



伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构设计与试验

张荣榜^a, 周誉株^a, 徐豪聪^a, 孙良^{a,b}, 俞高红^{a,b}

(浙江理工大学, a. 机械工程学院; b. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 针对现有夹苗式水稻钵苗移栽机构在取苗时因穴盘中秧苗长度、位置、粗细以及每穴成苗量不一致使得夹苗部位存在差异而导致秧苗直立度降低的问题, 设计了一种伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构。该机构在到达植苗点推秧时, 秧苗土钵相对泥面的上下栽植运动会优先于水平相对运动, 保证了秧苗土钵入土的直立性。对该机构开展了目标轨迹设计和结构设计, 对非圆齿轮行星轮系和栽植臂伸缩机构进行了运动学分析, 结合水稻钵苗移栽的农艺要求确定了优化目标, 建立了优化目标数学模型, 开发了参数优化辅助设计软件; 分析了不同机构参数对移栽轨迹的影响, 并通过人机交互的方式得到了一组满足移栽机构工作要求的机构参数。开展了仿真试验和实物样机移栽试验, 结果表明: 实物样机轨迹、仿真轨迹和理论轨迹基本一致, 且试验测量参数与理论参数误差均在 2.5% 内。该研究提出的伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构, 降低了泥面对被栽秧苗的水平折弯现象, 大幅提高了秧苗的直立度, 为水稻钵苗移栽机构在提升秧苗直立度方面的研发提供一种新思路, 也可作为夹苗式水稻钵苗移栽机的后续研究提供借鉴。

关键词: 水稻钵苗; 伸缩取栽; 参数优化; 运动学分析; 移栽试验

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2024)09-0651-12

引文格式: 张荣榜, 周誉株, 徐豪聪, 等. 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(5): 651-662.

Reference Format: ZHANG Rongbang, ZHOU Yuzhu, XU Haocong, et al. Design and experiment of a telescopic rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(5): 651-662.

Design and experiment of a telescopic rice pot seedling transplanting mechanism

ZHANG Rongbang^a, ZHOU Yuzhu^a, XU Haocong^a, SUN Liang^{a,b}, YU Gaohong^{a,b}

(a. School of Mechanical Engineering; b. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing seedling-type rice pot seedling transplanting mechanism reduces the uprightness of seedlings due to the inconsistency of seedling length, position, thickness and the amount of seedlings per hole in the tray when people pick up seedlings, a telescopic rice pot seedling transplanting mechanism was designed. When the mechanism reaches the planting point to push the seedlings, the up and down planting movement of the seedling soil bowl relative to the mud surface will take precedence over the horizontal relative movement, which ensures the uprightness of the seedling soil bowl into the soil. The target trajectory design and structural design of the mechanism were carried out. The kinematics analysis of the non-circular gear planetary gear train and the planting arm telescopic mechanism was carried out. The optimization target was determined according to the agronomic requirements of rice pot seedling transplanting. The mathematical model of the optimization target was established, and the parameter optimization aided design software was developed. The influence of

收稿日期: 2024-03-26 网络出版日期: 2024-06-12

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2001800); 国家自然科学基金项目(52375275); 浙江省重点研发计划(2022C02034)

作者简介: 张荣榜(1997—), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事农业机械设计方面的研究。

通信作者: 孙良, E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

different mechanism parameters on the transplanting trajectory was analyzed, and a set of mechanism parameters meeting the working requirements of the transplanting mechanism was obtained through human-computer interaction. The simulation test analysis and physical prototype test of the mechanism were carried out. The test results showed that the trajectory of the physical prototype, the simulation trajectory and the theoretical trajectory were basically the same, and the error between the experimental measurement parameters and the theoretical parameters was within 2.5%. Through the proposed telescopic planting rice pot seedling transplanting mechanism, the horizontal bending phenomenon of the mud surface to the planted seedlings was reduced, and the uprightness of the seedlings was greatly improved. It can not only provide a new research idea for the research and development of rice pot seedling transplanting mechanisms in improving the uprightness of seedlings, but also provide reference for the follow-up research of clip seedling rice pot seedling transplanting machines.

Key words: rice pot seeding; telescopic planting; parameter optimization; kinematic analysis; transplanting experiment

0 引 言

水稻钵苗移栽技术具有不伤根^[1]、返青快、分蘖早^[2]、分蘖节位低^[3]等特点,可有效提高水稻的品质和产量^[4-6],是农业农村部主推的农业技术^[7]。水稻钵苗移栽方式主要有抛栽^[8-10]、摆栽^[11]和移栽。抛栽方式的特点是植苗较浅,秧苗损伤轻,但是抛栽下落秧苗姿态不可控,秧苗直立度相对较差,影响后续秧苗返青及产量;摆栽方式是通过多套机构的前后接力来完成钵苗从秧盘到水田栽植的整个过程,具体动作有“顶”“接”“送”“栽”等,摆栽采用的机械结构比较复杂,尤其是秧苗钵盘使用成本较高,在一定程度上限制了技术的推广^[12-14];水稻钵苗移栽方式是用一套移栽机构来完成“夹”“拔”“带”“栽”等系列动作,具有结构简单、作业效率高等特点。

为了实现理想的取苗轨迹和作业姿态,已有研究人员提出了多种类型的水稻钵苗移栽机构。Zhou等^[15]提出了一种贝塞尔齿轮轮系水稻钵苗移栽机构,然而该机构齿轮箱最大回转半径过大,会在作业过程中使齿轮箱壳体与水田发生接触,导致秧苗直立度低;赵匀等^[16]提出了一种拟合齿轮五杆机构,该机构结构简单、取苗效果好,但是受限于连杆机构的传动特性,该机构不能高速运转,移栽效率较低;叶秉良等^[17]提出了一种不完全非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构,然而该机构由于采取了凹凸锁止弧,在高速运转下会产生刚性冲击和振动,导致取苗率低。

综上可知,现有齿轮连杆式或轮系式移栽机构虽然可以较好地完成水稻钵苗的移栽,但均采用夹茎秆拔取来取苗,且穴盘中秧苗长度、位置、粗细以及每穴成苗量等不一致,导致夹苗部位存在差异,致

使植苗过程中土钵与泥面接触,产生横向滑动,降低了秧苗的直立度。因此,本文针对该问题,设计了一种伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构,以提高秧苗的直立度;对移栽机构进行了运动学分析、参数优化以及仿真实验和实物样机试验,以验证该机构的正确性和可行性。本文可为夹苗式水稻钵苗移栽机构在提升秧苗直立度方面的研发提供新思路。

1 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构设计

1.1 移栽机构的轨迹设计

现有的移栽机构栽植秧苗的运动过程可分为 3 个阶段,示意图如图 1(a)所示。阶段 1,秧苗在秧箱中被移栽机构取出后,秧苗在栽植臂夹片的夹持下按照预先设计好的运动轨迹和姿态向下运动;阶段 2,当被夹持的秧苗运动到距离秧田表面 20 mm 高时,由于土钵的高度为 20 mm,因此土钵会因为碰撞地面而导致秧苗整体发生一定程度的倾斜;阶段 3,秧苗继续向下运转至植苗点时,土钵在倾斜的状态下被机构栽植进秧田,导致秧苗的直立度较差。

