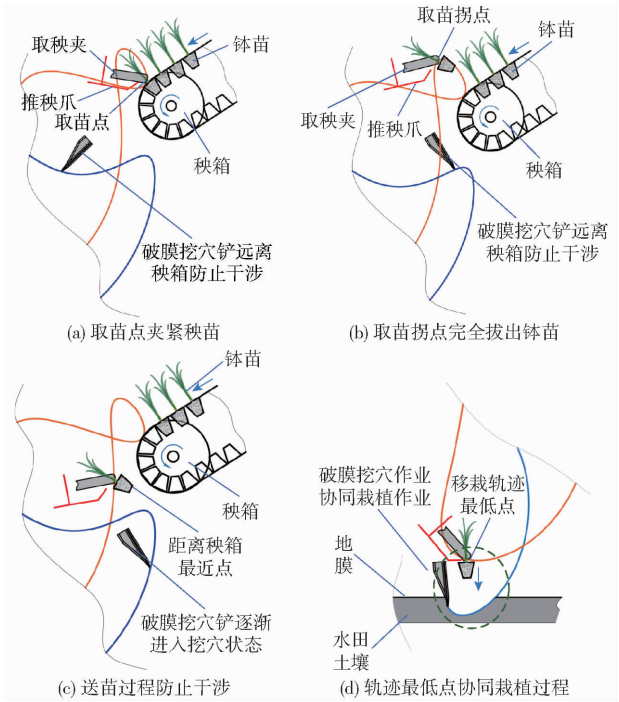


图 1 水稻钵苗膜上移栽一体化协同作业方案

Fig. 1 Integrated collaborative operation scheme for transplanting rice pot seedlings on film

送苗阶段,机构继续驱动移栽臂部件使其夹紧钵苗从最高位置逐渐拐向栽植位置运动,破膜挖穴部件随之运动,该过程秧苗与破膜挖穴部件均需与秧箱处于无干涉避障状态,移栽臂转角变化为秧苗直立栽植提供关键条件,形成移栽轨迹形状的“环扣”,破膜挖穴部件继续运转为栽植前破膜挖穴做准备,如图 1c 所示。

破膜挖穴与栽植协同配合作业阶段,移栽臂部

件在推苗栽植前,机构控制破膜挖穴铲先破膜并挖出适当穴口,破膜挖穴铲作业最低位置需与即将推苗的取秧夹保持一定距离,当挖穴即将结束时,取秧夹带着钵苗到达移栽轨迹最低点,控制取秧夹配合推秧机构立即将钵苗推入所挖穴口中完成栽植,继续运转回程准备下一次工作循环,如图 1d 所示。

1.2 工作原理

为实现上述作业要求,设计的一体式水稻钵苗膜上移栽机构由两部分组成:首先,利用非圆齿轮行星轮系与移栽臂部件组成取苗栽植机构,完成取苗、送苗、精准栽植所需轨迹与姿态;然后,将组合连杆机构两端分别配置于行星轮系机构上,即与匀速转动行星架固定的曲柄和与不等速运动移栽臂铰接的摇杆组成破膜挖穴机构,利用运动链间耦合相对转角,完成破膜挖穴所需的复杂轨迹与姿态,如图 2 所示。

