

水稻钵苗取栽协同作业式移栽机构设计与试验

谢世民¹ 周誉株¹ 薛晓迪¹ 朱广飞⁴ 孙良^{1,2,*} 陈建能^{1,3}

(¹ 浙江理工大学 机械工程学院, 杭州 310018; ² 浙江农业智能感知与机器人全省重点实验室, 杭州 310018; ³ 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 310018; ⁴ 台州市一鸣机械股份有限公司, 浙江 台州 318000; *通信联系人, email: liangsun@zstu.edu.cn)

Design and Experiment of an Integrated Picking and Planting Mechanism for Rice Pot Seedlings

XIE Shimin¹, ZHOU Yuzhu¹, XUE Xiaodi¹, ZHU Guangfei⁴, SUN Liang^{1,2,*}, CHEN Jianneng^{1,3}

(¹ School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; ² Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Intelligent Perception and Robotics, Hangzhou 310018, China; ³ Key Laboratory of Agricultural Equipment in Southeast Hilly and Mountainous Areas, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China; ⁴ Taizhou Yiming Machinery Co., LTD., Taizhou 318000, China; *Corresponding author, email: liangsun@zstu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】 In response to the problem that the existing integrated transplanting mechanism for picking and planting seedlings carries soil during operation, which affects subsequent seedling-picking and seedling-planting verticality, this study proposes a rice pot seedling transplanting method using dual mechanisms for seedling picking and planting. 【Method】 Firstly, based on the requirements for seedling picking, handover, and planting, several key pose points during the transplanting process were set as constraints for the picking and planting actions, and the motion trajectory was planned. Based on the principle of constant link length, a multi-position approximate motion synthesis model for a planar 2R mechanism was constructed. The particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to solve for the optimal layout of the two rotating pairs of the mechanism, determine the rod length, and establish geometric constraints for the handover section. By combining the positions of the rotating pairs and the rod length parameters, the motion trajectory was reconstructed to solve the relative angular displacement between the two components and obtain the non-circular gear transmission ratio. To improve the concavity and convexity of the non-circular gear pitch curves, an objective function for the roundness coefficient of the pitch curves was established. The PSO algorithm was used to optimize the roundness of the non-circular gears, thus completing the design of the two-wheel mechanism for seedling picking and planting. 【Result】 Simulation analysis and bench tests of the mechanism showed that the maximum deviation between the actual motion trajectory and the theoretical trajectory is less than 1.8 mm, the error in the key pose clamping angle does not exceed 1.2°, and the transplanting success rate can reach 88.7%. 【Conclusion】 This study adopts a cooperative operation mode with separated picking and planting, which can effectively solve the problem of poor transplanting effect caused by soil carry-over in traditional mechanisms, and provides a new theoretical basis for the development of efficient rice pot seedling transplanting equipment.

Key words: rice pot seedling transplanting mechanism; separation of planting and picking; motion synthesis; non circular gears; particle swarm optimization algorithm

摘 要: 【目的】针对现有取苗与栽植一体式移栽机构作业时夹带泥土影响二次取苗及秧苗栽插直立度的问题,本研究提出了一种取苗与栽植双机构协同作业的水稻钵苗移栽方式。【方法】首先,结合钵苗夹取、交接、栽植要求,设定移栽过程的若干关键位姿点作为取与栽植动作的约束条件,规划运动轨迹;依据杆长不变原理构建平面 2R 机构多位姿近似运动综合模型,采用粒子群优化(PSO)算法求解机构两转动副的最优布局,确定杆长,并建立了交接段的几何约束;结合转动副位置与杆长参数复演运动轨迹,求解两构件相对角位移,获取非圆齿轮传动比。为改善非圆齿轮节曲线凹凸性,建立节曲线圆度系数目标函数,利用 PSO 算法实现非圆齿轮圆度优化,完成取苗与栽植两轮系机构的设计。【结果】对机构的仿真分析与台架试验表明:机构实际运动轨迹与理论轨迹最大偏差小于 1.8 mm,关键位姿夹取角度误差误差不超过 1.2°,移栽成功率可达 88.7%。【结论】本研究采用取栽分离协同作业模式,可有效解决传统机构夹带泥土导致的移栽效果不佳问题,为高效水稻钵苗移栽装备研发提供了新的理论依据。

关键词: 水稻钵苗移栽机构; 取栽分离; 运动综合; 非圆齿轮; 粒子群算法

收稿日期: 2025-03-06; 修改稿收到日期: 2025-07-25。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2024YFD2000205); 国家自然科学基金资助项目 (52375275); 浙江省基金重大项目 (LD24E050007)。

目前,水稻移栽技术主要可分为毯苗插秧和钵苗移栽^[1-2]。毯苗插秧是将毯苗分割成小块再植入土壤,这一过程对秧苗根部损伤较大,缓苗时间长^[3-4]。钵苗移栽是将塑料钵盘里的秧苗移栽入土,每株秧苗都有独立土钵,具有对秧苗根部损伤小、秧苗返青发棵快等优点,有利于增产^[5-7]。

移栽机构作为移栽装备的核心执行单元,其性能直接决定作业的质量与效率。近年来,学者们对钵体苗移栽机构的研究逐渐增多。如俞高红等^[8]提出一种通过不完全非圆齿轮和偏心圆齿轮的啮合与凹凸锁止弧相互配合实现非匀速间歇传动的行星轮系移栽机构。赵匀等^[9]提出一种非圆齿轮驱动的五连杆机构式水稻钵苗移栽机构用于手扶式钵苗移栽机。辛亮等^[5]在此基础上增加开穴机构,并优化轨迹与姿态获得了一种水稻膜上移栽机构。周脉乐等^[10]针对扎穴式移栽机构破坏钵体完整性、穴口不对称等问题,提出一种交替实现打穴和栽植的探出式钵苗移栽机构。蔡金平等^[11]提出一种多连杆式机构取苗和输苗筒导苗组合的变行距水稻钵苗移栽机。上述各类移栽机构中,有的由于取栽一体式设计爪子易沾泥土后会影响二次夹苗;有的采用多连杆机构存在振动大、作业效率低的问题。而且取栽一体式移栽机构为形成移栽环扣,对机构传动比设计提出了较高的要求,一般通过引入不完全齿轮机构、凸轮机构来解决取、栽动作兼顾性问题,但往往又削弱了传动比的连续性。日本井关农机公司研发的水稻钵苗摆栽机^[12],采用顶秧、接秧、送秧、摆秧等 4 套机构配合实现移栽作业,存在机器复杂,使用成本高(秧盘贵),虽然被国内企业引进,但推广困难的问题。陈雄飞等^[13]设计了一种凸轮渐

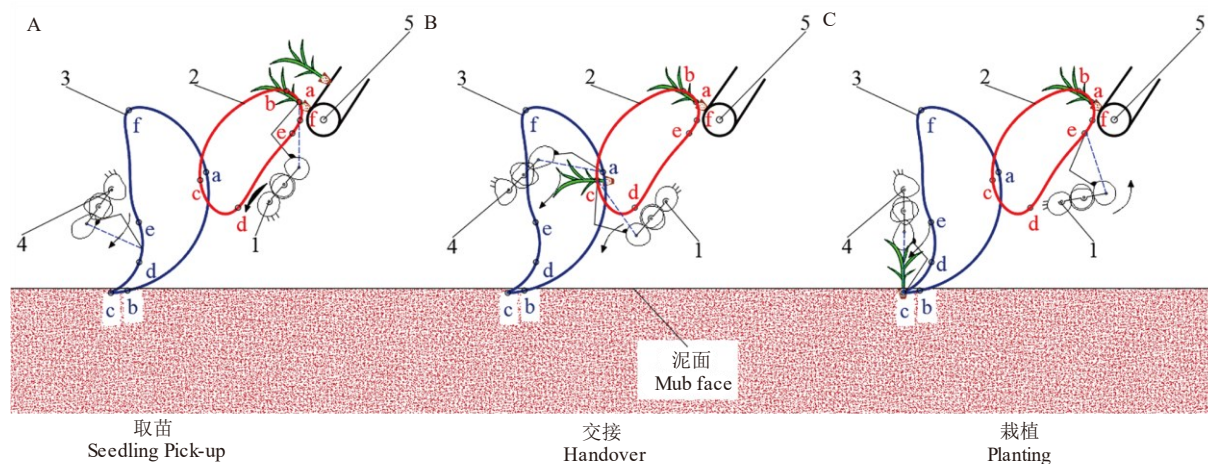
进顶出式取苗装置应用于水稻抛秧机,但抛秧落苗不可控,难以控制栽植深度与秧苗直立度^[14]。

为此,本研究突破传统取栽一体式的架构限制,通过解耦取苗与栽植工序,提出了一种夹苗式移栽机构和取栽分离协同作业模式,以实现水稻钵苗的定植立苗作业。主要研究内容包括:1)构建平面 2R 机构的双自由度运动综合模型,采用多位姿近似综合方法实现轨迹和姿态的协同优化,并根据 PSO 算法求解双转动副的最优位置参数;2)通过 PSO 算法优化非圆齿轮节曲线圆度,设计非圆齿轮行星轮取栽机构;3)搭建试验台进行效果验证实验。本研究可为水稻钵苗移栽机构装备开发提供新思路。

1 水稻钵苗移栽轨迹规划

本研究将传统的单个水稻钵苗移栽轨迹分解成两个移栽轨迹(取苗轨迹和栽植轨迹),一个完整的移栽周期依次涵盖取苗、交接、栽植三个阶段。在取苗阶段,取苗爪夹片闭合,取苗机构依照预定轨迹运动,精准地将秧苗从秧箱中取下,随后取苗机构夹持秧苗至交接位置。进入交接阶段,栽植机构夹片快速夹紧秧苗,将与取苗爪协同夹持秧苗一段特定距离至交接位置,到达交接位置后,取苗爪松开,以此完成秧苗的交接。随后栽植机构将秧苗运至栽植处,秧苗被准确植入泥土,至此完成整个移栽流程,移栽过程如图 1 所示。

根据水稻钵苗移栽机构的农艺要求,以及机构自身的运动特性,移栽轨迹需要满足以下条件:1)取苗机构在工作过程中不能与秧箱发生干涉。2)取



1: 取苗机构; 2: 取苗轨迹; 3: 栽植轨迹; 4: 栽植机构; 5: 秧箱。

1, Seedling picking mechanism; 2, Seedling picking trajectory; 3, Planting trajectory; 4, Planting mechanism; 5, Seedling tray.