本文设计的移栽机构栽植秧苗的运动过程也分为 3 个阶段,示意图如图 1(b)所示。阶段 1,秧苗在伸缩取栽式栽植臂的夹持下按照目标轨迹和目标姿态向下运动;阶段 2,秧苗在栽植臂的夹持下沿着目标轨迹继续向植苗点运转;阶段 3,由于采用了伸缩式栽植,因此移栽机构在植苗点处有一段向下的“尖嘴形”轨迹,若这段轨迹的高度 $h > 20\text{ mm}$,秧苗在运送的过程中就不会碰撞到秧田,会始终以目标姿态完成推秧,且相对于泥面,推秧时秧苗土钵的上下栽植运动会优先于水平相对运动,通过减少秧田对被栽植秧苗的水平折弯现象,提高秧苗的直立度。

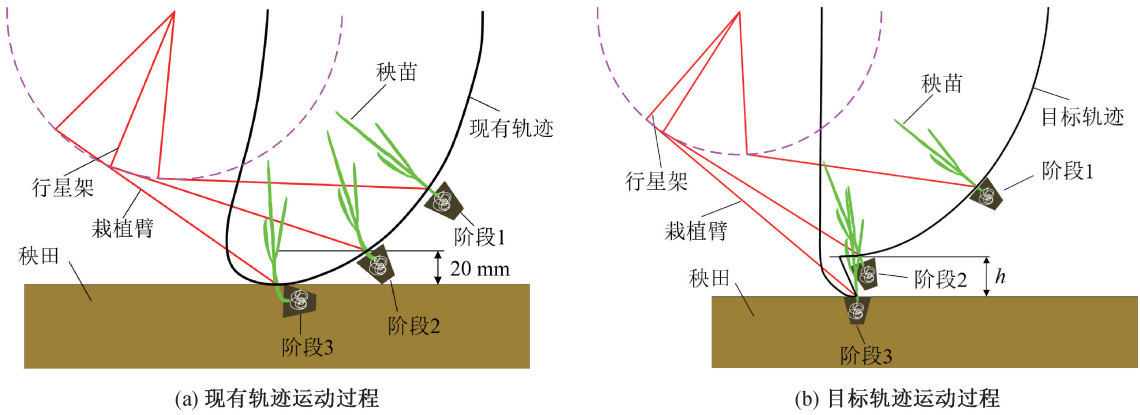
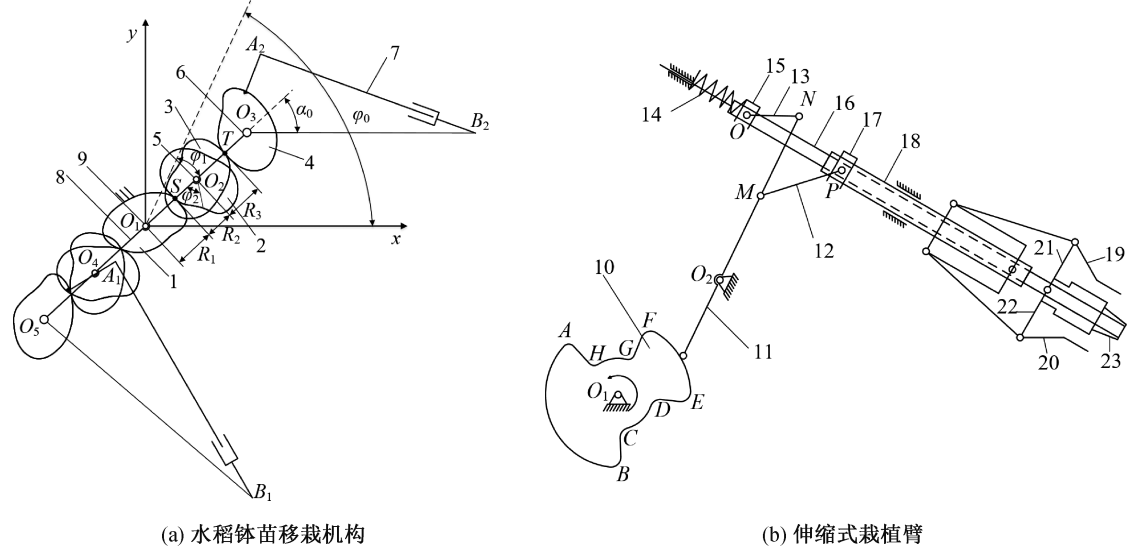


图 1 现有轨迹与目标轨迹移栽运动过程示意图

1.2 移栽机构的结构和工作原理

伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的结构示意图如图 2(a) 所示。该机构由非圆齿轮传动机构和伸缩式栽植臂两部分组成,有 7 个非圆齿轮和 2 个栽植臂。太阳轮 1 固定于机架,第一中间轮 2 和第二中间轮 3 与中间轴 6 固定连接,其中第一中间轮 2 和太阳轮 1 相互啮合,第二中间轮与行星轮 4 相互啮合;行星轮 4 和栽植臂 7 固结在行星轴上。机构工

作时,由于 7 个非圆齿轮呈对称布置,所以 2 个栽植臂所经过的空间位置重合,因此本文取单侧栽植臂的运动进行分析。当移栽机构开始运转时,太阳轮 1 固定不动,中心轴 6 带动行星架 8 转动,动力经由与太阳轮 1 相互啮合的第一中间轮 2 传递至围绕同一轴旋转的第二中间轮 3,再由第二中间轮 3 传递至与其相互啮合的行星轮 4,行星轮 4 的动力经由与行星轴 5 固定的栽植臂 7 发生转动。



1. 太阳轮;2. 第一中间轮;3. 第二中间轮;4. 行星轮;5. 行星轴;6. 中间轴;7. 栽植臂;8. 行星架;9. 中心轴;10. 凸轮;11. 拨叉;12. 拨叉右连杆;13. 拨叉左连杆;14. 弹簧;15. 弹簧座;16. 实心杆;17. 连接块;18. 空心杆;19. 左夹片;20. 右夹片;21. 夹片左连杆;22. 夹片右连杆;23. 推苗块

图 2 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构结构示意图

伸缩式栽植臂的结构示意图如图 2(b) 所示。凸轮 10 与行星架固定连接,绕着 O_1 点做圆周运动,通过与拨叉 11 接触,控制前端的左夹片 19 和右夹片 20 张开闭合实现取苗和植苗动作。拨叉绕着 O_2 点做往复摆动,拨叉一端与凸轮轮廓接触;另外一端通过拨叉右连杆 12 和拨叉左连杆 13,分别与实心杆 16 和空心杆 18 相连,实心杆 16 套在空心杆

18 内部。左夹片 19 和右夹片 20 分别与空心杆 18 上端的固定座和夹片左连杆 21 与夹片右连杆 22 连接,夹片左连杆 21 与夹片右连杆 22 又与推苗块 23 连接。当拨叉从凸轮 GH 段运动到 AB 段时,实心杆 16 和空心杆 18 推动弹簧 14 向后运动压缩弹簧,并带动左夹片 19 和右夹片 20 闭合进行取苗;当拨叉从凸轮 AB 段运动到 CD 段时,被压缩的弹簧 14

推动弹簧座 15 以及空心杆 18 和实心杆 16 向前运动,在到达植苗点时左夹片 19 和右夹片 20 张开,空心杆 18 往前探出,实心杆 16 做推苗动作。 GH 段为预夹苗段,左夹片 19 和右夹片 20 始终处于打开状态,直到下次取秧。最终栽植臂夹片上的尖点运动形成了植苗点以上为“8”字形和植苗点以下为“尖嘴形”的移栽轨迹。

