

多臂回转式水稻钵苗高速取射秧装置设计与试验

孙良^{1,2} 孔子阳¹ 陈勃瑞¹ 薛晓迪¹ 陈建能^{1,3} 俞高红^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 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)

摘要: 为提升现有夹苗式水稻钵苗移栽的作业效率与栽植质量,提出了一种多臂回转式高速夹取与对辊加速射秧组合式水稻钵苗移栽方式。将具有低传动比波动特性的二阶卵形齿轮引入行星轮系取秧机构,采用对称布局的四取秧臂结构,以提高机构单周夹取频次。通过建立卵形轮系机构运动学模型,编写用于取秧机构轨迹、姿态优化的辅助设计程序,确定了满足农艺要求的合理参数组合,优选出一种“桃形”取投秧轨迹,并完成轮系设计与仿真验证。为提升高转速工况下的取投秧性能,基于五次多项式运动规律构建了空间摆动凸轮取秧臂机构,实现了低压力角、运动平稳的推程与回程特性;通过开展单因素试验,系统分析对辊直径、转速、安装位置对加速射秧的影响规律,实现了秧苗的精准加速与定向投射,有效保障钵苗栽植直立度和栽植深度的一致性。以取秧臂转速、对辊转速、射秧角度和土壤含水率为因素,植苗成功率为评价指标进行正交试验,明确了土壤含水率为主要影响因素。单因素试验结果表明:在转速 110 r/min 下,平均取秧成功率达 94.46%;在射秧速度 5 m/s 条件下,可实现 2.5 ~ 3.0 cm 理想入土深度;取投秧联合试验表明:平均综合植苗成功率达 91.6%,平均作业效率达 435 株/min,平均损伤率为 2.1%。本研究采用取植分离协同作业模式,为水稻钵苗高速高质机械化移栽提供了新的技术路径与实践依据。

关键词: 水稻钵苗; 取射秧装置; 移栽; 多臂回转式; 椭圆齿轮

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0234-12

OSID:



Design and Experiment of Multi-arm Rotary High-speed Seedling Picking and Shooting Device for Rice Pot Seedlings

SUN Liang^{1,2} KONG Ziyang¹ CHEN Borui¹ XUE Xiaodi¹ CHEN Jianneng^{1,3} YU Gaohong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Planting Equipment Technology, Hangzhou 310018, China

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Southeastern Hilly and Mountainous Areas, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming to improve the efficiency and quality of clamp-type rice pot seedling transplanting, a method was introduced. This method combined a multi-arm rotary system for high-speed seedling picking with a pair of counter-rollers for accelerated seedling projection. A second-order oval gear, known for its stable transmission, was used in the planetary gear mechanism. This mechanism featured four symmetrically arranged clamping arms to increase the number of seedlings picked per cycle. A kinematic model and a computer-aided design program were developed to optimize the clamping trajectory and posture. This process led to the identification of an optimal “peach-shaped” trajectory and the completion of the gear system design, which was verified by simulation. To ensure stable performance at high speeds, a spatial swing cam mechanism was designed based on a fifth-order polynomial motion law. This design achieved low pressure angles and ensured smooth movement. Furthermore, single-factor tests were conducted to analyze how roller diameter, speed, and position affect seedling projection. The results enabled precise acceleration and directional projection of seedlings, which was crucial for achieving upright posture and consistent planting depth. An orthogonal experiment identified soil moisture content as the most significant factor affecting the planting success rate. Single-factor tests showed that at a speed of 110 r/min, the seedling picking success rate averaged 94.46%. With a projection speed of 5 m/s,

收稿日期: 2025-11-26 修回日期: 2025-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2000200)和国家自然科学基金项目(52375275)

作者简介: 孙良(1981—),男,教授,博士,主要从事农业机械设计、机构运动学与动力学优化研究,E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

seedlings achieved an ideal planting depth of 2.5 ~ 3.0 cm. Combined tests showed that the overall planting success rate was 91.6%, with an operational efficiency of 435 plants per minute and a damage rate was 2.1%. In summary, this research adopted a separated seedling-retrieving and seedling-planting collaborative method, offering a technical solution for high-speed, high-quality mechanized rice transplanting.