图 1 取苗, 交接和栽植过程示意图

Fig. 1. Schematic diagram of seedling picking, handover, and planting process

表 1 取苗、栽植轨迹位姿点

Table 1. Posture points of seedling picking and planting trajectories

取苗位姿点							栽植位姿点						
Picking pose point	1	2	3	4	5	6	Transplanting pose point	1	2	3	4	5	6
$x(\text{mm})$	369.25	335.57	172.09	253.60	341.97	373.18	$x(\text{mm})$	185.65	28.47	0.00	49.68	30.45	26.10
$y(\text{mm})$	225.00	245.23	61.23	12.39	138.41	185.38	$y(\text{mm})$	67.50	-211.25	-215.00	-146.60	-36.10	172.78
$\theta(^{\circ})$	-90.00	-95.58	-55.00	-24.66	-63.43	-80.42	$\theta(^{\circ})$	180.00	91.01	90.00	146.57	178.01	-129.69

苗机构和栽植机构在各自工作期间，不能互相干涉。3)两机构在交接处预设的位姿点参数之间需存在特定的关联，以保证交接时秧苗的姿态相同(本研究在交接处秧苗的姿态为水平放置)。4)栽植机构在栽植动作完成后，需即刻沿远离秧苗的方向运动，避免将栽植好的秧苗打翻。5)栽植机构齿轮箱回转最低点应高于地面至少 4 cm。

基于上述要求，取苗轨迹和栽植轨迹具体规划如下：在取苗处，取苗轨迹预设 2 个位姿点以约束取苗姿态，从而更高效地将苗从钵中取出；在交接位置，取苗轨迹与栽植轨迹分别设置 1 个位姿点，以保证交接时秧苗的姿态一致性；在取苗轨迹下段设置 1 个位姿点以限定轨迹的整体尺寸；在取苗轨迹靠近秧箱的区段设置 2 个位姿点，避免与秧箱产生干涉；在栽植环节，鉴于秧苗直立度的重要性，预设 2 个位姿点用于调控立苗效果以及栽植轨迹的最低点；由于栽植机构在栽植完成后要立即沿远离秧苗方向运动，故在此预设 1 个位姿点避免对秧苗造成二次干扰；栽植轨迹在最左端和最上端各设定 1 个位姿点，用于把控轨迹的整体尺寸。

综上所述，取苗轨迹和栽植轨迹均通过 6 个位姿点来约束轨迹，两轨迹的 6 个关键位姿点详细信息列于表 1，其中 θ 表示移栽机构二杆与水平线正方向的夹角。

2 取栽双机构运动综合方法

2.1 机构参数求解

本研究构建的水稻钵苗取-栽协同作业式移栽机构，由非圆齿轮行星轮系和移栽执行部件两大部分组成。根据其工作原理，取苗机构和栽植机构均可简化为平面开链 2R 机构^[15-17]。

如图 2 所示，在连杆平面上随机选取两点 J 、 K ，连接构成直线 JK ， θ 是其姿态角，当明确了直线 JK 以及姿态角 θ 后，就能够确定连杆平面 π 的位置和姿态，其一系列位置和姿态以 $Q_i(x_{Qi}, y_{Qi}, \theta_i)$ 表示。在该机构中， P 为固定铰链点， Q 为动铰链点，

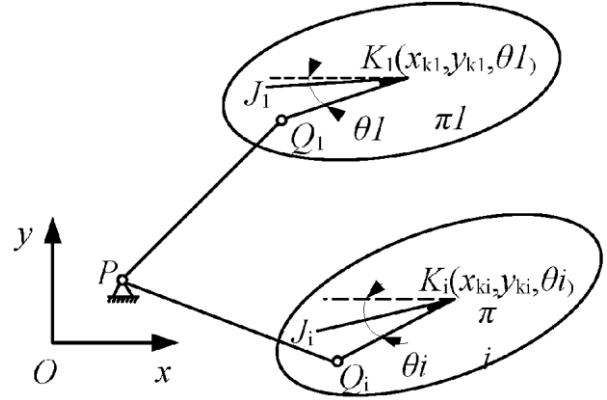


图 2 平面 2R 机构示意图

Fig. 2. Schematic diagram of planar 2R mechanism

连杆平面从第 1 位置运动至第 i 位置，等同于开链 2R 连杆从 PQ_1K_1 位置运动至 PQ_iK_i 位置，此过程的相对位移矩阵为

$$M_{li} = \begin{pmatrix} M_{11i} & M_{12i} & M_{13i} \\ M_{21i} & M_{22i} & M_{23i} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (i = 2, 3, \dots, N)$$

其中：

$$\begin{aligned} M_{11i} &= \cos \theta_{li}, M_{12i} = -\sin \theta_{li} \\ M_{13i} &= x_i - x_1 \cos \theta_{li} + y_1 \sin \theta_{li} \\ M_{21i} &= \sin \theta_{li}, M_{22i} = \cos \theta_{li} \\ M_{23i} &= y_i - x_1 \sin \theta_{li} - y_1 \cos \theta_{li} \end{aligned}$$

其中 θ_{li} 是连杆平面中第 i 位置相对第 1 位置的转角， $\theta_{li} = \theta_i - \theta_1$ 。

将固定铰链点 $P(x_P, y_P, 1)^T$ 和 $Q_1(x_{Q1}, y_{Q1}, 1)^T$ 设为待求变量，则有

$$Q_i = M_{li} Q_1; \quad (1)$$

根据 PQ 杆长不变的约束条件，可构建平面 2R 开链机构的运动综合设计方程^[18]：

$$[Q_i - P]^T [Q_i - P] = [Q_1 - P]^T [Q_1 - P] (i = 2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

把式 2)代入式 1)，整理得

$$\begin{aligned} C_{i1}(x_P x_{Q1} + y_P y_{Q1}) + C_{i2}(y_P x_{Q1} - x_P y_{Q1}) + C_{i3}x_P + \\ C_{i4}y_P + C_{i5}x_{Q1} + C_{i6}y_{Q1} + C_{i7} = 0 \end{aligned}$$

式中,

$$\begin{aligned} C_{11} &= 1 - M_{11i}, C_{12} = M_{12i} \\ C_{13} &= -M_{13i}, C_{14} = -M_{23i} \\ C_{15} &= M_{11i}M_{13i} + M_{21i}M_{23i} \\ C_{16} &= M_{12i}M_{13i} + M_{22i}M_{23i} \\ C_{17} &= \frac{M_{13i}^2 + M_{23i}^2}{2} \end{aligned}$$

提取待求变量 x_P, y_P, x_{Q1}, y_{Q1} , 得到

$$G_{1i}x_P + G_{2i}y_P + G_{3i} = 0 (i = 2, 3, \dots, N) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} G_{1i} &= 2[x_{Q1}(1 - \cos \theta_{li}) + y_{Q1} \sin \theta_{li} + \\ &\quad x_{K1} \cos \theta_{li} - y_{K1} \sin \theta_{li} - x_{Ki}] \\ G_{2i} &= 2[y_{Q1}(1 - \cos \theta_{li}) - x_{Q1} \sin \theta_{li} + \\ &\quad y_{K1} \cos \theta_{li} + x_{K1} \sin \theta_{li} - y_{Ki}] \\ G_{3i} &= 2(-x_{Ki}y_{Q1} - y_{Ki}x_{K1} + x_{Ki}y_{K1} + y_{Ki}x_{Q1}) \sin \theta_{li} + \\ &\quad 2(x_{Ki}y_{Q1} - x_{Ki}x_{K1} - y_{Ki}y_{K1} + y_{Ki}y_{Q1}) \cos \theta_{li} - \\ &\quad 2y_{Q1}y_{K1} - 2x_{Q1}x_{K1} + y_{Ki}^2 + x_{Ki}^2 + y_{K1}^2 + x_{K1}^2 \end{aligned}$$