2 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构运动学分析

2.1 移栽机构的运动学模型

以上述伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的单侧为例建立运动学模型。以行星架回转中心 O_1 为机构的坐标原点,建立全局坐标系 O_1xy (见图 2(a))。由于非圆齿轮节曲线为的不规则封闭图形,因此转角 φ 的范围为 $[0, 2\pi]$ 。因为太阳轮 1 与第一中间轮 2 为互相啮合的齿轮,所以齿轮的转角同时完成,即两者之间存在的对应关系为 $\varphi_2 = F(\varphi_1)$; 当 $\varphi_2 = 0$ 时 $\varphi_1 = 0$, 当 $\varphi_2 = 2\pi$ 时 $\varphi_1 = 2\pi$ 。通过上述转角关系,设定太阳轮 1 与第一中间轮 2 的传动比函数为 i_{12} , 用式(1)^[18]表示为:

$$\begin{cases} i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \left(\frac{d\varphi_1}{dt} \right) / \left(\frac{d\varphi_2}{dt} \right) = f(\varphi_1), \\ f(\varphi_1) = 1/F'(\varphi_1) \end{cases} \quad (1)$$

其中: ω_1 为太阳轮 1 的自转角速度; ω_2 为第一中间轮 2 的自转角速度; φ_1 为某一时刻行星架 8 相较于初始相位转过的角位移; φ_2 为第一中间轮 2 相对于行星架 8 的角位移。

由于太阳轮 1 与第一中间轮 2 之间的中心距为 $l_a/2$, 此时两个非圆齿轮的瞬时传动比可用式(2)表示:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = l_a/2, \\ i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_a/2 - R_1}{R_1} \end{cases} \quad (2)$$

其中: l_a 为太阳轮 1 旋转中心 O_1 到行星轮 4 旋转中心 O_3 距离; R_1 为太阳轮 1 旋转中心 O_1 到啮合点 S 的距离; R_2 为啮合点 S 到第一中间轮 2 旋转中心 O_2 的距离。

由式(2)可以得到:

$$R_1(\varphi_1) = \frac{l_a/2}{1 + i_{12}} = \frac{l_a/2}{1 + f(\varphi_1)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,可以得到:

$$\begin{cases} R_2 = l_a/2 - R_1(\varphi_1) = \frac{l_a/2 \cdot i_{12}}{1 + i_{12}}, \\ \varphi_2 = \int_0^{\varphi_1} \frac{1}{i_{12}} d\varphi_1 = \int_0^{\varphi_1} \frac{1}{f(\varphi_1)} d\varphi_1 \end{cases} \quad (4)$$

由于第一中间轮 2 和第二中间轮 3 同时固连在中间轴 6, 因此单位时间内产生的角位移相同, R_3 的大小同理可得。

建立夹苗片尖点 B_2 的运动学位移方程, 其中中间轮(包括第一中间轮 2 和第二中间轮 3)旋转中心 O_2 的位移为:

$$\begin{cases} x_{O_2} = \frac{l_a}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_0), \\ y_{O_2} = \frac{l_a}{2} \sin(\varphi_1 + \varphi_0) \end{cases} \quad (5)$$

行星轮 4 旋转中心 O_3 的位移为:

$$\begin{cases} x_{O_3} = l_a \cos(\varphi_1 + \varphi_0), \\ y_{O_3} = l_a \sin(\varphi_1 + \varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

太阳轮 1 和第一中间轮 2 的啮合点 S 的位移为:

$$\begin{cases} x_S = R_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_0), \\ y_S = R_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_0) \end{cases} \quad (7)$$

第二中间轮 3 与行星轮 4 的啮合点 T 的位移为:

$$\begin{cases} x_T = \left(\frac{l_a}{2} + R_3 \right) \cos(\varphi_1 + \varphi_0), \\ y_T = \left(\frac{l_a}{2} + R_3 \right) \sin(\varphi_1 + \varphi_0) \end{cases} \quad (8)$$

夹苗片尖点 B_2 的位移为:

$$\begin{cases} x_{B_2} = x_{O_3} + l_b \cos(\varphi_1 + \varphi_0 + \alpha_0), \\ y_{B_2} = y_{O_3} + l_b \sin(\varphi_1 + \varphi_0 + \alpha_0) \end{cases} \quad (9)$$

其中: l_b 为行星轮 4 旋转中心 O_3 到夹苗片尖点 B_2 的距离; φ_0 为行星架 8 相对于地面的初始相位; α_0 为栽植臂 7 相对于行星架 8 的初始安装角; R_3 为第二中间轮 3 旋转中心 O_2 到啮合点 T 的距离。

2.2 栽植臂伸缩机构的运动学分析

伸缩机构是伸缩取栽式栽植臂实现植苗点自动伸缩植苗的关键核心执行机构, 伸缩机构的设计关系到最终栽植秧苗效果的好坏。本文设计的伸缩机构的结构示意图如图 3 所示。该机构由两套偏置摆杆滑块机构 O_2MP 和 O_2NO 组合而成, 偏置摆杆滑块机构 O_2MP 主要用于控制伸缩式栽植臂空心杆的伸缩, 偏置摆杆滑块机构 O_2NO 主要用于控制实心杆向外伸出实现推苗动作, 其中图 3 虚线部分的 $O_2M_1P_1$ 和 $O_2N_1O_3$ 为两套偏置摆杆滑块机构在运动到极限位置下的状态。

图 3 中滑块 I 和滑块 II 表示的是栽植臂在夹紧秧苗状态下的实心杆和空心杆的位置, 滑块 III 和滑块 IV 表示的是栽植臂在完全推出秧苗状态下的实心杆和空心杆的位置; 连杆 MP 和连杆 NO 表示拨叉

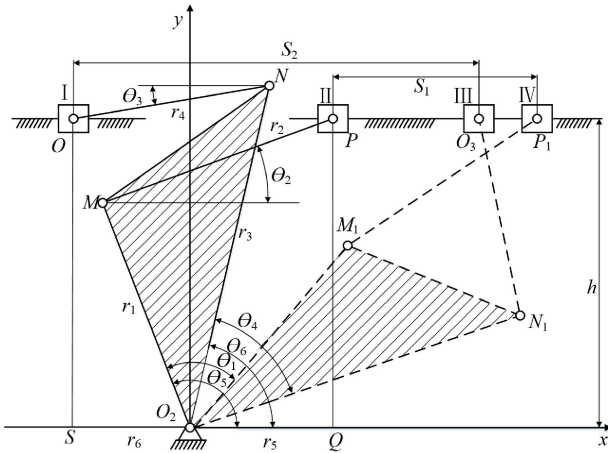


图 3 伸缩机构结构示意图

左右连杆;构件 O_2MN 表示拨叉,由于 O_2MN 将两摆杆固接为一个构件,所以 θ_1 和 θ_4 的大小相等。

设摆杆 r_3 的转角为 θ_x ,则偏置摆杆滑块机构 O_2NO 的闭环矢量方程为:

$$\mathbf{R}_3 + \mathbf{R}_4 = \mathbf{H} + \mathbf{R}_6 \quad (10)$$

其中: \mathbf{R}_3 为摆杆 O_2N 之间的距离 r_3 的矢量表示形式; \mathbf{R}_4 为偏置摆杆滑块机构 O_2NO 连杆 r_4 的矢量表示形式; \mathbf{H} 为偏置距离 h 的矢量表示形式; \mathbf{R}_6 为滑块 I 的位置矢量表示形式。

将式(10)表示为复数形式:

$$r_3 e^{i(\theta_6 - \theta_x)} + r_4 e^{i\theta_3} = h e^{i\frac{\pi}{2}} + r_6 \quad (11)$$

