

步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构优化设计与试验

许春林 吕志军 辛亮 王杰 赵匀

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了实现将水稻钵苗移栽和膜上栽植农艺技术相结合,设计了相应的步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构,用一套回转机构一次性依次完成取苗、输送、膜上开孔和配合栽植。根据移栽机构的工作原理,建立了运动学理论模型并设定数字化优化目标,基于 Visual Basic 6.0 开发了机构的计算机辅助分析优化设计软件,通过优化获得一组满足移栽要求的机构参数。对机构进行了结构设计、三维建模和装配,并通过 ADAMS 软件完成了虚拟样机仿真,应用 3D 打印技术制作了物理样机。利用高速摄像技术在所搭建的试验台架上对样机进行了轨迹与姿态验证试验,通过对比分析得到理论轨迹、虚拟仿真轨迹和物理样机轨迹基本一致,验证了机构设计的合理性与正确性。在试验台架上完成了取苗试验、膜上开孔试验以及栽植试验,结果表明取苗成功率为 90.4%,秸秆纤维地膜和塑料地膜栽植成功率分别为 87.5% 和 82.5%,所开膜孔的长度与宽度效果良好,满足步行式水稻钵苗膜上开孔移栽的要求。

关键词: 水稻钵苗; 移栽机械; 膜上开孔; 步行式; 复合机构

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0090-07

Optimization Design and Experiment of Walk-type Potted Rice Seedling Transplanting Mechanism on Film Perforating Part

XU Chunlin LÜ Zhijun XIN Liang WANG Jie ZHAO Yun

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

Abstract: In order to achieve the combination of potted rice seedling transplanting and technology of mulch-film, a kind of walk-type potted rice seedling transplanting mechanism was designed. The process of seedling picking, conveying, film perforating and cooperating transplanting was completed by a set of rotary mechanisms. According to the working principle of the transplanting mechanism, kinematic theory model was set up and digital optimization goals were set. The computer aided analysis and optimization software of the transplanting mechanism based on Visual Basic 6.0 was developed. A set of parameters of the transplanting mechanism which met the requirements of transplanting were obtained by optimization. The two-dimensional structure of the transplanting mechanism was designed. Three-dimensional model was established. The virtual prototype simulation was completed by ADAMS software. The trajectory and attitude verification tests were carried out on the prototype using the test bench and high-speed photography technology. The results of bench test, simulation analysis and theoretical analysis were almost in agreement, which verified the rationality and correctness of the institutional design. The seedling pick-up test, film perforating test and transplanting test were completed on the test bench. The results showed that the success rate of seedlings pick-up was 90.4%. The success rate of transplanting for films of straw fiber and plastic was 87.5% and 82.5%, respectively, the results showed that the length and width of the film holes were good, which could meet the requirements of walk-type potted rice seedling transplanting mechanism on film perforating part.

Key words: potted rice seedling; transplanting mechanism; film perforating; walk-type; composite structure

收稿日期: 2019-06-13 修回日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775104)、黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA16B302)和2019年辽宁省教育厅科学技术研究青年项目(L2019lkyqn-02)

作者简介: 许春林(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事耕作技术及机具研究,E-mail: 13904656458@163.com

通信作者: 辛亮(1989—),男,讲师,博士后,主要从事移栽机械机构优化设计研究,E-mail: xinliang@neau.edu.cn

0 引言

水稻钵苗膜上开孔移栽技术是将水稻钵苗移栽与膜上栽培技术相结合,将带有营养土块的水稻钵体种植于覆膜开孔的田中^[1-4]。不仅能实现钵苗移栽的无缓苗期、提高单产、扩大精品粮种植面积,而且达到增加有效积温,减轻杂草和病虫害,防止水土流失的目的,为绿色有机水稻的高质、高产及节水增效提供可靠途径^[5-8]。

目前,国内外市场未见水稻钵苗膜上开孔移栽装备,对于水稻膜上栽植机械的研究大多集中于覆膜插秧机。国际上,日本先进工业科学研究所曾提出一种水稻覆纸插秧机^[9],由于其没有配套膜上开孔机构,作业过程极易伤根;永田雅辉等^[9-11]研制一种带有专用膜上开孔机构的覆膜插秧机,但其设计的狭缝型开口刀无法保证地膜的纵向膜孔宽度,影响栽植质量。国内很多科研人员对此也开展了研究,东北农业大学针对纤维地膜覆盖插秧机提出了“H”形同步开孔插秧装置^[12],保证了膜上开孔效果的同时,具有良好的防堵性能;焦海坤等^[13]提出了一种曲柄摇杆打孔机构,配合插秧机分插机构可依次完成铺膜、开孔和插秧作业,但开孔机构与分插机构的同步性难以保证,整机灵活性差,影响栽植效果。