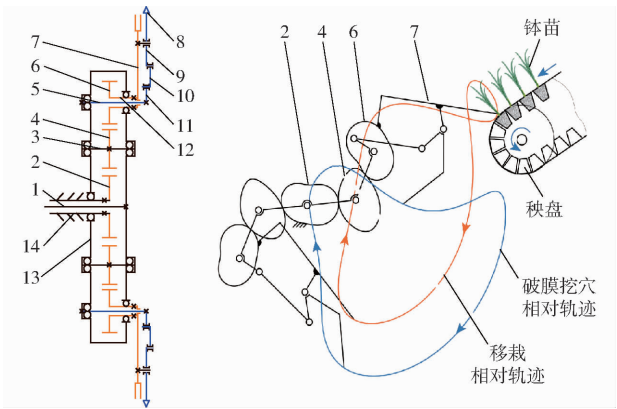


图 2 水稻钵苗膜上移栽机构结构简图

Fig.2 Brief diagram of rice pot seedling transplanter on film

- 1. 动力输入轴 2. 太阳轮 3. 中间轴 4. 中间轮 5. 凸轮轴
- 6. 行星轮 7. 移栽臂 8. 破膜挖穴铲 9. 摇杆 10. 连杆
- 11. 曲柄 12. 行星轴 13. 行星架 14. 机架

取苗栽植机构工作原理:水稻钵苗膜上移栽机构作业时,行星架在动力输入轴驱动下顺时针匀速转动,在固装于机架的太阳轮配合下,通过中间齿轮传动使行星轮及行星轴驱动移栽臂部件相对行星架做逆时针不等速运动,移栽臂末端形成满足移栽作业要求的水稻夹秧“8”形相对运动轨迹;通过移栽臂内凸轮与拨叉的作用,通过压缩弹簧使推秧杆直线往复运动,控制取秧夹在关键位置开合。

破膜挖穴机构工作原理:随行星架顺时针匀速转动的曲柄与铰接在非匀速转动的移栽臂上的摇杆形成耦合相对转动,曲柄通过连杆、摇杆控制破膜挖穴铲适时摆动,从而形成满足破膜挖穴作业要求的“心”形相对运动轨迹与姿态。

机构间相互协同配合作业,有序精准连贯完成取苗、送苗、破膜挖穴与栽植 4 个移栽作业工序,作业过程互不干涉,行星架旋转一周完成 2 次移栽。

取秧夹尖点形成“8”形相对运动轨迹与破膜挖穴铲尖点形成“心”形相对运动轨迹,叠加载植株距为基准的水平速度后形成绝对运动状态,如图 3 所示。

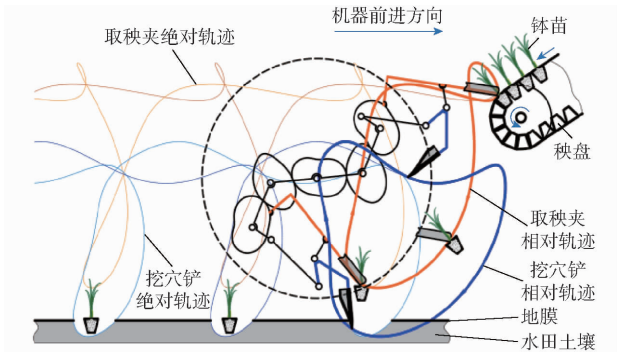


图 3 移栽机构相对运动与绝对运动示意图

Fig.3 Schematic of relative motion and absolute motion of transplanting mechanism

1.3 移栽机构运动学分析

以太阳轮转动中心 O_1 为绝对坐标系原点,建立水稻钵苗膜上移栽机构中非圆齿轮行星轮系运动学模型,如图 4 所示。

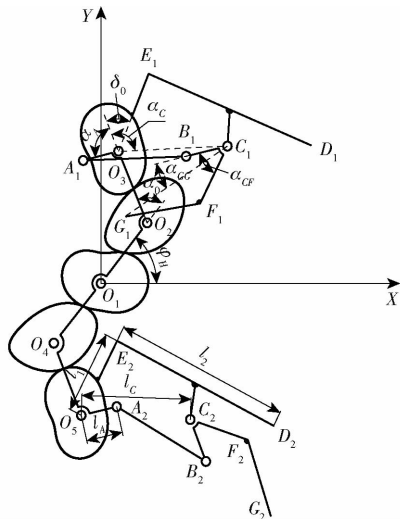


图 4 移栽机构运动学分析

Fig.4 Schematic of kinematic analysis of transplanting mechanism

以行星轮转动中心 O_3 为相对坐标系原点,建立水稻钵苗膜上移栽机构中破膜挖穴装置运动学模型,如图 5 所示。行星架做顺时针匀速转动。

行星架顺时针转过 φ 时行星架绝对转角 $\varphi_H(\varphi)$ 为

$$\varphi_H(\varphi) = \varphi_{H0} - \varphi \quad (1)$$

式中 φ_{H0} ——行星架初始转角, ($^\circ$)