其中: θ_3 为连杆转角大小; θ_6 为摆杆初始相位角。

分解矢量方程便可得到:

$$\begin{cases} r_3 \cos(\theta_6 - \theta_x) - r_4 \cos\theta_3 = r_6, \\ r_3 \sin(\theta_6 - \theta_x) - r_4 \sin\theta_3 = h \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)得:

$$\begin{cases} \theta_3 = \arcsin\left(\frac{r_3 \sin(\theta_6 - \theta_x) - h}{r_4}\right), \\ r_6 = r_3 \cos(\theta_6 - \theta_x) - r_4 \cos\theta_3 \end{cases} \quad (13)$$

消去参数 θ_3 可得出滑块 I 的位置 r_6 关于摆杆转角 θ_x 的函数关系为:

$$r_6(\theta_6 - \theta_x) = r_3 \cos(\theta_6 - \theta_x) - \sqrt{r_4^2 - (r_3 \sin(\theta_6 - \theta_x) - h)^2} \quad (14)$$

由于摆杆 r_1 和 r_3 固接为同一构件,因此设摆杆 r_1 的转角也为 θ_x ,则偏置摆杆滑块机构 O_2MP 的闭环矢量方程为:

$$\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 = \mathbf{H} + \mathbf{R}_5 \quad (15)$$

其中: \mathbf{R}_1 为摆杆 O_2M 之间的距离 r_1 的矢量表示形式; \mathbf{R}_2 为偏置摆杆滑块机构 O_2MP 连杆 r_2 的矢量表示形式; \mathbf{R}_5 为滑块 II 的位置矢量表示形式。

将式(15)表示为复数形式:

$$r_1 e^{i(\theta_5 - \theta_x)} + r_2 e^{i\theta_2} = h e^{i\frac{\pi}{2}} + r_5 \quad (16)$$

其中: θ_2 为连杆转角大小; θ_5 为摆杆初始相位角。

分解矢量方程便可得到:

$$\begin{cases} r_2 \cos\theta_2 - r_1 \cos(\theta_5 - \theta_x) = r_5, \\ r_1 \sin(\theta_5 - \theta_x) + r_2 \sin\theta_2 = h \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)得:

$$\begin{cases} \theta_2 = \arcsin\left(\frac{h - r_1 \sin(\theta_5 - \theta_x)}{r_2}\right), \\ r_5 = r_2 \cos\theta_2 - r_1 \cos(\theta_5 - \theta_x) \end{cases} \quad (18)$$

消去参数 θ_2 可得出滑块 II 的位移距离 r_5 关于摆杆转角 θ_x 的函数关系为:

$$r_5(\theta_5 - \theta_x) = -r_1 \cos(\theta_5 - \theta_x) + \sqrt{r_2^2 - (h - r_1 \sin(\theta_5 - \theta_x))^2} \quad (19)$$

移栽机构在运转过程中伸缩取栽式栽植臂有两种运动形式:一是同齿轮箱做整周匀速转动,二是相较于齿轮箱摆动。当动力经由凸轮传递到栽植臂时,拨叉 O_2MN 在凸轮的作用下左右摆动,拨叉摆动两个极限位置如图 3 所示。根据移栽轨迹可得出 θ_1 和 θ_4 的大小。

当拨叉在夹紧秧苗的位置时,偏置摆杆滑块机构处于初始状态,此时的摆杆摆动角度 θ_x 为 0,则滑块 I 和滑块 II 的起始位置为:

$$\begin{cases} r_6(\theta_6) = r_3 \cos\theta_6 - \sqrt{r_4^2 - (r_3 \sin\theta_6 - h)^2}, \\ r_5(\theta_5) = -r_1 \cos\theta_5 + \sqrt{r_2^2 - (h - r_1 \sin\theta_5)^2} \end{cases} \quad (20)$$

当拨叉在推出秧苗的位置时,偏置摆杆滑块机构处于极限状态,此时的摆杆摆动角度 θ_x 即为 θ_1 和 θ_4 ,则滑块 I 和滑块 II 的起始位置为:

$$\begin{cases} r_6(\theta_6 - \theta_4) = r_3 \cos(\theta_6 - \theta_4) - \sqrt{r_4^2 - (r_3 \sin(\theta_6 - \theta_4) - h)^2}, \\ r_5(\theta_5 - \theta_1) = -r_1 \cos(\theta_5 - \theta_1) + \sqrt{r_2^2 - (h - r_1 \sin(\theta_5 - \theta_1))^2} \end{cases} \quad (21)$$

因此两套偏置摆杆滑块机构的极限距离 S_1 和 S_2 为:

$$\begin{cases} S_2 = r_6(\theta_6 - \theta_4) - r_6(\theta_6), \\ S_1 = r_5(\theta_5 - \theta_1) - r_5(\theta_5) \end{cases} \quad (22)$$

又由于偏置摆杆滑块机构 O_2MP 主要用于控制空心杆伸缩式栽植臂的伸缩,偏置摆杆滑块机构 O_2NO 主要用于控制实心杆向外伸出实现推苗动作。由于秧苗土钵的高度为 20 mm,且植苗点存在

推秧角,所以本文设计的伸缩取栽式栽植臂要求机构至少向前伸出 30 mm;根据以往设计栽植臂的要求^[19],推苗距离要大于 20 mm 为优,由于实心杆套在空心杆内,即相当于推苗滑块 I (实心杆)要相对于滑块 II (空心杆)多滑动至少 20 mm,即:

$$l_{O_3P_1}=S_2-S_1>20$$

(23)

同时,若要使该机构为偏置式摆杆滑块机构,连杆 OP 和 MN 的条件为:

$$\begin{cases} r_1+r_2\geq h, \\ r_3+r_4\geq h \end{cases}$$

(24)

最终得到了一组满足栽植臂伸缩要求的机构参数,见表 1。

表 1 伸缩取栽式栽植臂摆杆滑块机构参数						
参数	r_1	r_2	r_3	r_4	S_1	S_2
参数值/mm	34.0	25.0	43.0	25.0	32.0	53.5

3 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构参数优化

3.1 参数优化目标

根据水稻钵苗移栽的农艺要求,机构要实现“8”字形的移栽轨迹,需要满足以下 7 个优化目标^[20-22]: a)两栽植臂不干涉;b)取苗角 $-5^\circ<\gamma_1<15^\circ$;c)推苗角 $45^\circ<\gamma_2<65^\circ$;d)角度差 $50^\circ<\gamma_3<60^\circ$;e)轨迹高度 $H_{总}>260$ mm 且栽植臂形成的尖嘴轨迹高度 $H_3>20$ mm;f)齿轮箱回转半径大小距地面高度 $H_4>20$ mm;g)环扣宽度 $W_1>30$ mm。

将上述的 7 个参数优化目标转化为数学模型,并利用软件编写计算机辅助可视化界面,通过可视化界面进行目标参数优选,提高了目标参数优化的效率,降低了优化难度。各优化目标数学模型如下。

a)两栽植臂不干涉。栽植臂易干涉位置示意图如图 4 所示,其中: O_i ($i=1, \dots, 5$) 为各非圆齿轮的转动中心, $O_3A_2B_2$ 和 $O_5A_1B_1$ 分别为上栽植臂和下栽植臂。在机构转动过程中,行星架做匀速圆周运动,两栽植臂相对行星架做不等速运动。当下栽植臂的夹片取苗点 B_1 和上栽植臂的后盖拐点 A_2 在同一水平面时,两栽植臂最容易发生干涉。因此,以 B_1A_2 之间的距离作为衡量是否发生干涉的准则。建立该优化目标的数学模型,可用式(25)表示:

$$\begin{cases} |y_{A_2}-y_{B_1}|<\lambda_1, \\ x_{A_2}-x_{B_1}=H_1 \end{cases}$$