步行式水稻栽植装备在我国占有较大的市场空间与发展潜力。为了结合我国水稻生产现状,本文提出一种步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构。通过理论分析与建模,基于开发的计算机优化设计软件,对步行机水稻钵苗移栽与膜上开孔复合运动轨迹及姿态进行优化,实现用一套回转机构一次性依次完成取苗、输送、膜上开孔和精准栽植的4道移栽工序,满足步行式水稻钵苗膜上开孔移栽的技术要求。

1 机构工作原理与轨迹设计要求

1.1 机构工作原理

步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构由非圆齿轮行星系和椭圆齿轮行星系复合配置而成,共同运转并分别在相应时刻完成钵苗移栽和膜上开孔的移栽轨迹及姿态运动,如图 1 所示。其主要工作原理为:动力传输驱动齿轮箱壳体进行匀速旋转,由于齿轮箱壳体内部的非圆太阳轮和椭圆太阳轮相互固接于机架,因此分别带动齿轮箱壳体内相互啮合的非圆行星系和椭圆行星系进行不等速运动。与非圆行星轮固联的栽植臂形成不等速运动,实现水稻钵苗移栽“8”字形相对移栽轨迹与姿态^[14-15],完成取苗、输

送和栽植 3 个工序,而与椭圆行星轮通过行星轮固接的开孔刀实现“橄榄形”开孔相对轨迹与姿态,完成开孔工序。

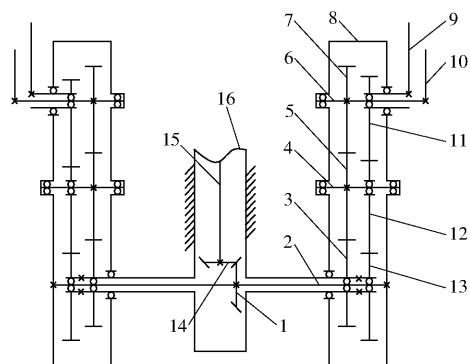


图 1 移栽机构传动示意图

Fig. 1 Driven diagram of transplanting mechanism

1. 锥齿轮 B 2. 动力输入轴 3. 椭圆太阳轮 4. 中间轴 5. 椭圆中间轮 6. 行星轴 7. 椭圆行星轮 8. 齿轮箱壳体 9. 栽植臂 10. 开孔刀 11. 非圆行星轮 12. 非圆中间轮 13. 非圆太阳轮 14. 锥齿轮 A 15. 主传动轴 16. 传动箱

1.2 轨迹和姿态设计要求

根据水稻钵苗移栽和膜上栽植两种农艺要求以及步行式移栽装备的作业特点,在满足机构回转一周完成取苗、输送、膜上开孔和栽植 4 个工序的同时,需重点考虑机构相对运动取苗阶段和绝对运动开孔栽植阶段取苗机构与开孔刀具精准配合的轨迹与姿态,如图 2 和图 3 所示。

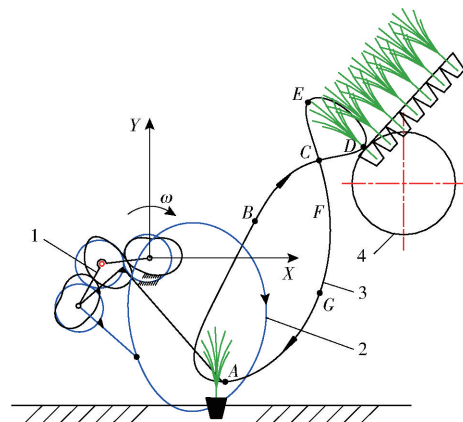


图 2 移栽机构相对运动轨迹

Fig. 2 Relative motion trajectories of transplanting mechanism

1. 移栽机构 2. “橄榄形”开孔轨迹 3. “8”字形移栽轨迹
4. 种箱

首先,非圆齿轮行星系钵苗移栽机构需满足水稻钵苗移栽要求形成交叉式“8”字形移栽轨迹;机构整体顺时针方向旋转,栽植臂夹秧片在 CD 段轨迹,取苗机构在凸轮和拨叉的作用下,夹秧片逐渐闭合,将靠近秧苗根部的茎秆夹紧; DE 段轨迹为拔秧过程,该段轨迹的直线距离需大于钵盘穴孔的深度