太阳轮相对行星架转角 $\beta_1(\varphi)$ 和绝对转角 $\varphi_1(\varphi)$ 为

$$\begin{cases} \beta_1(\varphi) = \varphi \\ \varphi_1(\varphi) = \varphi_{H0} \end{cases} \quad (2)$$

中间轮相对行星架转角 $\beta_2(\varphi)$ 和绝对转角

杆 C_1A_1 与 C_1B_1 间夹角 $\theta_4(\varphi)$ 为

$$\theta_4(\varphi) = \arccos \frac{l_{BC}^2 + (x'_{A_1}(\varphi) - x'_{C_1}(\varphi))^2 + (y'_{A_1}(\varphi) - y'_{C_1}(\varphi))^2 - l_{AB}^2}{2l_{BC} \sqrt{(x'_{A_1}(\varphi) - x'_{C_1}(\varphi))^2 + (y'_{A_1}(\varphi) - y'_{C_1}(\varphi))^2}} \quad (21)$$

连杆上点 B_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{B_1}(\varphi) = x_{O_3}(\varphi) + x'_{B_1}(\varphi) \cos(\theta_2(\varphi)) - y'_{B_1}(\varphi) \sin(\theta_2(\varphi)) \\ y_{B_1}(\varphi) = y_{O_3}(\varphi) + x'_{B_1}(\varphi) \sin(\theta_2(\varphi)) + y'_{B_1}(\varphi) \cos(\theta_2(\varphi)) \end{cases} \quad (22)$$

破膜挖穴铲尖点(点 G_1) 坐标为

$$\begin{cases} x_{G_1}(\varphi) = x_{C_1}(\varphi) + l_{CG} \cos(\theta_{BC}(\varphi) + \alpha_{CG}) \\ y_{G_1}(\varphi) = y_{C_1}(\varphi) + l_{CG} \sin(\theta_{BC}(\varphi) + \alpha_{CG}) \end{cases} \quad (23)$$

其中 $\theta_{BC}(\varphi) = \arctan \frac{y_{B_1}(\varphi) - y_{C_1}(\varphi)}{x_{B_1}(\varphi) - x_{C_1}(\varphi)} \quad (24)$

式中 α_{CG} ——破膜挖穴铲第 2 段转角, ($^\circ$)
 l_{CG} ——破膜挖穴铲理论长度, mm

2 数字可视化优化软件开发

水稻钵苗膜上移栽机构优化设计难点在于实现钵苗移栽与破膜挖穴动作间协同配合,为优化出理想轨迹与姿态,结合计算机编程技术,开发水稻钵苗膜上移栽机构数字可视化优化设计软件。

2.1 优化目标

根据水稻钵苗膜上移栽机构协同配合作业设计要求,提出 14 个优化目标,并将抽象的优化目标具体数值化,分别转换成可定量分析的目标函数。优化目标为:轨迹高度大于 260 mm;取苗取出段直线距离大于 17 mm;移栽臂间互不干涉;破膜挖穴铲与移栽臂间互不干涉;破膜挖穴铲与秧箱不发生干涉;送苗过程水稻钵苗与秧箱不干涉;绝对运动破膜挖穴穴口中心与栽植水稻钵苗中心距离差小于 10 mm;绝对运动穴口长度限定在 45 ~ 60 mm;绝对运动挖穴深度限定在 15 ~ 25 mm 范围;齿轮箱最小离地距离大于 15 mm;取秧角 λ_1 在 $-10^\circ \sim 5^\circ$ 之间;推秧角 λ_2 在 $40^\circ \sim 55^\circ$ 之间;角度差 λ_3 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间;非圆齿轮模数 m 大于 2.5 mm。