Key words: rice pot seedling; seedling picking and shooting device; transplanting; multi-arm rotary type; elliptical gear

0 引言

水稻钵苗因具有独立钵体,机械移栽能够有效保护根系、返青发棵快,具备显著的增产潜力^[1]。现有钵苗机械化移栽主要有机抛秧、机摆栽和机插秧等方式^[2-4],其中,机抛秧落苗不可控,种植直立度较差;摆栽和机插对钵体苗移栽虽然过程可控,但作业效率与传统毯苗机插相比效率较低(约 50%),成为影响该技术推广应用的重要因素。因此,研发适用于高速作业的水稻钵苗移栽装备对于充分发挥其农艺优势、推动其大规模应用具有重要意义^[5]。

机抛秧分为无序和有序抛栽方式,无序机抛后期田间管理较为困难,当前水稻钵苗移栽的研究与应用主要集中在有序机抛、机摆栽与机插秧方向。陈雄飞等^[6]发明了一种钵体苗顶出带式有序抛秧机,虽实现了有序抛秧,但是秧苗直立度与定植立苗要求有差距。日本井关公司生产的 PZP80 型全自动钵苗移栽机采用行星轮摆栽机构,能较好地保证直立度,但其结构复杂、使用成本较高,推广困难^[7]。辛亮等^[8]提出一种非圆齿轮-连杆组合式移栽机构,通过一套机构实现取苗、带苗与植苗动作,实现了结构优化,但受杆系结构限制,存在移栽效率低、高速运行时振动大的问题。俞高红团队^[9-10]提出一种基于非圆齿轮传动的取栽一体式机构,该机构回转一周可完成两次取栽作业,有效减小了振动,但其运动轨迹优化难度大,移栽效率仍有提升空间。吴国环等^[11]在取栽一体式结构基础上开发了三臂移栽机构用以提高栽植效率,但轨迹形状决定了其大加速度波动特性,致使栽植效率提升受限。谢世民等^[12]提出了取栽协同式轨迹交接移栽方案,通过适当增加机构数来降低移栽机构的加速度,在移栽效率提升方面进行了有益探索。综上所述,目前钵体苗移栽抛秧技术存在栽植直立度不佳,而摆栽或移栽技术存在作业效率较低等问题。

为解决现有移栽机构效率与稳定性不足难题,本文研发一种高速四臂取射秧装置。该装置通过“取秧-射秧”分离模式,取秧装置应用全齿二阶卵形椭圆齿轮传动,取消锁止弧结构,从而在高速下运行更平稳、振动更小,理论效率提升 2 倍以上。射

秧装置则通过对辊参数调节,实现速度控制与定向射秧,最终达成高速取秧与精准植秧的协同。

1 设计要求与工作原理

1.1 水稻钵苗高速取射秧装置设计要求

水稻钵苗取射秧装置设计旨在探索更高效的钵苗移栽方案,以获得可与传统毯苗机插速率相当或者更高的水稻钵苗机械移栽装备。该装置分为取投秧机构与加速射秧部件两部分,具体需满足以下要求:

(1)取投秧装置的齿轮传动系统应具备低波动、动力连续的特性,以确保运行平稳可靠。取秧臂在高效完成取秧动作时,需避免相邻臂之间的运动干涉^[13]。此外,取投秧轨迹在取苗阶段应具有特定凸起,以优化夹苗片的探深性能^[14];而在投秧阶段则需保持光滑连续,从而确保落秧位置准确、姿态稳定,具有良好的指向性。

(2)射秧装置需协调对辊转速与射秧速度,调控植苗深度、射秧角度与机具前进速度,保障秧苗直立度;应具备对射秧速度、射入深度与落苗姿态的精确调控能力,确保栽植质量符合农艺标准。