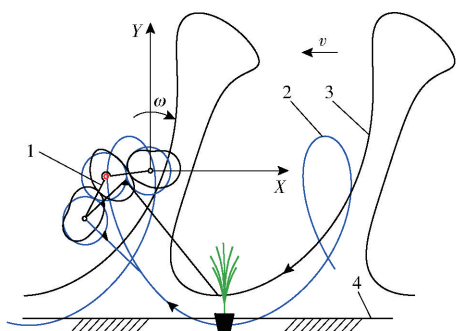


图3 移栽机构绝对运动轨迹

Fig. 3 Absolute motion trajectories of transplanting mechanism

1. 移栽机构 2. 绝对开孔轨迹 3. 绝对移栽轨迹 4. 地面

以保证使钵苗完全脱离钵盘;ECFG段为秧苗输送阶段,此过程要避免被夹持的秧苗与秧箱发生干涉;以上过程椭圆行星机构同时带动开孔刀随机构旋转。在准备进行栽植时,开孔刀对已覆膜进行开孔,考虑到机具的前进方向与旋转方向相反,为了开出适宜长度和宽度的穴口,采取“橄榄形”相对开孔轨迹;当开孔刀开孔后准备离开地面时,移栽臂运行到A点,在凸轮和拨叉的作用下夹秧片张开,完成推秧栽植动作。

通过两套行星轮系的配合,实现作业过程中的取苗和运输阶段,开孔刀远离秧箱与栽植臂,防止其发生干涉;在栽植钵苗时,开孔刀在膜上开出适当的穴孔后,栽植臂配合开孔刀且不发生干涉地进行推秧,准确可靠地将钵苗栽植到所开的膜孔中,完成膜上植苗,回程准备下一次作业。

2 膜上开孔移栽机构理论模型的建立

本文以两太阳轮的转动中心 O_1 为坐标原点,水平方向为X轴,垂直方向为Y轴建立坐标系,分别建立钵苗移栽机构和膜上开孔机构运动学理论模型,机构简图如图4所示。

2.1 移栽机构运动学分析

设定移栽机构逆时针转动为正方向,根据Willis啮合定理^[16-17],非圆齿轮副的中心距为 a ,本文采用帕斯卡蜗线构造非圆齿轮节曲线^[18]。

非圆太阳轮节曲线参数方程和极坐标方程为

$$\begin{cases} x(\varphi) = a_1(e_1 \cos \varphi)^2 + b_1 \cos(\varphi + f_1) + g_1 \\ y(\varphi) = c_1 \cos(e_2 \varphi) \sin(e_2 \varphi) + \\ d_1 \cos(\varphi + f_2) + g_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$r_1(\varphi) = \sqrt{x^2(\varphi) + y^2(\varphi)} \quad (2)$$

式中 $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1, e_2, f_2, g_2$ 为非圆齿轮节曲线调节参数。

设定移栽机构角速度为 ω (rad/s),齿轮箱壳体

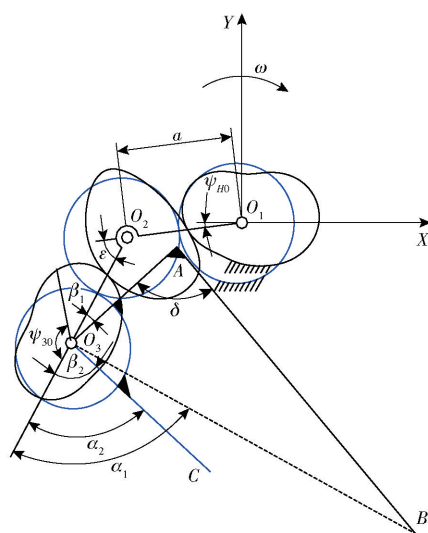


图4 移栽机构简图

Fig. 4 Structural diagram of transplanting mechanism

初始安装角为 ψ_{H0} (rad)。当齿轮箱壳体顺时针转过 φ (rad),各角度和位移分析如下:

齿轮箱壳体的绝对转角为

$$\psi_H(\varphi) = \psi_{H0} - \varphi \quad (3)$$

非圆太阳轮相对于齿轮箱壳体的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_1(\varphi) = \varphi \\ \psi_1(\varphi) = \psi_{H0} \end{cases} \quad (4)$$

非圆太阳轮的转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_1}(\varphi) = 0 \\ y_{O_1}(\varphi) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

非圆中间轮相对于齿轮箱壳体的转角与绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_2(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{r_1(2\pi - x)}{a - r_1(2\pi - x)} dx \\ \psi_2(\varphi) = \psi_{H0}(\varphi) - \partial_2(\varphi) \end{cases} \quad (6)$$

非圆中间轮的转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_2}(\varphi) = a \cos(\psi_H(\varphi)) \\ y_{O_2}(\varphi) = a \sin(\psi_H(\varphi)) \end{cases} \quad (7)$$

为优化出满足移栽要求的复杂轨迹,增加机构的可调性,引入箱壳体拐角 ε (rad)^[19]。

非圆行星轮相对齿轮箱壳体的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_3(\phi) = \int_\varepsilon^{\partial_2(\phi) + \varepsilon} \frac{a - r_1(x)}{r_1(x)} dx \\ \psi_3(\phi) = \psi_H(\phi) + \varepsilon + \psi_{30} + \partial_3(\phi) - \pi \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中 } \psi_{30} = \int_0^\varepsilon \frac{a - r_1(x)}{r_1(x)} dx \quad (9)$$

式中 ψ_{30} ——齿轮箱壳体拐角 ε 所引起的非圆行星轮初始安装角,rad

非圆行星轮的转动中心方程为

$$\begin{cases} x_{o_3}(\varphi) = x_{o_2}(\varphi) + a\cos(\psi_H(\varphi) + \varepsilon) \\ y_{o_3}(\varphi) = y_{o_2}(\varphi) + a\sin(\psi_H(\varphi) + \varepsilon) \end{cases} \quad (10)$$

栽植臂尖点 B 相对于行星架的运动坐标为

$$\begin{cases} x_B(\varphi) = x_{o_3}(\varphi) + \sqrt{L_1^2 + L_2^2}\cos\gamma_1 \\ y_B(\varphi) = y_{o_3}(\varphi) + \sqrt{L_1^2 + L_2^2}\sin\gamma_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\gamma_1 = \alpha_1 - \varphi + \partial_3(\varphi) \quad (12)$$

式中 α_1 —— O_3B 与 O_2O_3 的初始安装相位角

L_1 ——栽植臂第 1 段长度

L_2 ——栽植臂第 2 段长度

2.2 膜上开孔机构运动学分析

因为膜上开孔作业轨迹相对于钵苗移栽要简单,所以选用椭圆齿轮行星轮系实现膜上开孔作业要求,同时也降低了非圆齿轮加工难度和成本。为了简化机构,所设计非圆齿轮和椭圆齿轮是同轴转动,所以椭圆齿轮行星轮系中各齿轮转动中心坐标与非圆齿轮行星轮系中各齿轮转动中心坐标一致。根据非圆齿轮的中心距可知,椭圆齿轮的长半轴长度为 a ,椭圆太阳轮的极坐标方程为

$$r_2(\varphi) = \frac{bk}{1 + \sqrt{1 - k^2}\cos\theta} \quad (13)$$

其中 $k = \frac{b}{a}$

式中 b ——短半轴长度

k ——短长轴长度比

各齿轮角度和位移分析如下:

椭圆太阳轮相对于齿轮箱壳体的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_4(\varphi) = \varphi \\ \psi_4(\varphi) = \psi_{H0} \end{cases} \quad (14)$$

椭圆中间轮相对于齿轮箱壳体的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_5(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{r_2(2\pi - x)}{a - r_2(2\pi - x)}dx \\ \psi_5(\varphi) = \pi + \psi_{H0}(\varphi + \pi) - \partial_5(\varphi + \pi) \end{cases} \quad (15)$$