当机构需要通过特定的 N 个位姿时, 有设计方程组 $F(x)$:

$$\begin{cases} f_2 = G_{21}x_P + G_{22}y_P + G_{23} \\ f_3 = G_{31}x_P + G_{32}y_P + G_{33} \\ \vdots \\ f_N = G_{N1}x_P + G_{N2}y_P + G_{N3} \end{cases} \quad (4)$$

方程组 $F(x)$ 有 $N-1$ 个方程和 4 个待求变量 x_P, y_P, x_{Q1}, y_{Q1} , 故平面 2R 开链机构最多实现 5 位姿的运动综合, 大于 5 位姿的运动综合只能近似实现^[19-20], 故可将目标函数定义为

$$G(x) = \min \left(\sum_{i=2}^N w_i (G_{1i}x_P + G_{2i}y_P + G_{3i})^2 \right) \quad (6)$$

其中, x 表示一组关于 x_P, y_P, x_{Q1}, y_{Q1} 的设计变量, w_i 是权重系数, 其作用是加大一些最关键位姿点(如取苗点, 交接点和栽植点)的权重。

目标函数(6)旨在求解出能使机构轨迹最逼近给定位姿的机构参数(x_P, y_P, x_{Q1}, y_{Q1})。粒子群算法作为一种基于群体智能的优化算法, 通过模拟鸟群或鱼群的集体行为来寻找最优解, 具有算法简单易实现, 计算效率高, 能快速收敛等特点^[21-22], 故可用粒子群算法求解目标函数。

分别对取苗轨迹点与栽植轨迹点所建立的目标函数展开求解, 每次迭代优化的结果如图 3 所示(a 为取苗, b 为栽植)。可以观察到, 两者的目标函数都呈收敛态势(设定粒子群规模为 200, 惯性权重为 0.74, 学习因子 c_1 为 1.49, 学习因子 c_2 为 1.49, 迭代步数为 100), 经计算, 取苗: $x_P=308.20, y_P=21.88, x_{Q1}=368.04, y_{Q1}=92.77$, 栽植: $x_P=0.01, y_P=-0.01, x_{Q1}=66.85, y_{Q1}=67.50$, 对其调整后, 取苗: $x_P=308.2, y_P=21.9, x_{Q1}=368, y_{Q1}=92.8$, 栽植: $x_P=0, y_P=0, x_{Q1}=66.85, y_{Q1}=67.50$ 。

本研究选取第一个位姿点的参数作为 L_1, L_2 长度的参考标准, 根据方程 7), 可求得取栽分离式移栽机构的杆长分别为取苗: $L_1=92 \text{ mm}, L_2=132 \text{ mm}$, 栽植: $L_1=95 \text{ mm}, L_2=120 \text{ mm}$ 。

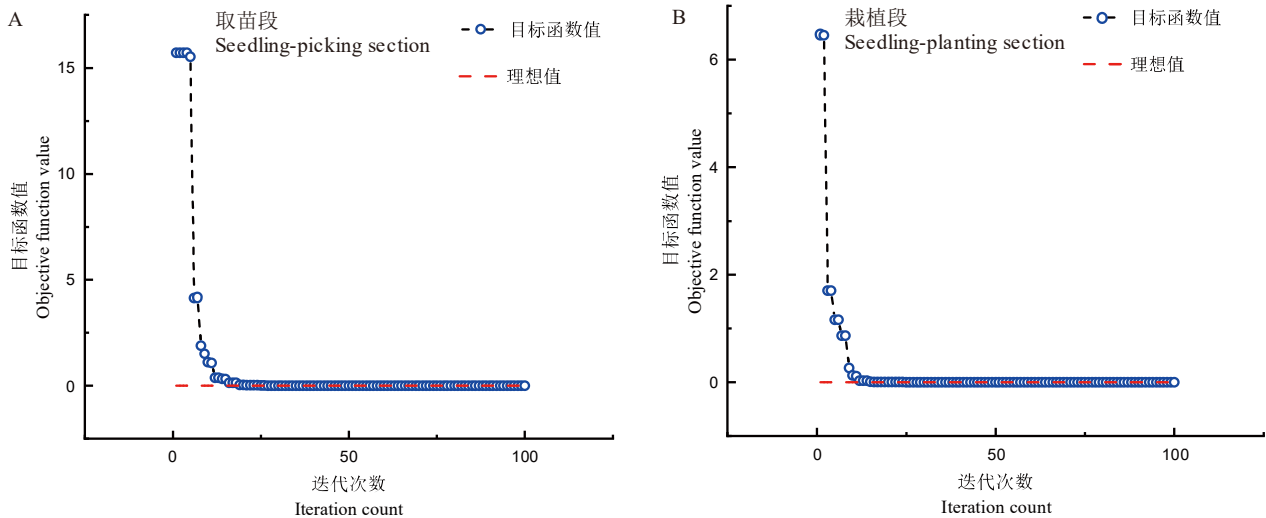


图 3 每次迭代后的目标函数值与理想值

Fig. 3. Objective function values and ideal values after each iteration

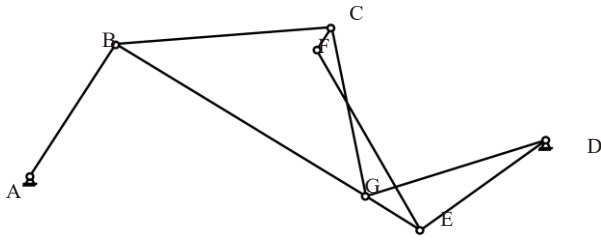


图4 添加约束后的平面六杆机构

Fig. 4. Planar six bar mechanism with added constraints

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{(x_{Q1} - x_P)^2 + (y_{Q1} - y_P)^2} \\ L_2 = \sqrt{(x_{K1} - x_{Q1})^2 + (y_{K1} - y_{Q1})^2} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 交接位置的约束

为提升交接过程中的动态稳定性,本研究对取苗平面 2R 机构与栽植平面 2R 机构末端之间添加距离约束组成一个 3 自由度的平面六杆机构。为了机构运动轨迹的唯一性,添加一个约束点 G , 增加 BG 、 CG 、 DG 、 EG 杆, 同时衍生出 BCG 和 DEG 构件, 从而构造出一个单自由度的平面六杆机构, 其模型如图 4 所示, 其中杆 DE 和 DF 分别为取苗机构的一杆和二杆, 杆 AB 和 BC 分别为栽植机构的一杆和二杆, 杆 CF 为其距离约束杆。

基于该六杆机构的模型, 构建了取栽协同作业式移栽机构在交接段的几何约束方程组。该方程组构建方法如下: 给定两组具有明确界定的回转副坐标, 一组对应交接段初始位置取苗机构(由杆 DE 与 EF 构成)和栽植机构(由杆 AB 与 BC 组成)的回转副坐标, 另一组对应交接段结束位置两机构的回转副坐标, 并基于杆 BG 、 CG 、 DG 、 EG 在运动过程中杆长不变的条件建立方程组, 以此来求解各杆长以及点 G 的坐标。

根据移栽机构在运动过程中杆长不变的约束条件, 构建的方程组如下:

$$\begin{cases} (x_{G1} - x_{B1})^2 + (y_{G1} - y_{B1})^2 = BG^2 \\ (x_{G1} - x_{C1})^2 + (y_{G1} - y_{C1})^2 = CG^2 \\ (x_{G1} - x_{D1})^2 + (y_{G1} - y_{D1})^2 = DG^2 \\ (x_{G1} - x_{E1})^2 + (y_{G1} - y_{E1})^2 = EG^2 \\ (x_{G2} - x_{B2})^2 + (y_{G2} - y_{B2})^2 = BG^2 \\ (x_{G2} - x_{C2})^2 + (y_{G2} - y_{C2})^2 = CG^2 \\ (x_{G2} - x_{D2})^2 + (y_{G2} - y_{D2})^2 = DG^2 \\ (x_{G2} - x_{E2})^2 + (y_{G2} - y_{E2})^2 = EG^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 x_{G1} 、 y_{G1} 、 x_{G2} 、 y_{G2} 以及杆 BG 、 CG 、 DG 、 EG

表2 交接段始末位置坐标数据

Table 2. Coordinate data of the beginning and end positions of the handover section

第一组 Group 1		第二组 Group 2	
(xB1, yB1)	(66.85, 67.50)	(xB2, yB2)	(51.24, 80.00)
(xC1, yC1)	(185.65, 67.50)	(xC2, yC2)	(180.17, 90.14)
(xD1, yD1)	(308.20, 21.90)	(xD2, yD2)	(308.20, 21.90)
(xE1, yE1)	(246.42, -47.28)	(xE2, yE2)	(233.31, -32.82)
(xF1, yF1)	(172.09, 61.23)	(xF2, yF2)	(171.18, 76.25)

的长度 l_6 、 l_7 、 l_8 、 l_9 为未知量; B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 为第一组坐标点(交接段结束位置), B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 、 F_2 为第二组坐标点(交接段初始位置), 两组坐标数据如表 2 所示。其中, AB 杆和 DE 杆在该区间内转过的角度相同, 即 $\angle B_2AB_1 = \angle E_2DE_1 = 12.08^\circ$, 如图 5 所示。