2.2 优化软件设计

基于 Matlab GUI 模块开发平台,将可求解任意行星架转角下的移栽臂与破膜挖穴铲实现水稻钵苗移栽与破膜挖穴协同配合作业轨迹与姿态的运动学理论模型转化为数字化编程语言,并结合基于优化目标建立的目标函数,开发水稻钵苗膜上移栽机构数字可视化优化设计软件,软件界面如图 6 所示。

软件实时展示移栽机构的设计进程与动态仿真

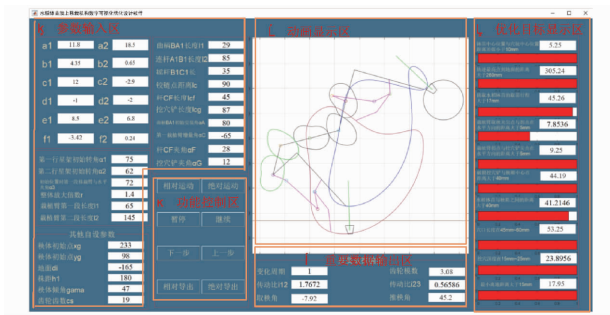


图 6 优化设计软件界面

Fig. 6 Interface of optimization design software

过程,结合设计经验与人机深度交互探索调整规律,最终优化得 1 组满足水稻钵苗膜上移栽机构作业要求机构参数: $a_1 = 11.2, b_1 = 4.35, c_1 = 12, d_1 = -1, e_1 = 8.5, f_1 = -3.5, a_2 = 18.5, b_2 = 0.65, c_2 = -2.9, d_2 = -2, e_2 = 7, f_2 = 0.24, r = 1.4, \alpha_1 = 75^\circ, \alpha_2 = 62^\circ, \alpha_3 = 72^\circ, L_1 = 65 \text{ mm}, L_2 = 145 \text{ mm}, l_1 = 29 \text{ mm}, l_2 = 85 \text{ mm}, l_3 = 35 \text{ mm}, l_C = 90 \text{ mm}, \alpha_A = 80^\circ, \alpha_C = -65^\circ, \alpha_G = 20^\circ, \alpha_F = 41^\circ, l_{CG} = 100 \text{ mm}, l_{CF} = 50 \text{ mm}。$

3 虚拟样机仿真与物理样机试验

3.1 轨迹与姿态验证试验

根据优化设计软件所优化得到的机构参数,开展机构综合结构设计,建立水稻钵苗膜上移栽机构三维模型并完成虚拟装配与干涉检验。将三维模型导入多体动力学虚拟仿真软件 ADAMS 进行仿真,得到虚拟样机移栽机构取秧夹和破膜挖穴铲尖点形成的协同配合作业轨迹与姿态如图 7b 所示。

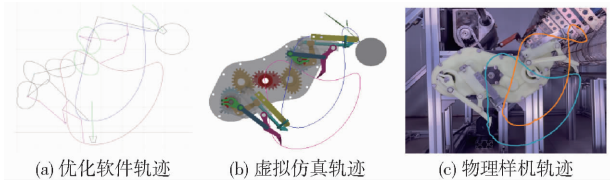


图 7 理论轨迹、虚拟仿真轨迹和物理样机轨迹对比

Fig. 7 Comparison of theoretical, virtual simulation and physical prototype trajectories