椭圆行星轮相对齿轮箱壳体的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \partial_6(\varphi) = \int_\varepsilon^{\partial_5(\varphi) + \varepsilon} \frac{a - r_2(x)}{r_2(x)}dx \\ \psi_6(\varphi) = \psi_{H0}(\varphi + \pi) + \partial_6(\varphi + \pi) + \psi_{31} - \pi + \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\psi_{31} = \int_0^\varepsilon \frac{a - r_2(x)}{r_2(x)}dx \quad (17)$

开孔刀尖点 C 相对于行星架的运动坐标为

$$\begin{cases} x_C(\varphi) = x_{o_3}(\varphi) + L_3\cos\gamma_2 \\ y_C(\varphi) = y_{o_3}(\varphi) + L_3\sin\gamma_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中 $\gamma_2 = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi - \pi + \partial_3(\varphi + \pi) \quad (19)$

式中 L_3 ——开孔刀 O_3C 的长度

α_2 —— O_3C 与 O_2O_3 的初始安装相位角

3 计算机辅助分析与优化设计软件设计

3.1 优化目标分析与设立

根据钵苗移栽和膜上栽植的农艺要求及机构特点,将几何目标数值化,设置优化目标的约束范围,共有 11 个优化目标^[20-21]:钵苗移栽轨迹高度大于 235 mm;地膜孔穴长度在 50 ~ 70 mm 之间;齿轮箱与地面距离高于 15 mm;取秧角介于 $-5^\circ \sim 15^\circ$ 之间;推秧角介于 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间;角度差介于 $35^\circ \sim 50^\circ$ 之间;非圆齿轮模数应大于 2.1 mm;所开洞口中心与所栽钵苗中心距离小于 10 mm;开孔刀与栽植臂最近距离大于 10 mm;取苗动作结束时,土钵的最低点高于钵盘表面;钵苗在移栽过程中不与钵盘干涉。

3.2 机构优化软件

水稻钵苗膜上开孔移栽机构的优化设计难点在于两套非圆齿轮行星系之间的配合。根据所建立的机构理论模型和数字化优化目标,基于 Visual Basic 6.0 可视化程序语言^[22-25],设计了移栽机构辅助分析优化设计软件。以显示条辨别目标优劣,通过人机交互的方式进行参数优化,软件界面如图 5 所示。

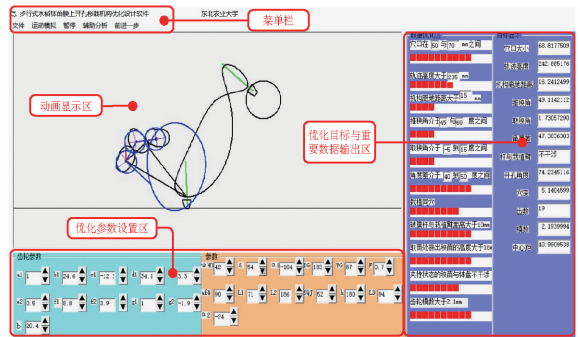


图 5 优化设计软件主界面

Fig. 5 Interface of optimization and design software

通过辅助分析优化设计软件,获得了一组满足钵苗膜上开孔移栽机构要求的优化参数,其中重要参数为: $a_1 = 1$, $b_1 = 24.6$, $c_1 = -12.3$, $d_1 = 34.1$, $e_1 = 3.3$, $e_2 = 0.5$, $f_1 = 8.8$, $f_2 = 3.9$, $g_1 = 1$, $g_2 = -1.9$, $b = 20.4$, $\psi_{H0} = 42^\circ$, $\varepsilon = 54^\circ$, $\alpha_1 = -104^\circ$, 栽植臂第 1 段与第 2 段间夹角 $\delta = 90^\circ$, $\alpha_2 = -24^\circ$, 秧箱倾角 $\alpha_{QJ} = 52^\circ$, $x_G = 183$ mm, $y_G = 87$ mm, $h = 180$ mm, $L_1 = 71$ mm, $L_2 = 186$ mm, $L_3 = 94$ mm。

4 虚拟样机仿真与物理样机试验

4.1 虚拟样机仿真与高速摄像试验

根据优化参数对移栽机构进行二维结构设计,

并利用 NX 8.0 软件完成三维建模与装配验证,最后在 ADAMS 2010 软件中进行虚拟样机仿真,虚拟样机仿真轨迹如图 6b 所示。为缩短零部件机械加工周期,加快样机研制速度,本文应用 3D 打印技术完成了机构主要零部件的加工,配合金属夹片和推秧装置,完成了物理样机的装配,并将其安装在试验台架上^[26],最终利用高速摄像试验验证其性能及轨迹和姿态。