1.2 钵苗投射装置的工作原理

根据水稻钵苗移栽的轨迹要求,设计了一种四臂全齿椭圆行星轮系取苗机构。该机构在齿轮箱上呈 90°间隔布置 4 个移栽臂,实现旋转一周完成 4 次移栽作业。

如图 1 所示,该取秧装置主要由齿轮箱驱动部分与取秧臂执行部分构成。齿轮箱传动部分包含 4 组行星椭圆齿轮。由于 4 个取秧臂的运动轨迹完全一致,本文选取其中一臂作为分析对象。装置运行过程中,太阳轮固定于机架,当齿轮箱绕太阳轮的中心点 O 旋转时,中间轮与太阳轮啮合并绕 O_1 旋转,进而带动行星轮转动。取秧臂与行星轮固接。齿轮箱旋转一周,其取苗点相应完成一个完整的运动循环。

在该轨迹中,AC 段为取秧阶段,取秧臂由点 A 完全张开到逐渐闭合,于点 B 完成夹持;BC 段为钵苗取出阶段;CD 段为持苗阶段,保持夹紧状态;至点 D 后开始张开,DE 段为投秧阶段,完成取投秧动作。

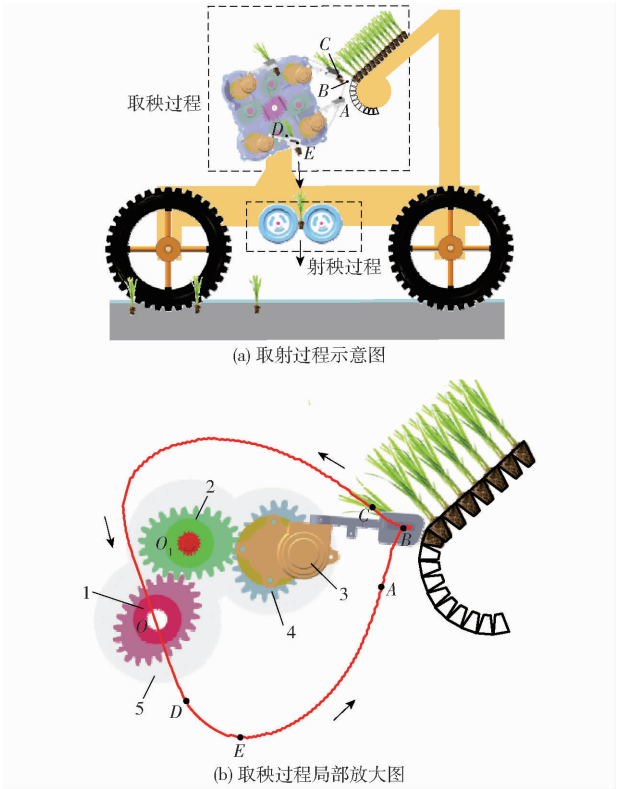


图 1 取射秧装置工作原理图

Fig. 1 Schematics of working principle of seedling picking and shooting device

1. 太阳轮 2. 中间轮 3. 取秧臂 4. 行星轮 5. 齿轮箱

抛投出的秧苗在初始惯性及重力作用下,进入对辊装置。两对辊相向等速旋转,对秧苗进行加速,使其射向田内,从而实现水稻钵苗的高效快速栽种。

2 取射秧装置运动学模型

2.1 二阶卵形椭圆齿轮传动比计算

二阶椭圆极坐标方程通常采用对应的普通椭圆参数来表示,其节曲线如图 2 所示,二阶椭圆的极坐标方程为^[15]

$$r_1 = \frac{L(1 - k_1^2)}{1 - k_1 \cos(2\theta_1)}$$
 (1)

式中 L ——普通椭圆长半轴长度
 r_1 ——太阳轮回转轴心与中间轮啮合点距离
 θ_1 ——极角 k_1 ——普通椭圆偏心率

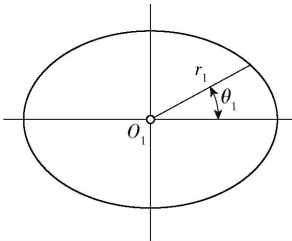


图 2 二阶椭圆齿轮节曲线

Fig. 2 Second-order elliptical gear pitch curve

二阶椭圆齿轮的传动比 i_{12} 为

$$i_{12} = \frac{k_1(k_1 - \cos(2\theta_1)) + (1 - k_1 \cos(2\theta_1))\sqrt{4 - 3k_1^2}}{1 - k_1^2}$$
 (2)