将两组数据代入方程组并求解, 方程组有唯一解, 求解结果如下所示: $BG=175.52$ mm, $CG=104.27$ mm, $DG=112.79$ mm, $EG=38.67$ mm, $x_{G1}=210.16$ mm, $y_{G1}=-33.85$ mm, $x_{G2}=200.66$ mm, $y_{G2}=-12.10$ mm。

基于该组数据构建的平面六杆机构可使移栽机构在交接段取苗机构与栽植机构的夹苗点之间的距离不变。为提高交接的成功率, 该六杆机构的点 F 和点 C 在两组数据所确定的起始位置与结束

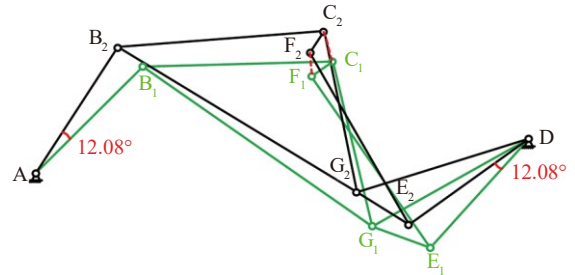


图5 平面六杆机构的首末位置

Fig. 5. Initial and final positions of a planar six bar mechanism

位置之间所形成的轨迹, 将分别作为栽植机构与取苗机构的工作轨迹。如图 5 所示, 轨迹 F_1F_2 将作为交接段取苗机构的轨迹, 轨迹 C_1C_2 将作为交接段栽植机构的轨迹。

3 移栽机构的设计与优化

3.1 移栽机构的设计与工作原理

第二节中得到的取苗机构和栽植机构属于平面开链 2R 机构, 由一杆和二杆组成。移栽机构简化模型如图 6 所示, 以取苗机构为例, 一杆是行星架杆, 沿杆配置的是二级非圆齿轮行星轮系, 长度

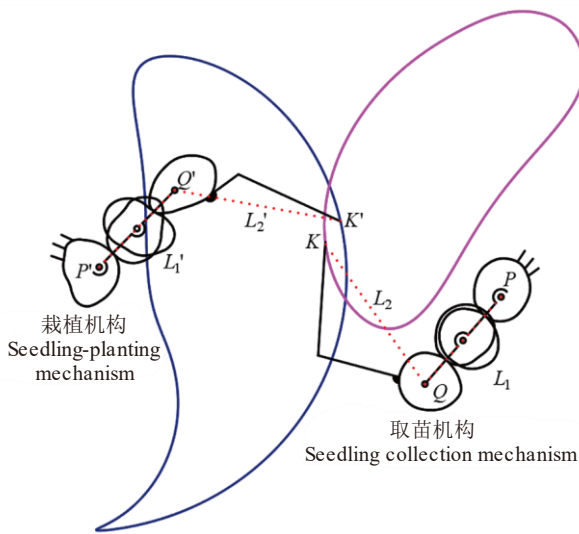
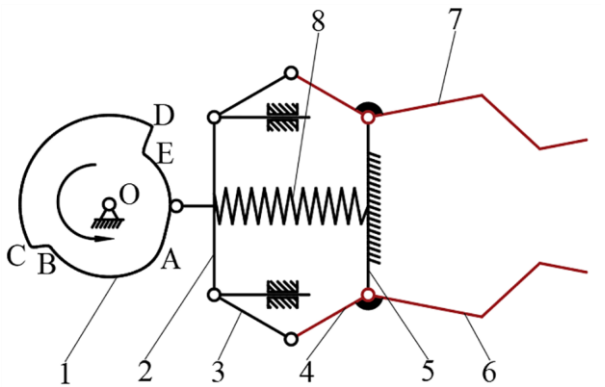


图 6 移栽机构简化模型

Fig. 6. Simplified model of transplanting mechanism

为 $L_1(PQ)$, 此长度具体指太阳轮回转中心 P 到行星轮回转中心 Q 的距离; 二杆是移栽臂杆, 长度为 $L_2(QK)$, 即行星轮回转中心 Q 到夹持点 K 的距离, 栽植机构的结构组成与之相同。通过一杆上特定的二级非圆齿轮的啮合, 同时配合移栽部件的协同运作, 即可以实现兼具预期轨迹和理想位姿点的移栽运动。

移栽部件的结构如图 7 所示。其工作原理如下: 凸轮围绕点 O 做圆周运动, 与之接触的是一个连杆组, 该连杆组包括凸轮顶杆、杆一、杆二和固定杆, 它们之间都通过转动副连接, 其中杆一和杆二各有两组, 沿结构对称分布, 杆二和夹片固接为一体, 弹簧设置在凸轮顶杆与固定杆之间, 夹片末端固定在杆二末端的转动副上。凸轮在 EA 段工作时, 凸



1: 凸轮; 2: 凸轮顶杆; 3: 杆一; 4: 杆二; 5: 固定杆; 6: 夹片 A; 7: 夹片 B; 8: 弹簧。

1, Cam; 2, Cam follower; 3, Rod 1; 4, Rod 2; 5, Fixed rod; 6, Clip A; 7, Clip B; 8, Spring.

图 7 移栽部件结构

Fig. 7. Schematic diagram of transplanting component structure

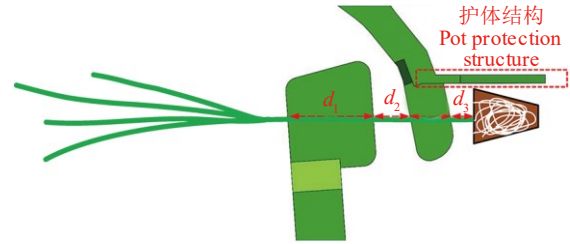


图 8 交接位置夹片的相对位置

Fig. 8. Relative position of the handover position clamp

轮顶杆向右运动, 此时弹簧受到压缩, 夹片向内收缩至合适位置, 以便于夹苗; 在 AB 段工作时, 此阶段为预夹苗阶段, 夹片开口维持恒定; 当凸轮运行至 BC 段时, 凸轮顶杆向右运动至右极限位置, 弹簧进一步压缩, 秧苗夹取完成; CD 段为运苗阶段, 移栽臂将秧苗送至指定位置; 当凸轮在 DE 段工作时, 凸轮顶杆在弹簧的作用下返回初始位置, 夹片张开, 完成放苗动作, 这一完整过程为移栽臂工作的一个周期, 取苗机构和栽植机构均采用此结构形式。但两机构在夹片构造有所不同, 以确保交接过程的精确高效。

取苗机构与栽植机构均采用夹片夹取秧苗茎秆, 为避免两机构夹片干涉, 需合理配置其宽度和排列位置; 考虑到秧苗茎秆离土体越远越软的特性, 要确定合适夹苗点。经多组秧苗的测试, 取苗机构夹片近端距土体 25 mm 时茎秆不弯曲。故而设置取苗机构与栽植机构的夹片宽度分别为 $d_1=20$ mm 和 $d_3=10$ mm, 两夹片之间的距离为 $d_2=12$ mm, 土体与栽植机构夹片近端的距离为 $d_4=3$ mm, 如图 8 所示。

栽植机构的夹片上集成了护钵结构, 该结构在秧苗夹持过程中与秧苗呈平行布置状态。进入栽植阶段后, 当钵体触及泥面时, 该结构将支撑钵体并有效维持钵体与秧苗的相对空间位置关系, 进而避免钵体与夹片之间茎秆在泥面的反作用力下发生折弯。通过该结构, 可使钵体以直立姿态栽入土中, 提升秧苗直立度。

为了获取更完整的轨迹和角位移曲线, 本研究分别在取苗轨迹和栽植轨迹求解所得的 6 个位姿点的基础上, 额外插入 11 个位姿点(其中有一点为基于距离约束条件的交接起始点, 在图中已区别表示), 并针对这共计 17 个位姿点利用 3 次非均匀的 B 样条曲线拟合角位移曲线^[23], 拟合结果如图 9-A、9-B 所示, 然后用开链 2R 机构复演运动轨迹^[24], 结果如图 9-C、9-D 所示。