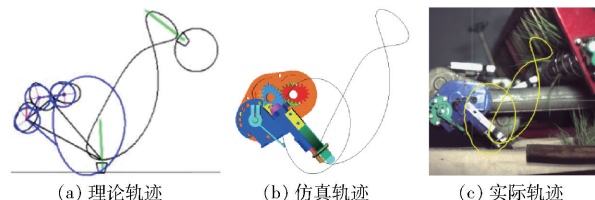


图 6 理论轨迹、虚拟仿真轨迹和物理样机轨迹对比

Fig. 6 Comparison of theoretical, virtual simulation and physical prototype trajectories

通过 Phantom V5.1 高速摄像机及分析软件,对试验数据进行分析处理,获得样机的实际工作轨迹和姿态。将理论轨迹、虚拟仿真轨迹和物理样机的高速摄像轨迹进行分析对比可知,三者的运动轨迹与姿态基本保持一致,验证了移栽机构结构设计的可行性与合理性,如图 6 所示。由于虚拟样机仿真环境中电机初始运行瞬间机构产生振动和物理样机试验中的机器振动原因,轨迹会受到影响,但这些因素造成的误差均在合理范围内。

4.2 物理样机台架试验

为了进一步探究移栽机构的实际工作情况,对其进行台架性能试验研究。试验选用水稻品种为东农 428;育秧钵盘为常见塑料软质钵盘,其横向穴孔数为 14,纵向穴孔数为 29,下底面规格为 9 mm × 9 mm,上顶面规格为 17 mm × 17 mm,穴深为 17 mm;育秧基质成分为 40% 锯末 + 40% 黑土 + 10% 珍珠岩 + 10% 蛭石^[27]。在东北农业大学工程学院兼光型植物工厂实验室进行育秧,当秧龄达到 30 d 时,进行取苗试验、膜上开孔栽植试验及配合栽植试验。试验地点为东北农业大学工程学院农业机械化实验中心,以现有水稻钵苗移栽机为基础搭建试验台架,设定移栽机构顺时针旋转运动,转速为 50 r/min;由于轨迹中开孔穴口的尺寸直接影响栽植效果,根据理论与实际分析,穴口的尺寸与栽植株距呈正相关的关系,因此选取机构可栽插最大株距为 180 mm,土槽向右直线运动,速度为 0.15 m/s;对 3 盘共 1 218 株水稻钵苗进行取苗及膜上栽植试验,其中 2 盘钵苗用于取苗试验,1 盘钵苗用于膜上栽植试验。为衡量移栽机构的取苗与栽植试验的效果,设定了取苗成功率和膜上栽植成功率两项评价指标。

4.2.1 取苗试验

在取苗试验中,移栽机构能够在运行过程实现栽植臂夹片夹紧秧苗茎秆,并将钵苗单体全部拔出即为取苗成功。因此,通过取苗试验进行统计,结果表明:2 盘总计 812 株水稻秧苗的取苗试验中,成功取出的秧苗有 734 株,取苗成功率为 90.4%。分析影响机构取苗成功率的主要因素有:秧苗在生长后期出现连根粘连现象,导致拔取阻力的增大;秧根从秧盘底部窜出过多以及秧盘本身空穴;冬季育苗导致秧苗长势不佳,出现少量死苗。整体来说,该机构取苗效果良好,能够满足钵苗移栽取苗要求,机构取苗作业如图 7 所示。

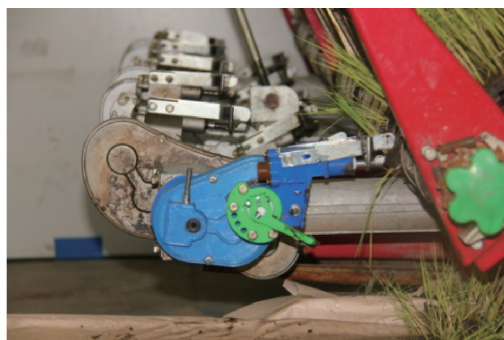


图 7 取苗试验

Fig. 7 Seedling pick-up experiment

4.2.2 膜上开孔栽植试验

膜上开孔栽植的关键在于所开膜孔长度和宽度能否满足钵苗栽植要求。针对所设计的开孔刀,分别选用了农业生产中常见的聚乙烯塑料地膜和可降解秸秆纤维地膜,将两种地膜先后铺设在可移动土槽中。机构转速保持不变,通过移动土槽模拟动态开孔栽植过程,对两种材质的地膜各重复 20 组试验,每组进行 4 次试验,试验如图 8 所示。对膜孔长度和宽度进行测量,结果如表 1 和表 2 所示。