(25)

其中: x_{A_2} 为上栽植臂的后盖拐点的横坐标; y_{A_2} 为上栽植臂的后盖拐点的纵坐标; x_{B_1} 为下栽植臂的

夹片尖点的横坐标; y_{B_1} 为下栽植臂的夹片尖点的纵坐标; λ_1 为无限小的正数。

当 $H_1<0$ 时,两栽植臂发生干涉;当 $H_1=0$ 时,两栽植臂处于刚好发生干涉的位置;当 $H_1>0$ 时,两栽植臂不发生干涉。

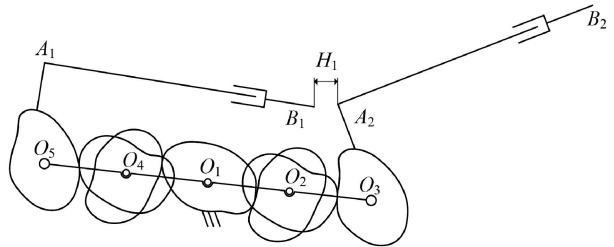


图 4 栽植臂易干涉位置示意图

b)取苗角 $-5^\circ<\gamma_1<15^\circ$,取苗角 γ_1 为上栽植臂 $O_3A_2B_2$ 中 A_2B_2 与水平面的夹角。移栽机构作业示意图如图 5 所示,机构在运动过程中,两栽植臂 $O_3A_2B_2$ 和 $O_5A_1B_1$ 沿移栽轨迹运动,当栽植臂到达取苗点时,栽植臂上的夹片闭合夹紧秧苗。建立该优化目标的数学模型,可用式(26)表示:

$$\gamma_1=\arctan\frac{y_{A_2}-y_{B_2}}{x_{A_2}-x_{B_2}}$$

(26)

其中: x_{B_2} 为上栽植臂的夹片尖点的横坐标; y_{B_2} 为上栽植臂的夹片尖点的纵坐标。

c)推苗角 $45^\circ<\gamma_2<65^\circ$,推苗角 γ_2 为下栽植臂 $O_5A_1B_1$ 中 A_1B_1 在轨迹最低点时与秧田水平面的夹角。移栽机构作业示意图如图 5 所示,当下栽植臂到达轨迹最低点时,栽植臂空心杆往外伸出,两夹片张开,实心推苗杆迅速将秧苗向下推出,完成推苗栽苗的动作。建立该优化目标的数学模型,可用式(27)表示:

$$\gamma_2=\arctan\frac{y_{A_1}-y_{B_1}}{x_{A_1}-x_{B_1}}$$

(27)

其中: x_{A_1} 为下栽植臂的后盖拐点的横坐标; y_{A_1} 为下栽植臂的后盖拐点的纵坐标;

d)角度差 $50^\circ<\gamma_3<60^\circ$,角度差 γ_3 是取苗角与推苗角的差值。为了保证在栽植后的秧苗具有较好的直立度,秧箱与水平方向的夹角大概为 50° 到 60° 之间。建立该优化目标的数学模型,可用式(28)表示:

$$\gamma_3=\gamma_2-\gamma_1$$

(28)

当角度差 γ_3 大于秧箱与水平面的夹角时,秧苗会出现前倾的现象;当角度差 γ_3 小于秧箱与水平面的夹角时,秧苗会出现后倒的现象;当角度差 γ_3 约等于秧箱与水平面的夹角时,秧苗具有较好的直立度。

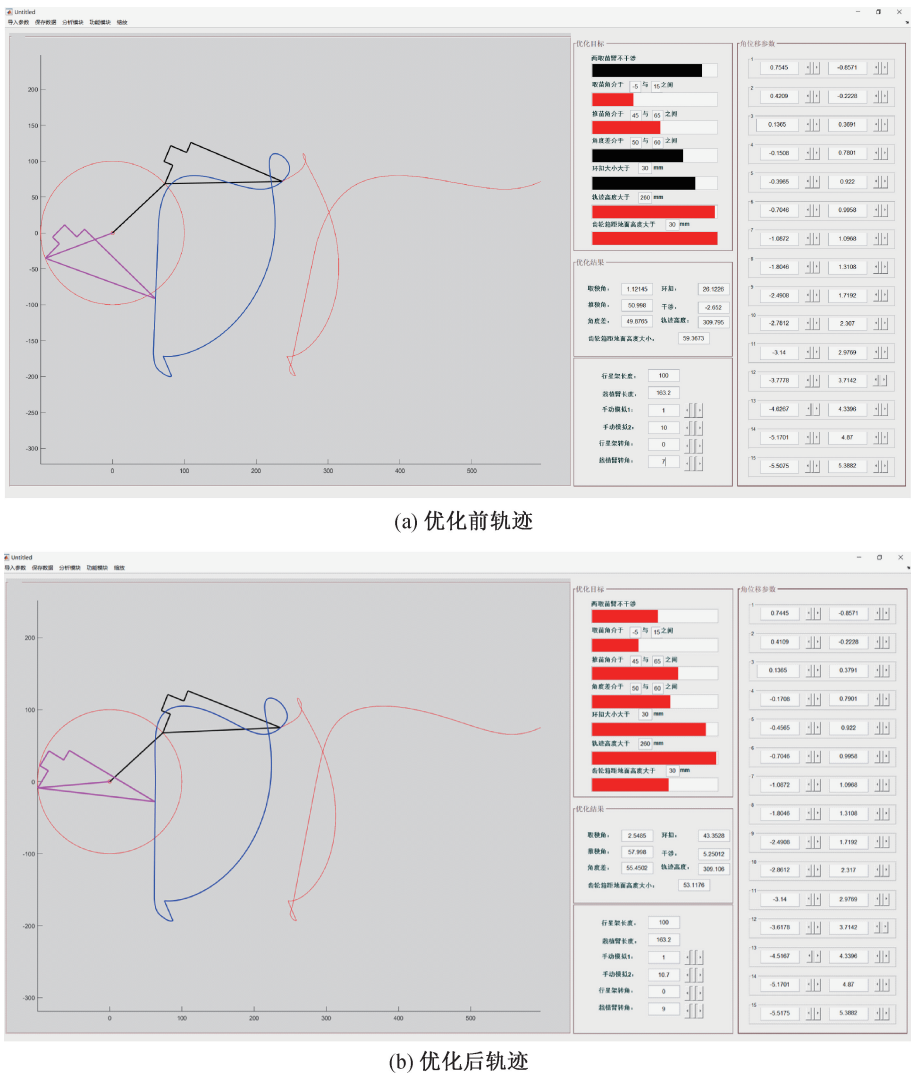


图 6 移栽机构参数优化辅助设计软件界面

a) φ_0 对移栽轨迹的影响。 φ_0 为起始位置时行星架相对于地面的安装角,通过改变 φ_0 的大小不会对轨迹产生任何影响, φ_0 对轨迹的主要影响是在植苗时秧苗的直立度。不同 φ_0 下的移栽轨迹如图 7(a)所示,图中的 3 条轨迹曲线分别表示 φ_0 在取 37° 、 42° 和 47° 时产生的轨迹。通过观察图 7(a)可以得出,随着 φ_0 的逐渐变大,轨迹呈现出逆时针转动的现象, φ_0 值越大,取秧角越小,轨迹的直立度越好。综合上述考虑,本文起始位置时行星架与 x 轴的夹角 $\varphi_0=42^\circ$ 。

b) α_0 对移栽轨迹的影响。 α_0 为凸轮回转中心到栽植臂夹苗片尖点之间的直线距离与行星架的夹角,即为栽植臂相对于非圆齿轮箱的初始安装角。改变 α_0 会直接影响着轨迹,其中最主要的是影响着轨迹的直立度和轨迹环扣宽度的大小。不同 α_0 时的移栽轨迹如图 7(b)所示,图中的 3 条轨迹曲线代表了 α_0 在取 35° 、 40° 和 45° 时,对应产生的三条不同