3.2 传动比分配

根据角位移曲线将传动比合理分配给二级非

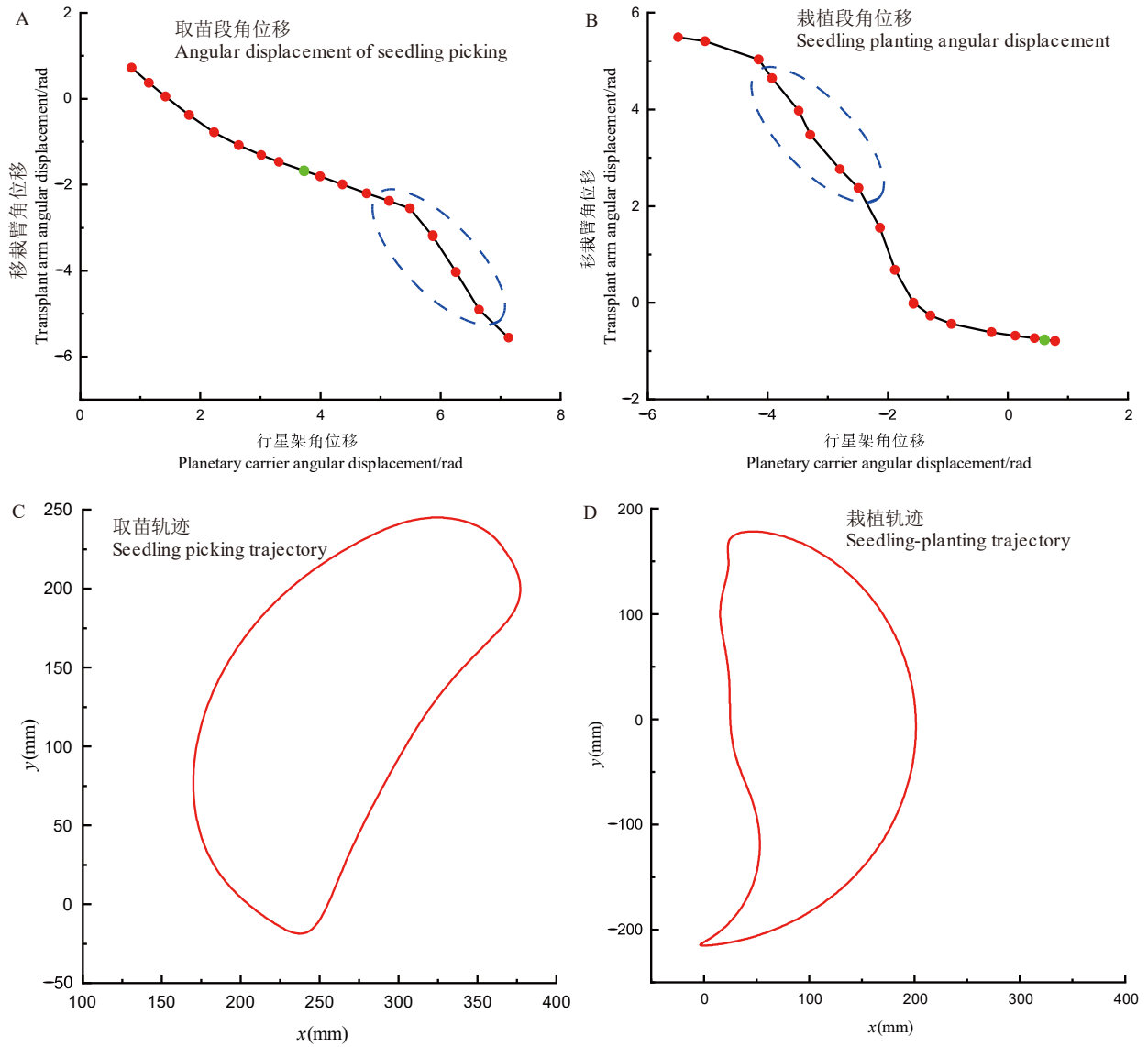


图9 角位移曲线和轨迹

Fig. 9. Angular displacement curve and trajectory

圆齿轮。在动力传输过程中,通过非圆齿轮的传动,移栽臂即可实现预期轨迹的移栽运动。

为确保二级非圆齿轮在力学和运动学上具备相似的特性,在分配传动比时,需使二级非圆齿轮传动比保持相近^[25],故二级非圆齿轮行星轮系的总传动比可定义为

$$i = \left| \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right| \quad (7)$$

式中 i 为总传动比, ω_0 为太阳轮角速度, ω_1 为一杆角速度, ω_2 为二杆角速度。

本研究的传动比分配方案为

$$i_1 = k\sqrt{i} \quad (8)$$

$$i_2 = i / i_1 \quad (9)$$

式中 i_1 为第一级传动比, i_2 为第二级传动比, k 为峰谷值调整系数。

图 10-A、10-B 分别为取苗、栽植非圆齿轮行星轮系的传动比曲线,包括行星轮系总传动比、第一级非圆齿轮和第二级非圆齿轮传动比曲线。对比后可看出,传动比曲线在周期内呈现相同的变化趋势,满足设计要求;根据角位移数据对取苗机构与栽植机构的传动比进行合理分配,得到非圆齿轮节曲线如图 10-C 和 10-D 所示。从图中可以观察到,在两机构的非圆齿轮节曲线中,部分曲线的圆度欠佳(在图中已标识),这种情况不利于齿轮良好啮合,需要进一步优化。

3.3 非圆齿轮节曲线的凹凸性优化

从图 10-C、10-D 中可以发现,齿轮圆度较差的

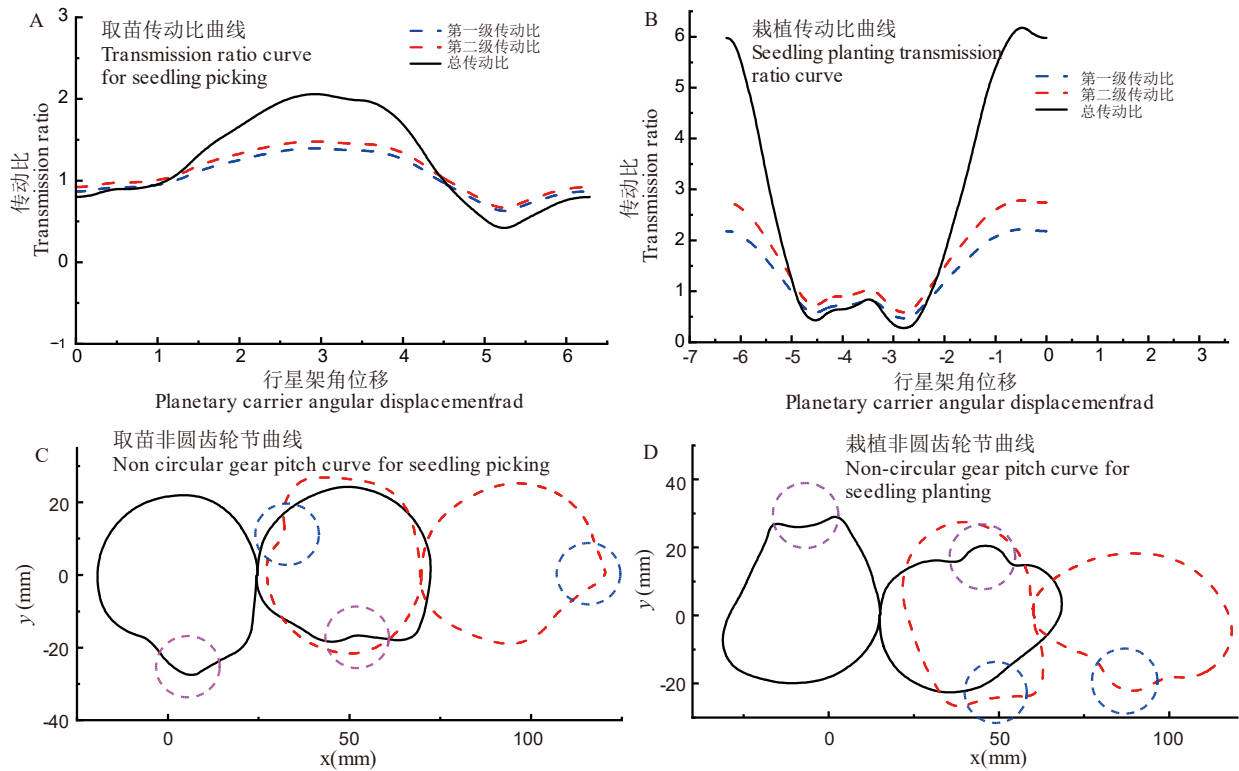


图 10 传动比曲线和非圆齿轮节曲线

Fig. 10. Transmission ratio curve and non-circular gear pitch curve

部分都在相同相位范围内。故一对相互啮合齿轮中, 仅需对其中一个齿轮的节曲线圆度进行优化, 另一个齿轮节曲线的圆度也会得到改善。对非圆齿轮节曲线的凹凸性的评价, 可通过建立目标函数的方法来完成, 具体的目标函数的构建方法如下:

非圆齿轮节曲线圆度较差的部分对应的角位移范围如图 9-A~B 所示。其中, 取苗段和栽植段待优化的型值点数量相同, 优化目标如图 9-A~B 中 10 个型值点的纵坐标(取苗段 5 个, 栽植段 5 个), 统一用 $y_1, \dots, y_5$ 表示, 其范围为 $\alpha_1 \leq y_1, \dots, y_5 \leq \alpha_2$, 其中, α_1, α_2 表示取值范围的边界, $y_1, \dots, y_5$ 是五个型值点的纵坐标。

第一级非圆齿轮节曲线的圆度函数为

$$F_1 = \sum_i (|r_{i+1} - r_i| + |r_i - r_{i-1}|) \quad (10)$$

其中, r_i 为太阳轮节曲线的第 i 个拟合点的向径; $r_{i+1} \setminus r_{i-1}$ 为第 i 个点相邻两个拟合点的向径; Z 为节曲线上的拟合点总数。

第二级非圆齿轮节曲线的圆度函数为

$$F_2 = \sum_j (|r_{j+1} - r_j| + |r_j - r_{j-1}|) \quad (11)$$

其中, r_j 为中间轮 B 节曲线的第 j 个拟合点的向径; $r_{j+1} \setminus r_{j-1}$ 为第 j 个点相邻两个拟合点的向

径。

综上所述, 目标函数可以写成

$$f(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) = k_1 F_1 + k_2 F_2; \quad (12)$$