为节约复杂零件加工成本,加快研究进度,缩短物理样机研制周期,采用 3D 打印方式完成水稻钵苗膜上移栽机构相关零件加工制作,承受较大载荷零件采用金属加工,装配完成后安装在研制的多功能试验测试台架。结合摄像技术及视频后期分析软件,得到物理样机取秧夹和破膜挖穴铲尖点形成的协同配合作业轨迹与姿态如图 7c 所示。结果表明,理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹和物理样机台架试验轨迹在误差允许范围内保持一致,验证了移栽机构设计的一致性与正确性。

由物理样机作业实际情况可知,移栽机构可一次性完成取苗、送苗、破膜挖穴和栽植 4 个工序协同

配合作业,破膜挖穴与栽植动作配合精准,如图 8 所示,各关键点姿态均满足机构设计要求。

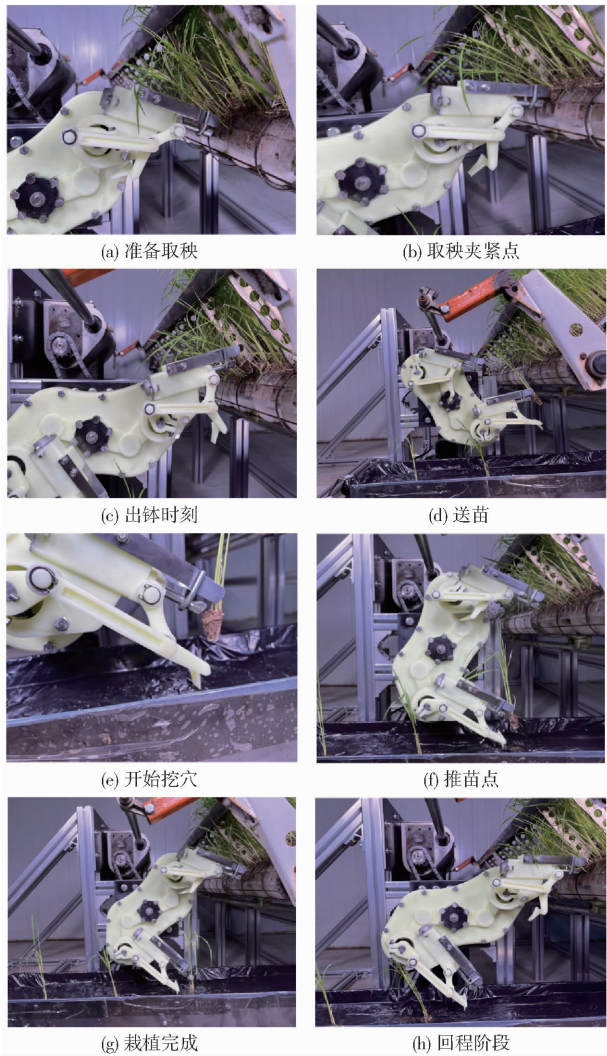


图 8 物理样机作业各关键位姿图像

Fig. 8 Images of key poses of physical prototype operation

3.2 台架性能试验

为进一步考察所研制水稻钵苗膜上移栽机构作业性能,进行物理样机台架性能试验,如图 9 所示。试验地点为农业机械化实验中心,试验前,首先进行水稻钵苗育秧:试验选取吉粳 830 水稻品种,育苗钵盘为 406 穴(14×29)四棱台形状穴孔软盘,钵盘单孔穴口上部尺寸为 17 mm×17 mm,底部尺寸为 11 mm×11 mm,穴孔深度为 17 mm,相邻穴孔中心距为 20 mm;为保证水稻育秧阶段营养,选用有机营养育苗基质与细黑土按照质量比 1:1 配比^[27],在兼光型植物工厂实验室进行育秧,选取适合移栽苗龄为 30 d,试验前水稻钵苗进行炼苗处理^[28]。土槽内土层厚度为 13 cm,试验前模拟田间土壤环境进行泡田处理。