通过对以上试验数据分析可知,开孔刀对于塑料地膜和秸秆纤维地膜均能做到有效的开孔,所开膜孔的长度与宽度基本达到设计目标的要求,且开孔刀更容易在纤维地膜上形成适合水稻钵苗的穴孔。

在膜上开孔栽植试验中,移栽机构能够成功夹取秧苗并将钵苗栽植到所开膜孔中即为栽植成功。当地膜为秸秆纤维材料时,总取苗次数为 80 次,成功取出 76 株水稻,成功栽入所开秸秆纤维膜孔中的秧苗总数为 70 株,膜上栽植成功率为 87.5%;当地膜为聚乙烯塑料材料时,总取苗次数为 80 次,成功取出 74 株水稻,成功栽入所开聚乙烯塑料膜孔中的秧苗总数为 66 株,膜上栽植成功率为 82.5%。影响栽植成功率的主要原因包括钵苗或土钵本身原因导致的取苗或推秧失败以及 3D 打印材料的单臂作



(a) 秸秆纤维膜



(b) 聚乙烯塑料膜

图 8 两种类型地膜开孔试验

Fig. 8 Film breaking test of two types of mulching films

表 1 膜孔纵向长度试验数据

Tab. 1 Test data of longitudinal length of film holes

材质	膜孔纵向测量长度/mm					平均长度/mm	理论长度/mm
秸秆纤维	64.2	70.3	63.9	65.3	59.5	65.6	68.8
	73.2	61.4	64.6	62.8	68.1		
	67.3	65.8	66.4	69.5	70.4		
	62.4	61.7	63.2	64.7	66.5		
聚乙烯塑料	58.3	63.1	62.4	67.8	61.5	61.0	61.0
	68.6	64.7	60.2	58.8	56.7		
	55.9	57.4	59.2	61.6	63.7		
	62.1	58.5	60.6	59.2	59.1		

业机构未配置平衡块引起振动等,最终导致部分水稻秧苗无法栽入所开穴口中。

表 2 膜孔横向宽度试验数据

Tab. 2 Test data of transverse length of film holes

材质	膜孔横向测量宽度/mm					平均宽度/mm	理论宽度/mm
秸秆纤维	32.6	33.1	36.8	34.5	30.7	31.5	25.0
	31.9	32.3	22.6	27.4	35.2		
	31.4	34.7	33.4	35.2	28.4		
	30.5	33.4	23.5	26.9	34.6		
聚乙烯塑料	22.7	26.4	27.5	21.6	20.3	23.1	23.1
	23.8	24.2	19.4	22.1	24.7		
	21.4	27.5	25.3	23.9	18.8		
	24.3	22.5	18.2	24.6	23.3		

5 结论

(1)提出了一种步行式水稻钵苗膜上开孔移栽机构,结构简单、成本低,可一次性完成取苗、输送、膜上开孔和移栽一系列移栽工序。

(2)建立了机构运动学模型,并基于 Visual Basic 6.0 开发了移栽机构辅助分析优化设计软件,结合膜上栽植和钵苗移栽两种农艺要求,确立了优化目标,利用人机交互式的方法,最终得到了一组能够满足钵苗膜上移栽要求的机构参数。

(3)进行了虚拟仿真验证,完成了物理样机试制,开展高速摄像台架试验,得到了样机的实际工作轨迹,通过对比分析得到理论轨迹、虚拟仿真轨迹和物理样机轨迹基本一致,验证了移栽机构设计的正确性。

(4)完成了试验所需水稻秧苗的培育工作,进行了取苗试验、膜上开孔试验以及配合栽植试验,其中取苗成功率为 90.4%,秸秆纤维地膜和塑料地膜栽植成功率分别为 87.5% 和 82.5%,所开膜孔的长度与宽度效果良好,试验结果证明了所设计移栽机构的实用性。

参 考 文 献

[1] 张玉良. 水稻覆膜机械装置的结构研究与设计[J]. 农业与技术, 2014, 34(5): 50-51.