轨迹。通过观察图 7(b)可以得出,随着 α_0 的逐渐变大,轨迹整体向下移,轨迹环扣变小,轨迹直立度减小。综合上述考虑,本文中栽植臂相对于非圆齿轮箱的初始安装角 $\alpha_0=40^\circ$ 。

3.4 移栽机构优化结果

通过分析各个参数的变化对移栽机构轨迹的影响,利用人机交互的方式重复调节参数的大小,直至移栽机构轨迹和参数优化目标值满足要求。最终优选出一组满足要求的机构参数和 15 组角位移参数(表 2): $l_a=100\text{ mm}$, $l_b=163.2\text{ mm}$, $H_1=5.25\text{ mm}$, $\gamma_1=2.55^\circ$, $\gamma_2=58^\circ$, $\gamma_3=55.45^\circ$, $H_{\text{总}}=309.1\text{ mm}$, $H_3=25.2\text{ mm}$, $H_4=53.12\text{ mm}$, $W_1=43.35\text{ mm}$, $\alpha_0=40^\circ$, $\varphi_0=42^\circ$; 优选参数下的机构静轨迹、动轨迹、角位移曲线、传动比曲线(包括总传动比曲线和分配好的两级子传动比曲线)如图 8 所示,将得到的非圆齿轮的节曲线导入齿廓软件^[23-24]中得到的非圆齿轮齿廓信息如图 9 所示。

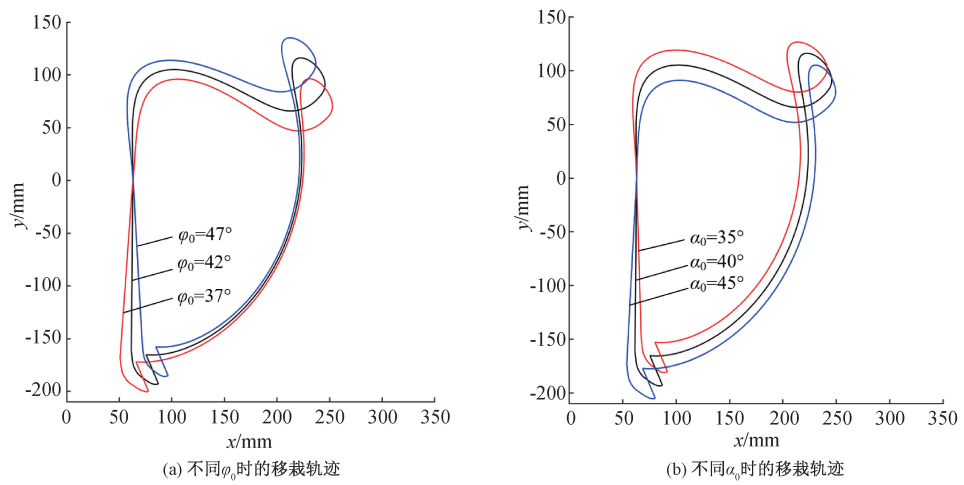


图 7 不同参数下的移栽轨迹示意图

表 2 拟合移栽轨迹角位移参数

序号	行星架角位移/rad	栽植臂角位移/rad	序号	行星架角位移/rad	栽植臂角位移/rad
1	0.7445	−0.8571	9	−2.4908	1.7192
2	0.4109	−0.2228	10	−2.8612	2.3170
3	0.1365	0.3791	11	−3.1400	2.9769
4	−0.1708	0.7901	12	−3.6178	3.7142
5	−0.4565	0.9220	13	−4.5167	4.3396
6	−0.7046	0.9958	14	−5.1701	4.8700
7	−1.0872	1.0968	15	−5.5175	5.3882
8	−1.8046	1.3108			

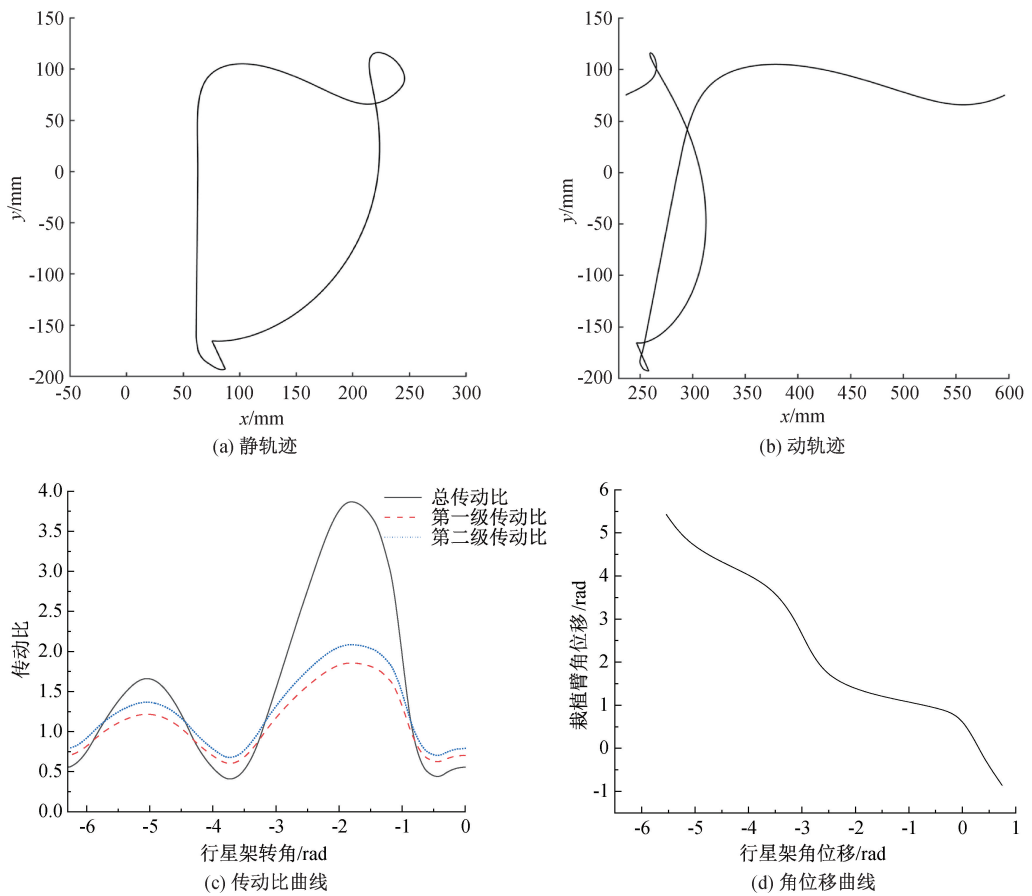


图 8 移栽机构最终优化结果示意图

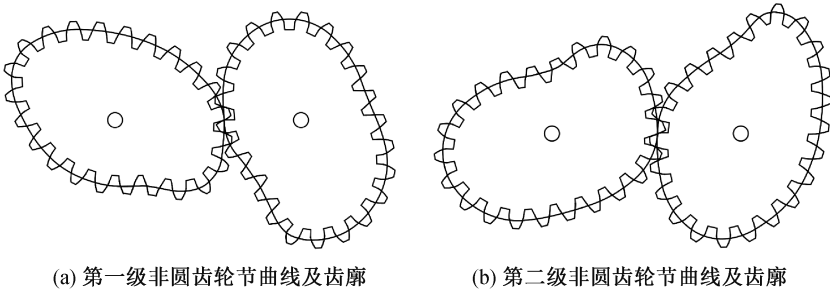


图 9 非圆齿轮节曲线及齿廓示意图

4 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构试验分析

4.1 仿真试验

根据参数优化得到的非圆齿轮齿廓线信息及运动学分析得到的栽植臂伸缩机构等设计参数,在三维建模软件完成伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的整体结构设计,并将设计好的伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构模型导入 ADAMS,进行虚拟样机仿真,以验证三