设定水稻钵苗移栽机构顺时针转速 100 r/min,株距 180 mm。取单盘钵苗 406 株单独进行取苗试

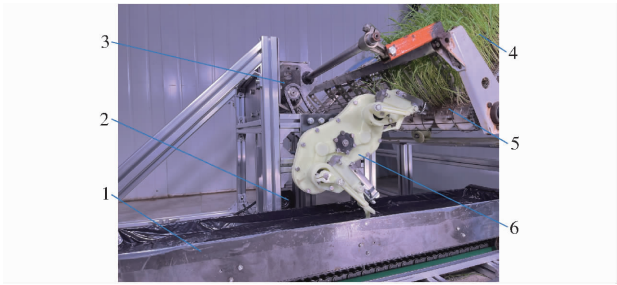


图 9 物理样机台架试验

Fig. 9 Physical prototype test bench test

1. 土槽 2. 电动机 3. 传动机构 4. 秧苗 5. 秧盘 6. 移栽机构样机

验,统计秧盘中共缺苗 5 株,试验中能成功从秧盘中取出的水稻秧苗共有 377 株,取苗成功率约为 94%。未取苗成功原因有:反季育苗秧苗长势不佳,茎秆韧性不足;钵盘底部秧根从小孔中窜出并发散;秧苗间存在连根现象,拔取时带出了相邻秧苗。

由于破膜挖穴形成穴坑质量影响栽植效果,因此单独进行破膜挖穴试验。试验用厚 0.015 mm 塑料地膜覆盖,双臂作业机构旋转一周完成两次破膜挖穴工序,以 14 次破膜挖穴作业为一组共进行 29 组试验,分别对每组破膜挖穴情况进行记录,完成对破膜穴坑数据的测量,包括破膜后穴口长度、穴口宽度及穴坑深度等,形成穴坑效果如图 10a 所示。统计计算成功破膜数、破膜挖穴实际穴口每组数据平均值与理论值相对误差,结果为 387 次成功破膜,成功率约为 95.3%,成功破膜后穴口每组数据均满足要求共 27 组,合格率约为 93.1%。

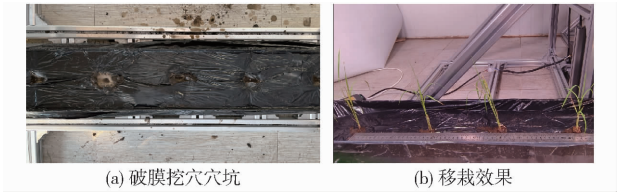


图 10 破膜挖穴试验与移栽试验

Fig. 10 Film perforation and digging test and transplanting test

由于栽植株距均匀有利于后续田间管理以及秧苗生长发育,因此,水稻钵苗膜上移栽作业以栽植株距变异系数衡量栽植株距均匀程度;以水稻秧苗成功完成取苗、送苗和栽入穴坑内并且秧苗不发生倾倒现象作为栽植成功。试验取 3 盘共 1 218 株钵苗进行试验,试验分 3 组进行,每组移栽单盘 406 株钵苗,准备完成后开展系列完整移栽试验,作业后部分水稻钵苗栽植效果如图 10b 所示,试验结果如表 1 所示。

试验结果表明,水稻钵苗膜上移栽机构平均栽植成功率为 92.36%,平均栽植株距变异系数为 2.67%,栽植株距变异系数较小,株距均匀度高,符

表 1 移栽试验结果

Tab.1 Results of planting experiment

试验号	合格株数/ 株	栽植成功 率/%	株距	
			(平均值 ± 标准 差)/mm	变异系数/ %
1	377	92.86	173.6 ± 5.12	2.95
2	367	90.39	182.5 ± 4.77	2.61
3	381	93.84	185.8 ± 4.54	2.44
平均值	375	92.36		2.67