2.2 四臂取苗齿轮机构运动学模型

如图 3 所示,建立取秧装置直角坐标系。

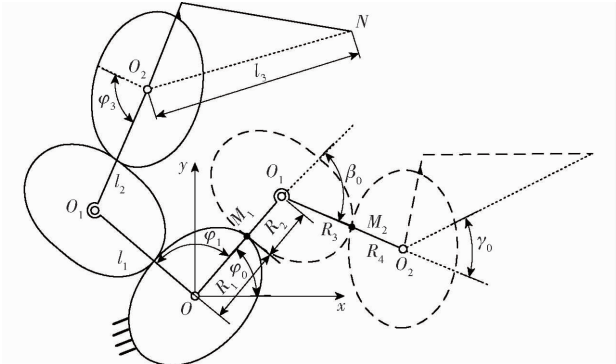


图 3 取秧装置单臂结构简图

Fig. 3 Structural diagram of single arm in seedling picking mechanism

中间轮旋转中心 O_1 相对位移方程为

$$\begin{cases} x_{o_1} = l_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) \\ y_{o_1} = l_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) \end{cases}$$
 (3)

行星轮旋转中心 O_2 相对位移方程为

$$\begin{cases} x_{o_2} = l_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_0 + \varphi_1 + \beta_0) \\ y_{o_2} = l_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) + l_2 \sin(\varphi_0 + \varphi_1 + \beta_0) \end{cases}$$
 (4)

太阳轮和中间轮啮合点 M_1 的位移方程为

$$\begin{cases} x_{M_1} = R_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) \\ y_{M_1} = R_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) \end{cases}$$
 (5)

中间轮和行星轮啮合点 M_2 的位移方程为

$$\begin{cases} x_{M_2} = l_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) + R_3 \cos(\varphi_0 + \varphi_1 + \beta_0) \\ y_{M_2} = l_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) + R_3 \sin(\varphi_0 + \varphi_1 + \beta_0) \end{cases}$$
 (6)

取秧点 N 的位移方程为

$$\begin{cases} x_N = x_{o_2} + l_3 \cos(\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \gamma_0 + \beta_0) \\ y_N = y_{o_2} + l_3 \sin(\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \gamma_0 + \beta_0) \end{cases}$$
 (7)

式中 φ_0 ——行星架安装初始角
 φ_1 ——某一位置行星架相对于初始位置转角
 φ_3 ——行星轮相对转角
 β_0 ——行星架拐角
 γ_0 ——取秧臂安装角
 l_1 ——太阳轮旋转中心与中间轮旋转中心距离
 l_2 ——中间轮旋转中心与行星轮旋转中心距离
 l_3 ——行星轮旋转中心与取秧点距离
 R_1 ——太阳轮旋转中心与中间轮啮合点距离
 R_3 ——中间轮旋转中心与行星轮啮合点距离
 (x_{o_1}, y_{o_1}) ——中间轮中心坐标
 (x_{o_2}, y_{o_2}) ——行星轮中心坐标

(x_{M_1}, y_{M_1}) ——太阳轮和中间轮啮合点坐标

(x_{M_2}, y_{M_2}) ——中间轮和行星轮啮合点坐标

(x_N, y_N) ——取秧点坐标

在对相应的方程进行一次和二次求导即可得到该位置点的速度和加速度方程。

2.3 射秧加速对辊装置运动学分析

对辊射秧装置加速过程如图 4 所示。

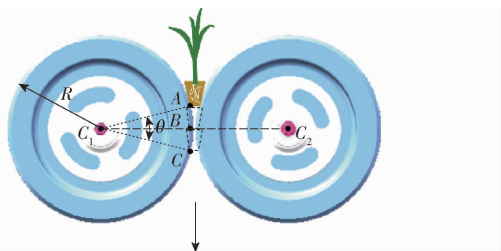


图 4 对辊射秧装置加速过程示意图

Fig. 4 Schematic of acceleration process in counter-roller seedling shooting device

落苗过程分析方程为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = 2\mu F_N R \theta + 2mgR \sin \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