维模型设计的正确性。伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的仿真轨迹与理论轨迹如图 10 所示,将伸缩取栽式栽植臂夹苗片尖点轨迹导出,并与理论模型轨迹进行对比。从图 10 可以看出,仿真轨迹与理论轨迹基本相同,仅在虚线圈处有局部区别。这是因为机构在处于预夹苗状态时,栽植臂向外略微伸出,使得栽植臂的长度变长,属于正常范围内误差。这表明伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构结构设计和理论分析正确。

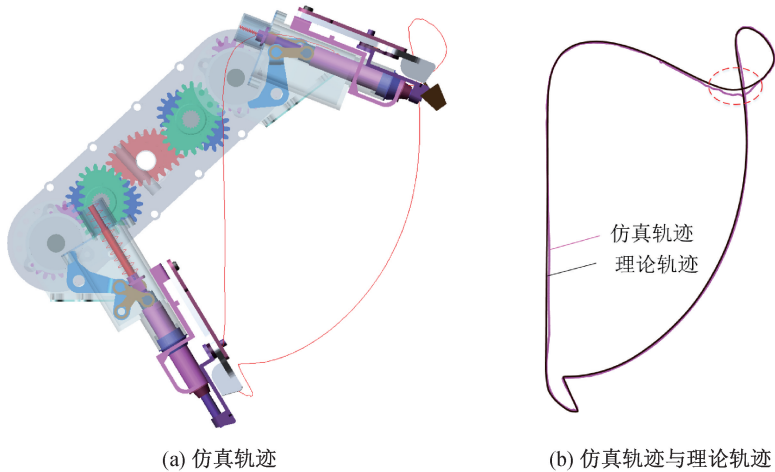


图 10 伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的仿真轨迹与理论轨迹示意图

秧苗土钵一个完整周期的仿真位移曲线如图 11 所示。图 11(a)为目前移栽机构植苗位移曲线图,由图可知,秧苗土钵在到达植苗点之前便低于泥面,因此秧苗土钵便会与泥面发生碰撞而导致土钵倾斜,使得栽植的秧苗直立度较差。图 11(b)为本文设计的伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构植苗位移曲线图,图 11(c)为伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构植苗位移曲线图在植苗点处的局部放大图,从图中可以看出:在植苗点时秧苗始终位于泥面之上,且在到达植苗点后,秧苗被迅速栽植入田,避免了秧苗土钵在植苗点之前与泥面发生碰撞接触。这表明本文设计的移栽机构避免了原有机构经过植苗点时泥面对被栽苗的水平折弯现象,提高了秧苗的直立度。

4.2 实物样机试验

为了进一步验证伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构

的正确性和可行性,加工了移栽机构的实物样机,并将其装配在试验台上开展台架试验。利用高速摄像机拍摄伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的完整工作周期的运转过程,并利用分析软件获得了移栽机构夹苗片尖点的运动轨迹,如图 12 所示。通过与理论轨迹对比可知,静轨迹基本一致。

理论设计与试验测量的机构关键参数如表 3 所示,由表可知,移栽机构的静轨迹推秧角、取秧角、角度差、环扣宽度、轨迹总高度、栽植臂不干涉距离、植苗点尖嘴轨迹高度、栽植臂实心杆和空心杆伸出距离误差均在 2.5%之内,故均满足设计要求。