[2] 于潇泽, 车庄, 刘金波. 水稻覆膜栽培机械化工艺分析与研究[J]. 农业科技与装备, 2011(6): 76-78.

YU Xiaozhe, CHE Zhuang, LIU Jinbo. Analysis and research into mechanized rice film-covered cultivation technique [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(6): 76-78. (in Chinese)

[3] 刘洋, 张玉焯, 王学华, 等. 水稻覆膜栽培研究现状与展望[J]. 湖南农业科学, 2009(2): 55-58.

LIU Yang, ZHANG Yuzhu, WANG Xuehua, et al. Status quo and prospect for film-covering cultivated rice [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(2): 55-58. (in Chinese)

[4] 任文涛, 辛明金, 林静, 等. 水稻纸膜覆盖种植技术节水控草效果的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 60-63.

REN Wentao, XIN Mingjin, LIN Jing, et al. Experimental study on effect of paper-mulching rice planting technology on saving water and controlling weeds [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 60-63. (in Chinese)

[5] 沈康荣. 水稻与莲藕覆膜节水高效技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[6] 何代元. 水稻地膜覆盖增产原因及主要栽培技术[J]. 中国稻米, 1997(3): 21.

[7] 焦海坤, 郭洪宇, 杨作洲. 快速插秧机用水稻覆膜机械装置的设计与研究[J]. 农民致富之友, 2015(22): 232-233.

[8] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44–53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [9] 永田雅輝, 日吉健二, 梅崎輝尚, 等. 早期水稻のマルチ栽培用田植機に関する基礎研究(第1報): ナイフ式マルチ穴開け機構の開発[J]. 農業機械學會誌, 1998, 60(1): 19–26.
- [10] 日吉健二, 永田雅輝, 梅崎輝尚, 等. 早期水稻のマルチ栽培用田植機に関する基礎研究(第2報): ナイフ式マルチ穴開け機構の理論的解析[J]. 農業機械學會誌, 1998, 60(2): 11–18.
- [11] 日吉健二, 永田雅輝, 梅崎輝尚, 等. 早期水稻のマルチ栽培用田植機に関する基礎研究(第3報): マルチ栽培用田植機の試作と圃場性能試験[J]. 農業機械學會誌, 1998, 60(4): 13–22.
- [12] 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)
- [13] 焦海坤, 周凌宇, 李京虎. 快速覆膜插秧机地膜开口装置设计与分析[J]. 农民致富之友, 2015(22): 224–225.
- [14] 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.
- [15] XIN L, LV Z, WANG W, 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.
- [16] 李福生, 尹种芳, 张遵连, 等. 非圆齿轮与特种齿轮传动设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [17] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [18] 宋志超. 基于帕斯卡蜗线齿轮水稻钵苗移栽机构的设计及优化[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. SONG Zhichao. Design and optimization of rice seedling transplanter mechanism based on pascal spiral gear [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [20] 龚沛曾, 杨志强, 陆慰民. Visual Basic 程序设计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [21] 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)
- [22] 代丽, 孙良, 赵雄, 等. 基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 35–42. DAI Li, SUN Liang, ZHAO Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 35–42. (in Chinese)
- [23] 瞿彬, 王凤林. Visual Basic 程序设计全程指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [24] 陈建能, 王英, 黄前泽, 等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52–56. CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 52–56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.009. (in Chinese)
- [25] 陈建能, 叶军, 赵华成, 等. 高阶变偏心共轭非圆齿轮的凹凸性及根切判别[J]. 中国机械工程, 2014, 25(22): 3028–3033. CHEN Jianneng, YE Jun, ZHAO Huacheng, et al. Concavity and tooth undercutting of high-order deformed eccentric conjugate non-circular gears [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(22): 3028–3033. (in Chinese)
- [26] 宫成宇. 多功能钵苗移栽试验台设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. GONG Chenyu. Test-bed design and experiment research on multi-function transplanting machine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [27] 赵立军, 陈海涛, 蔡晓华, 等. 密闭式立体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)