式中, k_1, k_2 为权重系数, 目标函数 $f(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$ 由两组非圆齿轮目标函数 F_1 和 F_2 构成。

随后, 运用粒子群算法对目标函数进行计算, 求得最优值如表 3 和表 4 所示。使用优化后的数据, 绘制角位移、节曲线和轨迹图, 并将这些结果与优化前的情况进行对比。取苗段和栽植段均采用该方法分别进行优化(结果如图 11 所示)。

这种表示圆度函数的方法可作为评判非圆齿轮节曲线圆度的标准, 值越小表明圆度越好。取苗段非圆齿轮节曲线的圆度值从 0.013 优化为 0.008, 栽植段非圆齿轮节曲线的圆度值从 0.016 优化为 0.007。

通过图中优化前后的对比, 可以观察到经过优化后的非圆齿轮的圆度得到显著改善, 并且三个最关键的位姿点(取苗点、交接点和栽植点)的位姿依旧保持不变, 轨迹也仍符合设计要求。

考虑到栽植机构在真实的工作环境中与土壤有相对运动, 因此需从动轨迹角度考虑栽植机构的穴口大小问题。同时, 要判断栽植机构在栽植动作完成后的运动是否会对栽植好的秧苗产生干涉, 影

响秧苗的直立度。

如图 12 为一个完整周期下载植机构的动轨迹和静轨迹。从图中可以看出, 栽植机构入土和出土的动轨迹几乎重合, 使得穴口大小最小化。在设计

栽植轨迹时, 栽植机构在完成栽植动作后, 会立刻沿反方向摆动, 不会将栽植好的秧苗打翻, 从图 12 中动轨迹所呈现的情况来看, 栽植机构在正常工作的情况下, 不会影响已栽秧苗。

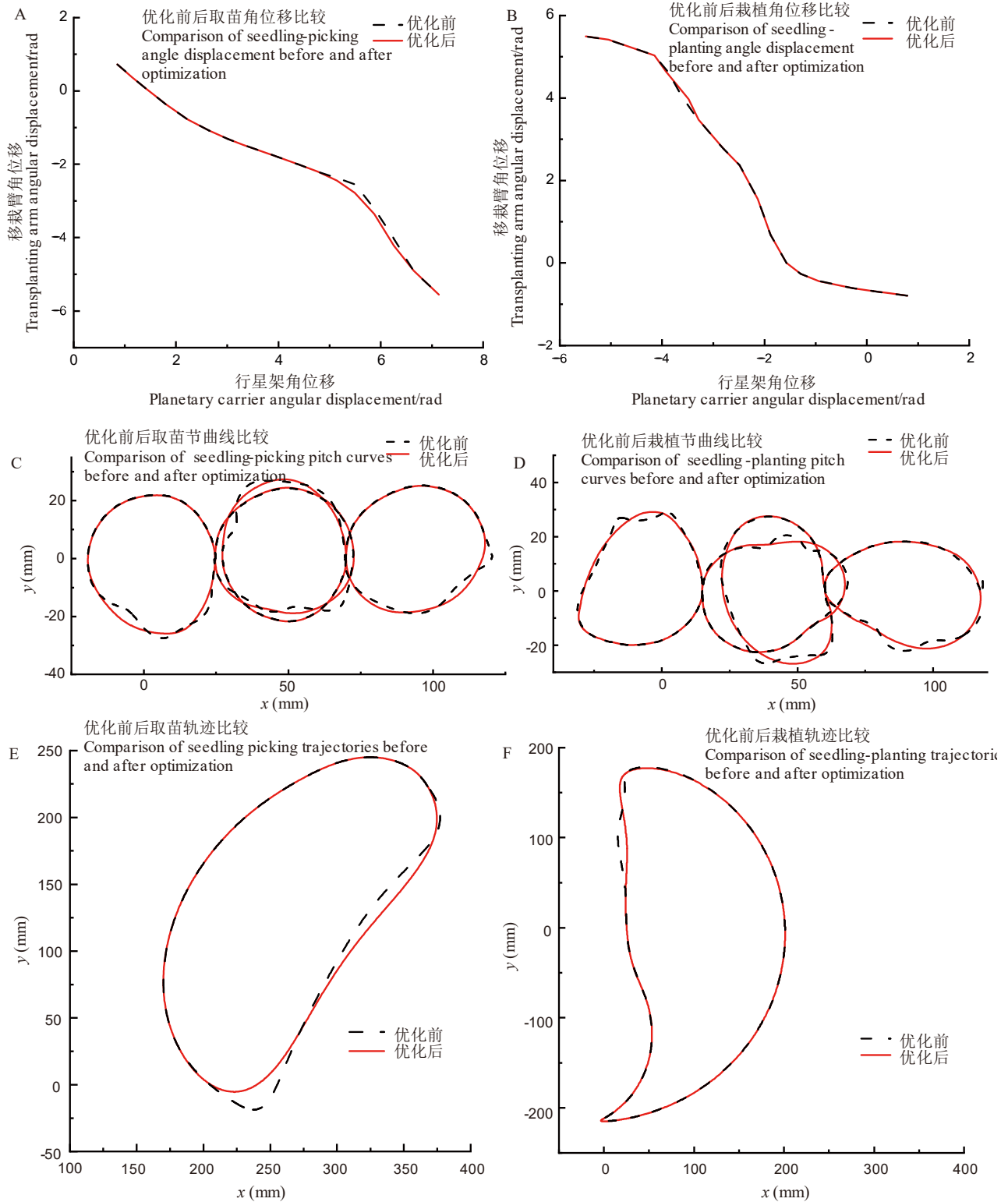


图 11 取栽机构角位移-节曲线-轨迹优化前后对比

Fig. 11. Comparison of angular displacement-pitch curve-trajectory before and after optimization of the picking and planting mechanism

表 3 取苗段角位移最优值

Table 3. Optimal values of angular displacement for seedling-picking

取苗段 Seedling-picking	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
最优值 Optimal value	-2.428	-2.708	-3.360	-4.221	-4.904
上限值 Upper limit	-2.202	-2.202	-2.202	-2.202	-2.202
下限值 Lower limit	-5.560	-5.560	-5.560	-5.560	-5.560

表 4 栽植段角位移最优值

Table 4. Optimal value of angular displacement for seedling planting

栽植段 Seedling planting	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
最优值 Optimal value	4.645	4.005	3.472	2.764	2.304
上限值 Upper limit	5.030	5.030	5.030	5.030	5.030
下限值 Lower limit	1.547	1.547	1.547	1.547	1.547

4 移栽机构的仿真与试验

4.1 移栽机构的仿真

基于机构综合求解出的杆长参数以及优化后的非圆齿轮廓线数据，对移栽机构展开结构设计。

为了验证理论与机构设计的合理性，将设计完成的移栽机构导入 Adams 软件进行虚拟仿真。在仿真过程中，模拟移栽机构在实际工作场景下的运动状态，获取其运动轨迹和姿态数据(姿态数据记录于表 5)，并将其与理论轨迹进行对比，可以观察到两个轨迹基本吻合(如图 13 所示)。仿真数据表明，在取苗、交接和栽植这 3 个关键位姿点的姿态与期望

周期的移栽运动。各姿态角需满足以下条件：取苗机构的交接角与取苗角的差等于秧箱倾角的余角(本研究秧箱的倾角为 55°)；栽植机构的交接角与栽植角的差等于 90°；两交接角的和为 54°。AB 段为取苗机构的运苗阶段，此时栽植机构进入预夹苗阶段；BC 段为栽植机构的运苗阶段，在交接完成后，

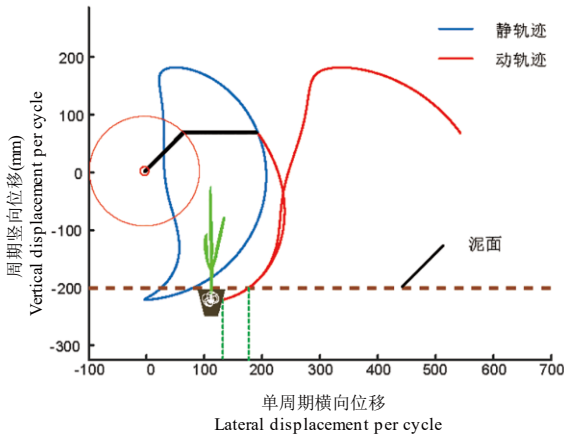


图 12 栽植机构轨迹
Fig. 12. Trajectory of planting mechanism

值误差在 1%范围内，符合近似运动综合设计要求。

导出移栽机构在工作过程中姿态角度在一个周期内随时间的变化如图 14-A 所示。A 为取苗机构的取苗点，此时取苗角理论值为 59°；B 为秧苗的交接点，在该位置取苗机构与栽植机构的理论姿态角分别为 94°和-40°；C 为栽植点，此时栽植角理论值为-130°；D 处取苗机构将再次取苗，完成一个