合水稻钵苗膜上移栽机构设计要求,验证了水稻钵苗膜上移栽机构设计的合理性与可行性。

分析影响移栽成功率因素包括:水稻秧苗由于连根导致未成功取出,或由于反季育秧部分成功取出的秧苗在送苗阶段出现茎秆断裂造成推秧失败。另外,在破膜挖穴和栽植试验中存在由于覆膜效果不理想导致少数土槽内地膜未破开情况,也出现了破膜拖拽引起穴坑质量差的情况。解决以上问题主要可通过后续改善育秧质量、增加压膜装置、改善破膜挖穴铲刃口锋利程度等方式进行缓解改良。

4 结论

(1)提出了非圆齿轮-连杆组合式行星轮系水稻钵苗膜上移栽机构,用一套机构实现取苗、送苗、破膜挖穴和栽植 4 个工序协同配合作业。

(2)对移栽机构进行了理论分析并建立运动学模型,将运动学理论模型转化为数字化编程语言,基于 Matlab GUI 平台开发出数字可视化优化设计软件,优化出一组满足移栽要求的机构参数。

(3)根据优化设计软件优化得到的机构参数,开展机构综合结构设计,进行虚拟样机仿真验证与物理样机台架验证试验,结果为理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹和物理样机台架试验轨迹基本一致,验证了水稻钵苗膜上移栽机构的一致性与正确性。

(4)完成水稻钵苗育秧,分别开展取苗试验、破膜挖穴试验及移栽性能试验,试验结果为取苗成功率为 94%,移栽成功率为 92.36%,栽植株距变异系数为 2.67%,满足水稻膜上移栽作业要求,验证了水稻钵苗膜上移栽机构设计的合理性与可行性。

参 考 文 献

[1] 俞高红,金也,常数数,等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100 – 108.
YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu, et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):100 – 108. (in Chinese)

[2] WANG L, SUN L, HUANG H, et al. Design of clamping-pot-type planetary gear train transplanting mechanism for rice wide-narrow-row planting[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(2): 62 – 71.

[3] 胡国辉,陈惠哲,向镜,等. 水稻生物可降解膜覆盖机插技术研究与应[J]. 中国稻米,2020,26(5): 66 – 69.
HU Guohui, CHEN Huizhe, XIANG Jing, et al. Research and application of the technique of biodegradable film mulching in machine transplanted rice[J]. China Rice, 2020,26(5): 66 – 69. (in Chinese)

[4] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44 – 53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44 – 53. (in Chinese)

[5] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1 – 20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1 – 20. (in Chinese)

[6] 修德龙,范森. 两种日本水稻钵育摆栽机在垦区的对比试验[J]. 现代化农业, 2008(3): 37 – 38.

[7] 宋云生,张洪程,戴其根,等. 水稻机栽钵苗单穴苗数对分蘖成穗及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 37 – 47.
SONG Yunsheng, ZHANG Hongcheng, DAI Qigen, et al. Effect of rice potted-seedlings per hole by mechanical transplanting on tillers emergence, panicles formation and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 37 – 47. (in Chinese)

[8] 周成,熊文江,隋新. 水稻钵苗双臂摆栽机构设计与轨迹分析[J]. 现代化农业, 2020(9): 71 – 72.

[9] 宋建农,黄育仕,魏文军,等. 水稻钵苗对辊式拔秧机构[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006,27(4): 291 – 294.
SONG Jiannong, HUANG Yushi, WEI Wenjun, et al. Evulsing rice potted-seedling mechanism equipped with double-roller[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2006,27(4): 291 – 294. (in Chinese)

[10] XIN Liang, LÜ Zhijun, WANG Wenqing, et al. Optimal design and development of a double-crank potted rice seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(1): 31 – 40.

[11] 原新斌,张国凤,陈建能,等. 顶出式水稻钵苗有序移栽机的研究[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(5): 749 – 752.
YUAN Xinbin, ZHANG Guofeng, CHEN Jianneng, et al. Development on rice plotted-seeding sequential transplanter of ejection type[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 28(5): 749 – 752. (in Chinese)

[12] 俞高红,黄小艳,叶秉良,等. 旋转式水稻钵苗移栽机构的机理分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 16 – 22.
YU Gaohong, HUANG Xiaoyan, YE Bingliang, et al. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16 – 22. (in Chinese)

[13] 叶秉良,易卫明,俞高红,等. 不完全非圆齿轮传动钵苗移栽机构缓冲装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 69 – 75.

- YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Buffer device of transplanting mechanism for plug seedlings based on transmission with incomplete non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 69–75. (in Chinese)
- [14] 吴国环,俞高红,项筱洁,等. 三移栽臂水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 15–22.
WU Guohuan, YU Gaohong, XIANG Xiaojie, et al. Design and test of rice potted-seedling transplanting mechanism with three transplanting arms[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 15–22. (in Chinese)
- [15] ZHOU Maile, SUN Liang, DU Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of rice pot seedling transplanting mechanism with planetary Bezier gears[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6): 1537–1548.
- [16] TADEO B D, ISHINO F, NAGATA M, et al. Study on mechanization of mulching cultivation using biodegradable film for early season culture rice (Part 1) utilization of biodegradable film for keeping the environment clean[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(2): 144–153.
- [17] TADEO B D, ISHINO F, NAGATA M, et al. Study on mechanization of mulching cultivation using biodegradable film for early season culture rice (Part 2) development of mulch slit cutting mechanism for biodegradable film using nylon cord[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(2): 154–166.
- [18] 姚宏亮,罗翠华,李忠民. 水稻覆膜插秧机膜上划孔机构: CN206759994U[P]. 2017–12–19.
- [19] 王威. 一种带有切膜刀组合的覆膜插秧一体机: CN204272649U[P]. 2015–04–22.
- [20] 田佳航. 快速插秧机用覆膜机设计及运动仿真研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
TIAN Jiahang. Study on the design and motion simulation of plastic film mulching machine for fast rice transplanter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 张子浩,陈海涛,顿国强,等. 水稻插秧机植物纤维地膜敷装置开口机构设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(3): 79–82.
ZHANG Zihao, CHEN Haitao, DUN Guoqiang, et al. Optimal design of plant fiber film mulching device synchronous cutting mechanism on rice transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 79–82. (in Chinese)
- [22] 陈海涛,赵阳,侯守印,等. 同步膜上开孔插秧装置运动学仿真与参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 25–30.
CHEN Haitao, ZHAO Yang, HOU Shouyin, et al. Kinematics simulation and parameter optimization experiment for transplanting synchronous puncher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 25–30. (in Chinese)
- [23] 陈海涛,李煜,王宇,等. 防堵式覆膜同步开孔插秧装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 87–95, 129.
CHEN Haitao, LI Yu, WANG Yu, et al. Design and experiment for transplanting synchronous puncher with preventing clogging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 87–95, 129. (in Chinese)
- [24] 许春林,单伊尹,辛亮,等. 探出开孔式高速水稻膜上插秧机分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 79–87.
XU Chunlin, SHAN Yiyin, XIN Liang, et al. Design and experiment of high-speed rice transplanter with extensible mulch cutting mechanism in mulching cultivation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 79–87. (in Chinese)
- [25] 赵匀,刘志平,辛亮,等. 水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 87–93.
ZHAO Yun, LIU Zhiping, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 87–93. (in Chinese)
- [26] 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, LÜ 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)
- [27] 赵立军,陈海涛,蔡晓华,等. 密闭式立体育秧系统水稻育苗基质配方研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 204–210.
ZHAO Lijun, CHEN Haitao, CAI Xiaohua, et al. Research on matrix formula of substrate for seedling in rice closed stereo seedling system[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 204–210. (in Chinese)
- [28] 辛亮,王明成,孙国玉,等. 番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 96–105.
XIN Liang, WANG Mingcheng, SUN Guoyu, et al. Design and experiment of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 96–105. (in Chinese)