植苗点前秧苗土钵与植苗点秧苗位置示例照片如图 13 所示。由图 13(a)可知,秧苗土钵在到达植苗点之前即将伸出推苗位置时,秧苗土钵并未与泥

面生接触,达到了本文的预期设计要求;由图 13(b)可知,机构在到达植苗位置后,在栽植臂伸缩机构的作用下,秧苗被伸出来的推秧杆栽植入土。移栽机

构通过伸缩式植苗的设计,避免了原有移栽机构在秧苗土钵到达植苗点前便被泥面水平折弯现象,提高了秧苗的直立度。

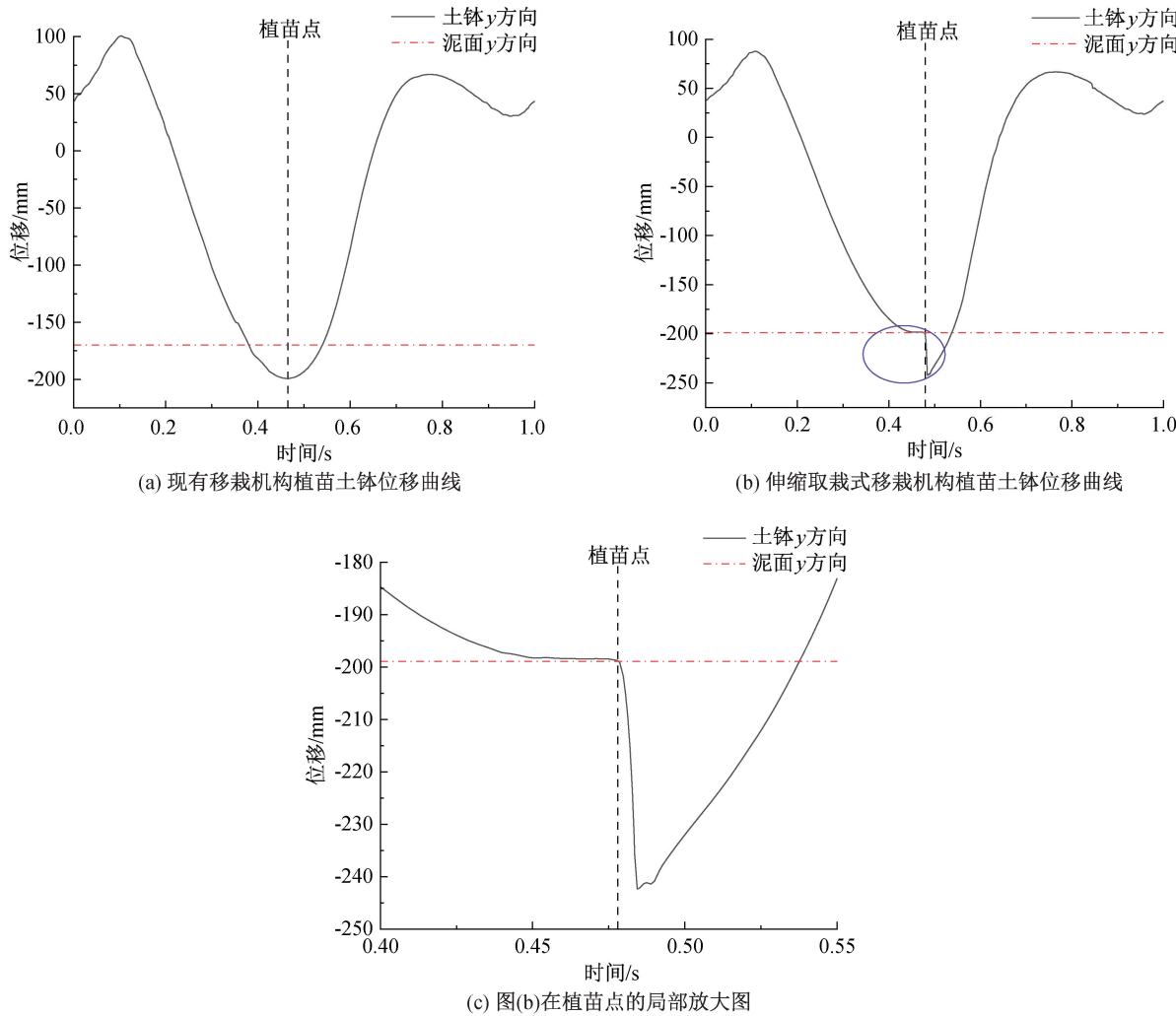


图 11 秧苗土钵仿真位移曲线对比示意图

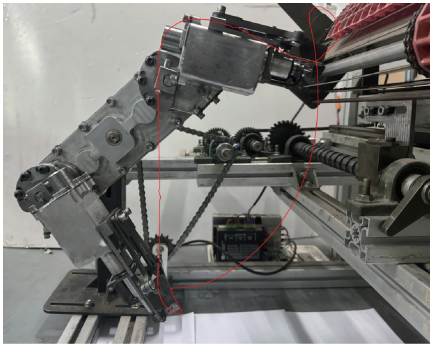


图 12 移栽机构实物样机试验静轨迹图

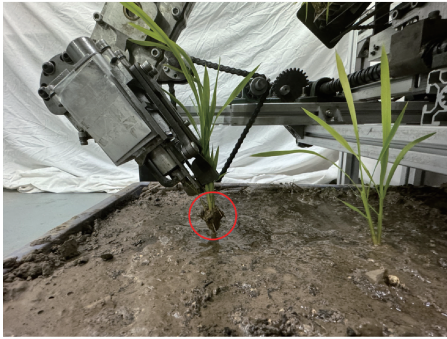
5 结 语

现有夹苗式水稻钵苗移栽机构在取苗时夹苗部位存在差异,导致秧苗土钵在到达植苗点时秧苗土钵与泥面因接触发生相对运动,降低了秧苗的直立度。本文针对该问题,提出了一种伸缩取栽式水稻

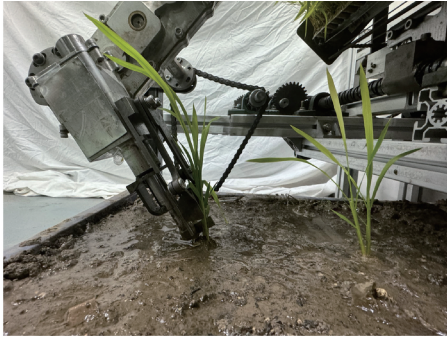
钵苗移栽机构,通过开展移栽机构的机构设计、运动学分析、参数优化、仿真实验与分析及实物样机试验,验证了伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构的正确性和可行性。

表 3 理论设计与试验测量关键参数

关键参数	理论设计值	试验测量值	误差率/%
推秧角/(°)	58.00	59.13	1.95
取秧角/(°)	2.55	2.52	1.18
角度差/(°)	55.45	56.61	2.09
环扣宽度/mm	43.35	42.74	1.41
轨迹总高度/mm	309.10	307.60	0.48
栽植臂不干涉距离/mm	5.25	5.18	1.33
实心杆伸出距离/mm	32.00	31.60	1.25
空心杆伸出距离/mm	53.50	52.70	1.49
植苗点尖嘴轨迹高度/mm	25.20	24.80	1.58



(a) 植苗点前秧苗土钵与泥面位置



(b) 植苗点秧苗位置

图 13 植苗点前秧苗土钵与植苗点秧苗位置示例照片

本文设计的伸缩取栽式水稻钵苗移栽机构,减少了泥面对被栽秧苗的水平折弯现象,大幅提升了秧苗的直立度,为夹苗式水稻钵苗移栽机构在提升秧苗直立度方面的研发提供了新思路,有助于推动夹苗式水稻钵苗移栽机的研究进程。

参考文献:

[1] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2023 年我国水稻产业形势分析及 2024 年展望[J]. 中国稻米, 2024, 30(2): 1-4.

[2] 兰蓉. 浅析水稻种植农机化技术应用[J]. 南方农机, 2024, 55(6): 68-70.

[3] 林洁葵. 乡村振兴背景下水稻机械化种植的发展现状与展望[J]. 当代农机, 2024(2): 41-42.

[4] 毛灿, 罗海峰, 朱毅, 等. 钵苗移栽机械研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 215-222.

[5] 徐廷波, 李梦寒. 水稻插秧机移栽机构研究现状[J]. 农业工程, 2023, 13(1): 12-16.

[6] 吴国环, 俞高红, 周海丽, 等. 三臂回转式水稻钵苗移栽机构反求设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 84-91.

[7] 农业农村部办公厅. 农业农村部办公厅关于扎实做好南方水稻机械化种植推进工作的通知: 农办机〔2022〕2 号 [A/OL]. (2022-03-14) [2024-03-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/21/content_5680206.htm.

[8] 纪要, 纪鸿波, 张文毅, 等. 水稻钵苗有序抛秧机精准送秧装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 12-17.

[9] 刘巧, 陈飞, 乔志东. 顶出式水稻有序抛秧机取秧系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(8): 94-100.

[10] 谷良田. 水稻抛秧机现状及发展分析[J]. 广西农业机械化, 2023(5): 24-29.

[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.

[12] 蔡金平, 刘木华, 林金龙, 等. 水稻钵苗移栽机构的设

计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 206-213.

[13] 成永芳. 日本 RX-6 型水稻钵苗移栽机引进试验简报[J]. 粮油加工与食品机械, 1999(3): 28.

[14] 修德龙, 范森. 两种日本水稻钵苗移栽机在垦区的对比试验[J]. 现代化农业, 2008(3): 37-38.

[15] Zhou M, Sun L, Du X, 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] 赵匀, 朱慧轩, 辛亮, 等. 拟合齿轮五杆水稻钵苗移栽机构的机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 12-21.

[17] 叶秉良, 吴国环, 俞高红, 等. 非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 68-73.

[18] 鲍李旭, 俞高红, 赵雄, 等. 青菜高密度移栽机植苗机构的设计与试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(1): 100-111.

[19] 叶秉良, 吴国环, 俞高红, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构移栽臂设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 45-52.

[20] 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.

[21] 周永清, 贺亮, 顾林. 基于虚拟样机的超级稻高速插秧机分插机构参数优化[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6): 62-66.

[22] 李革, 陈孝明, 俞高红, 等. 基于 VB 的旋转式分插机构运动干涉判别方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 44-47.

[23] Mundo D. Geometric design of a planetary gear train with non-circular gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(4): 456-472.

[24] 黄鹏, 李革, 曹宁慧. 基于节点切线平行线的非圆齿轮齿廓特征点求法[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(2): 240-244.