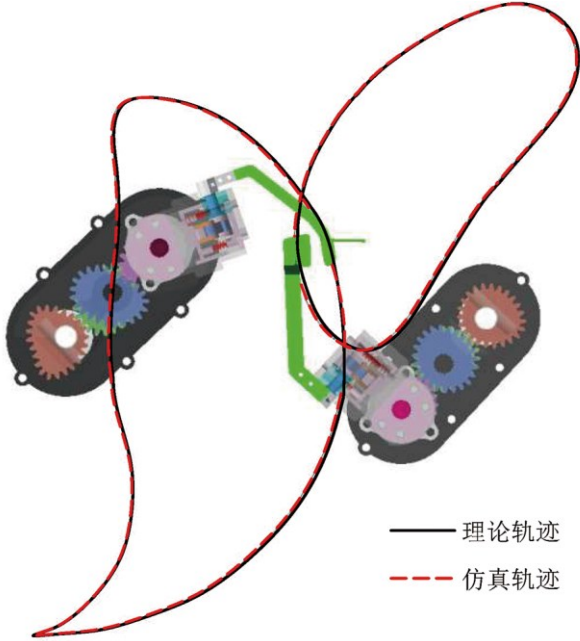


图 13 仿真轨迹与理论轨迹示意图
Fig. 13. Schematic diagram of simulated trajectory and theoretical trajectory

取苗爪张开，进入下一周期取苗运动；CD 段栽植结束，栽植爪张开，进入下一周期栽植运动，取苗机构进入预夹苗状态。

为分析移栽机构在交接过程的动态性能，导出了移栽机构在一个周期内取苗机构夹苗点与栽植机构夹苗点之间的距离随时间的变化曲线(图 14-B)。其中 A、B、C、D 所代表的含义与图 14-A 中相同。EB 段为交接段，在 E 处，栽植爪已夹紧秧苗，此时两机构夹苗点之间的距离将保持恒定，

表 5 移栽关键姿态角

Table 5. Key attitude angle of the transplanting mechanism

类型 Type		取苗角 Seedling-picking angle	交接角		栽植角 Planting angle
			Intersection angle		
			取苗机构	栽植机构	
			Seedling collection mechanism	Seedling-planting mechanism	
理论设计值 Theoretical design value		59.0°	94.0°	-40.0°	-130.0°
虚拟仿真值 Virtual simulation value		58.8°	94.3°	-40.2°	-129.9°
样机试验值 Prototype test values	第 1 组 Group 1	59.8°	94.6°	-38.9°	-128.8°
	第 2 组 Group 2	58.1°	93.2°	-39.5°	-130.3°
	第 3 组 Group 3	60.2°	93.7°	-40.2°	-130.9°

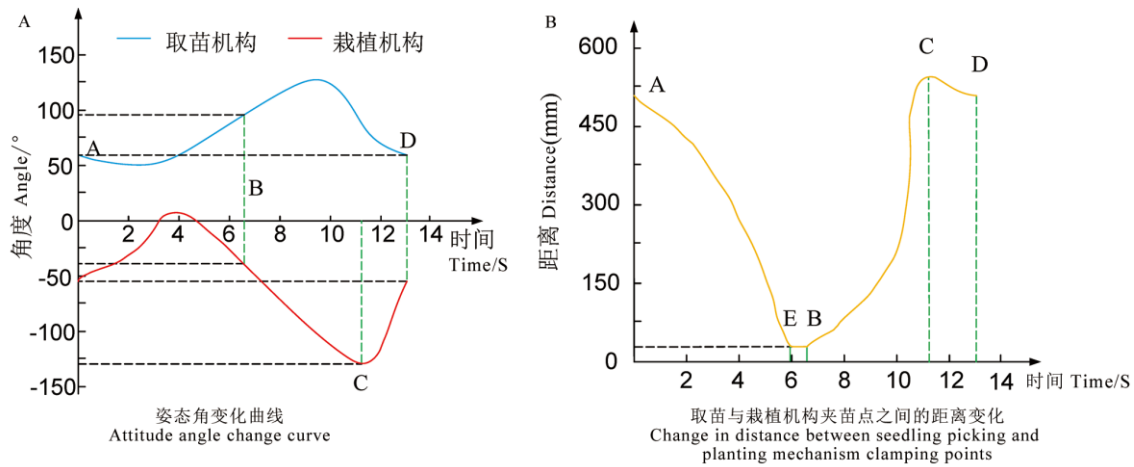


图 14 姿态角与夹苗点距离变化
Fig. 14. Changes in attitude angle and distance from seedling clamping point

随后栽植爪将与取苗爪协同夹持秧苗至交点 B 处，此过程中段两机构夹苗点之间的距离保持恒定，这种设计避免了在移栽过程中对秧苗产生不必要的拉扯力。从图中可以发现，在 EB 交接段时，两机构夹苗点之间的实际距离几乎保持恒定，符合设计要求。将理论数据与仿真数据对比可知，在取苗、交接和栽植这 3 个关键位姿点的姿态角与期望值误差在 1% 范围内，符合近似运动综合设计要求。这一结果说明取栽分离式移栽机构同样具备准确的移栽姿态。

以上充分表明，基于现有参数和设计思路所构建的移栽机构具有合理性和可行性。

4.2 机构协同取栽台架试验

为进一步验证本研究多位姿近似综合方法的正确性以及上述移栽机构在实际应用中的可行性，研制移栽机构物理样机并搭建试验台，开展了移栽机构的轨迹验证试验和移栽效果试验。

首先，为了验证实际移栽轨迹与仿真轨迹是否具有 consistency，借助高速摄像机记录移栽运动的完整周期，随后利用视频分析软件获取移栽轨迹(包括取

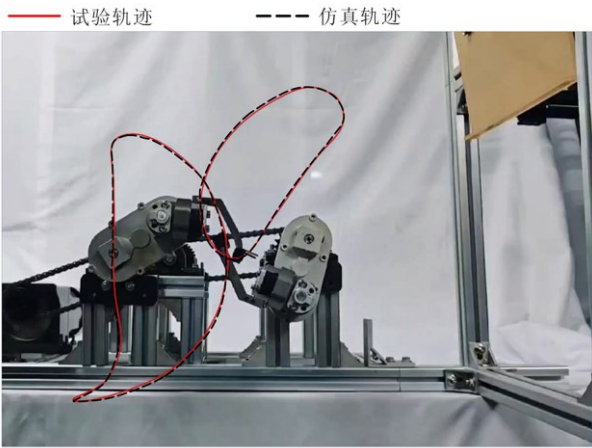


图 15 试验轨迹与仿真轨迹对比
Fig. 15. Comparison of experimental trajectory and simulation trajectory

苗轨迹和栽植轨迹)，具体如图 15 所示。通过对比可以明显看出，实际轨迹与仿真轨迹基本一致，两者的最大偏差为 1.8mm，处于合理范围内，满足设计预期。

表 6 移栽成功率

Table 6. Transplant success rate					
	类型	取苗	交接	栽植	移栽成功率
	Type	Picking	Handover	Planting	Transplant success rate(%)
样机试验值	第 1 组 Group 1	49/50	45/49	44/45	88.0
Prototype test values	第 2 组 Group 2	47/50	44/47	44/44	88.0
	第 3 组 Group 3	49/50	46/49	45/46	90.0
平均值 Average(%)		96.7	93.1	98.5	88.7

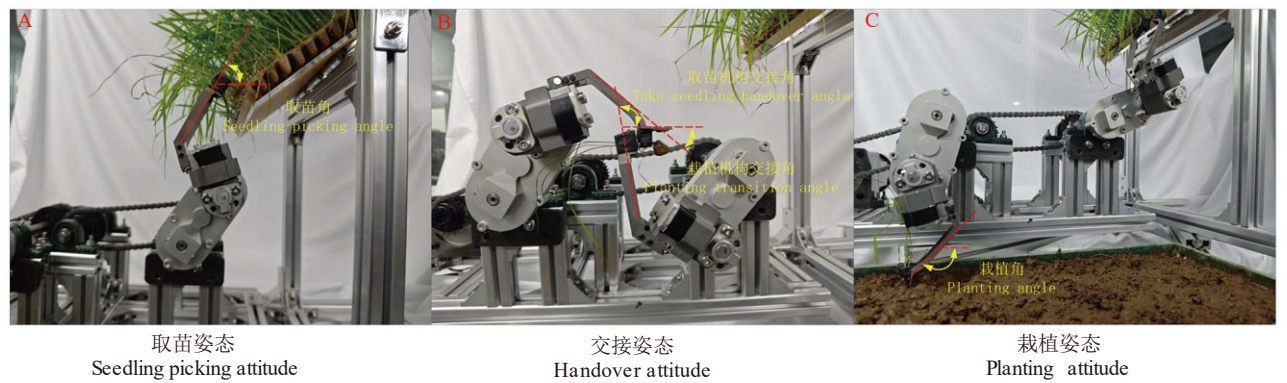


图 16 关键位置姿态
Fig. 16. Key position attitude

其次，为了评估移栽机构在实际工作条件下的性能，开展了移栽效果试验，重点考察其位姿精度、移栽成功率和栽植直立度。试验选用 3 组秧苗(每组 50 株，共计 150 株)，在移栽作业过程中，测量取苗、交接和栽植 3 个关键位置的姿态角，各组结果取平均值(表 5)，并记录各环节的成功秧苗数量并计算成功率(表 6)。试验结果表明，其试验轨迹位姿点与设定位姿误差在 $\pm 1.2^\circ$ 范围内，两机构单独运作以及交接配合作业都具有较高成功率，对栽植角度的测量表明，秧苗的直立度在 $90^\circ \pm 1.2^\circ$ 的范围内。

物理样机在取苗、交接和栽植时的姿态，如图 16 所示。三个关键位置的姿态角表示的是对应移栽执行部件的二杆的延长线与水平轴正方向的夹角。

综上所述，台架试验成功验证了机构综合方法的参数准确性以及取栽分离式移栽机构的合理性。

5 结论

1) 提出了一种取苗与栽植双机构协同作业的水稻钵苗移栽机构，以 6 个离散位姿坐标为约束，采用 PSO 算法经 100 代收敛计算得到移栽机构的设计参数，根据开链 2R 机构的相对角位移关系分配二级非圆齿轮传动比，实现六位姿的近似综合运动。

2) 建立了评判非圆齿轮节曲线圆度目标函数，在满足取苗、交换、栽植动作的前提下，基于 PSO 算法改善了非圆齿轮节曲线的凹凸性。

3) 搭建机构样机试验台，利用高速摄像机精确采集实际运动轨迹，其轨迹与理论轨迹和虚拟仿真轨迹偏差不超过 1.8mm，验证了前述方法的正确性。此外，进行了移栽机构取苗、交接、栽植的试验，三处关键位姿的角度误差都不超过 1.2° ，移栽成功率为 88.7%，秧苗直立度较好，茎秆相对于垂直方向倾角小于 1.2° ，未见明显倒伏现象。该取苗与栽植双机构协同作业方案，为研发钵体苗高效定植立苗移栽装备提出了新的研究思路。

参考文献:

[1] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 陈林涛, 李宏伟, 袁志成. 水稻栽植机械化技术研究进展 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1-20.
Li Z H, Ma X, Li X H, Chen L T, Li H W, Yuan Z C. Research progress on mechanization technology of rice planting [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (5): 1-20. (in Chinese with English abstract)
[2] 朱均林, 褚光, 章秀福. 近年我国水稻栽培学科若干热点领域研究进展与展望 [J]. 中国稻米, 2023, 29(6): 5-9.

- Zhu J L, Chu G, Zhang X F. Research progress and prospects in several hot areas of rice cultivation in China in recent years [J]. *China Rice*, 2023, 29 (6): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李泽华, 马旭, 陈林涛, 李宏伟, 黄益强, 黎俊荣, 罗国武, 姚俊豪. 育秧播种密度与取秧面积耦合对杂交稻机插质量和产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 20-30.
- Li Z H, Ma X, Chen L T, Li H W, Huang Y Q, Li J R, Luo G W, Yao J H. The Influence of coupling between seedling density and seedling area on the quality and yield of hybrid rice machine insertion [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (24): 20-30. (in Chinese with English abstract)
- [4] 俞高红, 金也, 常数数, 叶秉良, 顾锦波, 赵雄. 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 G H, Jin Y, Chang S S, Ye B L, Gu J B, Zhao X. Design and experiment of rice bowl seedling transplanting mechanism with clamp bowl [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50 (7): 100-108. (in Chinese with English abstract)
- [5] 辛亮, 王明成, 张浩, 孙国玉, 王航, 庄智圆. 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 [J]. *农业机械学报*, 2024, 55(8): 63-70.
- Xin L, Wang M C, Zhang H, Sun G Y, Wang H, Zhuang Z Y. Optimization design and experiment of non circular gear connecting rod combination rice bowl seedling membrane transplanting mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55 (8): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张静, 龙新华, 韩长杰, 袁盼盼, 高杰. 机械驱动式辣椒穴盘苗自动取投苗系统设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 20-30.
- Zhang J, Long X H, Han C J, Yuan P P, Gao J. Design and experiment of automatic seedling picking and feeding system for mechanically driven chili plug seedlings [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (5): 20-30. (in Chinese with English abstract)
- [7] 辛亮, 王明成, 孙国玉, 张浩, 孙铭翼, 王航. 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 L, Wang M C, Sun G Y, Zhang H, Sun M Y, Wang H. Design and experiment of tomato bowl seedling transplanting and protruding bowl picking mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55 (3): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- [8] 俞高红, 俞腾飞, 叶秉良, 贾德宝, 王林伟, 胡海军. 一种新型行星轮系机构的研究 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(15): 55-61.
- Yu G H, Yu T F, Ye B L, Jia D B, Wang L W, Hu H J. Research on a new type of planetary gear system mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 49 (15): 55-61. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵匀, 朱慧轩, 辛亮, 周脉乐, 冯江, 张敏. 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.
- Zhao Y, Zhu H X, Xin L, Zhou M L, Feng J, Zhang M. Mechanism analysis and experiment of fitting gear five bar rice bowl seedling transplanting mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (1): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周脉乐, 薛向磊, 钱孟波, 尹大庆. 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构优化设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 77-83.
- Zhou M L, Xue X L, Qian M B, Yin D Q. Optimization design and experiment of drilling and transplanting mechanism for protruding vegetable bowl seedlings [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51 (1): 77-83. (in Chinese with English abstract)
- [11] 蔡金平, 刘木华, 肖丽萍, 林金龙, 叶洋洋, 杨红飞. 变行距水稻钵苗移栽机移栽装置设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 50-59.
- Cai J P, Liu M H, Xiao L P, Lin J L, Ye Y Y, Yang H F. Design and experiment of transplanting device for rice bowl seedling transplanter with variable row spacing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51 (4): 50-59. (in Chinese with English abstract)
- [12] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 周脉乐, 张昊, 张智超. 移栽机械发展现状与展望 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 44-53.
- Yu X X, Zhao Y, Chen B C, Zhou M L, Zhang H, Zhang Z C. Development status and prospects of transplanting machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (8): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈雄飞, 黄活龙, 廖仲维, 余佳佳, 刘俊安, 肖丽萍, 伍金峰, 刘木华. 水稻钵体苗凸轮渐进顶出式取苗装置设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(1): 65-74.
- Chen X F, Huang H L, Liao Z W, Yu J J, Liu J A, Xiao L P, Wu J F, Liu M H. Design and experiment of rice bowl seedling cam progressive ejection seedling picking device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1): 65-74. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 中国抛秧稻作技术体系及其特征 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 43-52.

- Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. The technical system and characteristics of rice seedling throwing in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 43-52.
- [15] 王磊, 孙良, 徐亚丹, 俞高红, Gervais N L, 黄佳辉. 基于遗传算法的三臂轮系式栽植机构多位姿运动综合 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 70-77.
Wang L, Sun L, Xu Y D, Yu G H, Gervais N L, Huang J H. Multi pose motion synthesis of three arm wheel system planting mechanism based on genetic algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [16] 许春林, 吕志军, 辛亮, 王杰, 赵匀. 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 C L, Lü Z J, Xin L, Wang J, Zhao Y. Optimization design and experiment of a walking rice bowl seedling membrane hole transplanting mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50 (8): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙良, 徐亚丹, 黄恒敏, 王振飞, 张国凤, 武传宇. 基于节曲线凸性判别的行星轮系移栽机构解析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 83-92.
Sun L, Xu Y D, Huang H M, Wang Z F, Zhang G F, Wu C Y. Analysis of planetary gear transplanting mechanism based on convexity discrimination of nodal curves [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (12): 83-92. (in Chinese with English abstract)
- [18] Tong Z, Yu G, Zhao X, Liu P, Ye B. Design of vegetable pot seedling pick-up mechanism with planetary gear train [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33: 63.
- [19] 王磊. 基于多元函数极值理论的机构多位姿运动综合方法及试验研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
Wang L. Method and experimental study on multi pose motion synthesis of mechanisms based on the extreme value theory of multivariate functions [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱立红. 基于 Kinematic-Mapping 的运动综合理论及其在辅助康复机构中的应用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
Zhu L H. Motion synthesis theory based on Kinematic Mapping and its application in assisted rehabilitation institutions [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [21] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1): 58-73.
- [22] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. October 4-6, 1995, Nagoya, Japan. IEEE, 2002: 39-43.
- [23] 李学艺, 王钊, 连小珉, 曾庆良. 基于周期性延伸的三次 B 样条闭曲线插值 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 251-254.
Li X Y, Wang Z, Lian X M, Zeng Q L. Triple B-spline closed curve interpolation based on periodic extension [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40 (12): 251-254. (in Chinese with English abstract)
- [24] 夏成林, 邬弘毅, 郑兴国, 彭凯军. 带多个形状参数的三次均匀 B 样条曲线的扩展 [J]. 工程图学学报, 2011, 32(2): 73-79.
Xia C L, Wu H Y, Zheng X G, Peng K J. Extension of cubic uniform B-spline curves with multiple shape parameters [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2011, 32 (2): 73-79. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙良, 邢子勤, 徐亚丹, 刘兵, 俞高红, 武传宇. 基于精确多位姿解析的水稻钵苗移栽机构研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 78-86.
Sun L, Xing Z Q, Xu Y D, Liu B, Yu G H, Wu C Y. Research on rice bowl seedling transplanting mechanism based on precise multi pose analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 78-86. (in Chinese with English abstract)