最终速度通式为

$$v_0 = \min \left(\sqrt{v_1^2 + \frac{4R}{m} \left(\mu F_N \theta + mg \sin \frac{\theta}{2} \right)}, \omega R \right) \quad (9)$$

对辊加速过程中,打滑阈值转速 n_c 为

$$n_c = \frac{30}{\pi R} \sqrt{v_1^2 + \frac{4R}{m} \left(\mu F_N \theta + mg \sin \frac{\theta}{2} \right)} \quad (10)$$

射秧速度和辊子转速 n 的关系式为

$$v_0 = \begin{cases} \frac{\pi n R}{30} & (n \leq n_c) \\ \sqrt{v_1^2 + \frac{4R}{m} \left(\mu F_N \theta + mg \sin \frac{\theta}{2} \right)} & (n > n_c) \end{cases} \quad (11)$$

式中 m ——拨苗质量

R ——辊子半径

ω ——辊子角速度

v_1 ——射秧初速度

v_0 ——射秧离去速度

θ ——接触弧中心角

μ ——摩擦因数

F_N ——单辊对苗平均正压力

g ——重力加速度

实际中工况中,单辊对苗平均正压力 F_N 可能与辊子半径 R 、对辊结构设计以及钵苗钵体形状有关,在这里定性为独立参数。通过对辊转速和射秧速度分析,在打滑临界点之前,射秧速度和对辊转速 n 成

正比,当达到打滑阈值转速时,射秧速度和转速无关。

转速与辊子半径 R 的关系为:

射秧速度未达到辊线速度时

$$\frac{\partial v_0}{\partial R} = \frac{2 \left(\mu F_N \theta + mg \sin \frac{\theta}{2} \right)}{m \sqrt{v_1^2 + \frac{4R}{m} \left(\mu F_N \theta + mg \sin \frac{\theta}{2} \right)}} \quad (12)$$

射秧速度达到辊线速度时

$$v_0 = \frac{\pi n R}{30} \Rightarrow \frac{\partial v_0}{\partial R} = \frac{\pi n}{30} > 0 \quad (13)$$

3 取秧装置参数方案优选

3.1 参数优化目标

根据目前秧盘规格和相关工艺要求,优化目标包括:①为了保证取秧顺利,秧苗脱离秧盘离去轨迹应尽量垂直于对应的秧盘取苗行,取秧距离不低于钵苗钵体长度。②秧苗在回环时,钵苗根部不能和相邻的取秧臂发生干涉。③秧苗离开夹片时,在落到对辊之前应尽量保持一定的指向性,从而减少与护板发生冲击,有利于保持射秧垂直度。④整体运动轨迹应尽量平顺,整体尺寸应尽量小,这样有利于提高取秧装置整体在高速运动下的装置动力学特性。

3.2 取秧装置参数优化方案

基于 Matlab GUI 可视化编程平台,设计并开发一套面向四臂椭圆齿轮行星轮系的水稻钵苗取投秧轨迹优化系统。该系统通过集成化的人机交互界面,支持用户直观地分析各类参数对取投秧轨迹形态的影响机制^[16]。

各参数对取投秧轨迹的影响如图 5 所示。综合分析得出如下结论:行星架初始角主要影响取秧的垂直精度与角度,使取秧点位置上移、取秧角增大、投秧角增大;取秧臂转角变化会改变轨迹形态,导致环扣缩小,同时使取秧点抬升、取秧角增大;行星轮偏置角增大使轨迹趋于扁平,环扣增大,取秧点下降、取秧角减小;取秧臂长度与齿轮偏心率的增加均使轨迹右移并更扁平,环扣增大,但前者还会引起取秧点抬升;缩放系数则使轨迹左移、变圆,环扣相应减小。在此基础上,通过考察多参数间的耦合关系,采用系统化的参数优化算法,在预设约束范围内进行精细调整与多目标寻优,最终获得一组符合实际移栽农艺要求的较优参数组合:行星架初始角 φ_0 为 50° 、取秧臂转角 β 为 120° 、行星轮偏置角 δ 为 248° 、取秧臂长度 l 为 95 mm、椭圆齿轮偏心率 e 为 0.73,

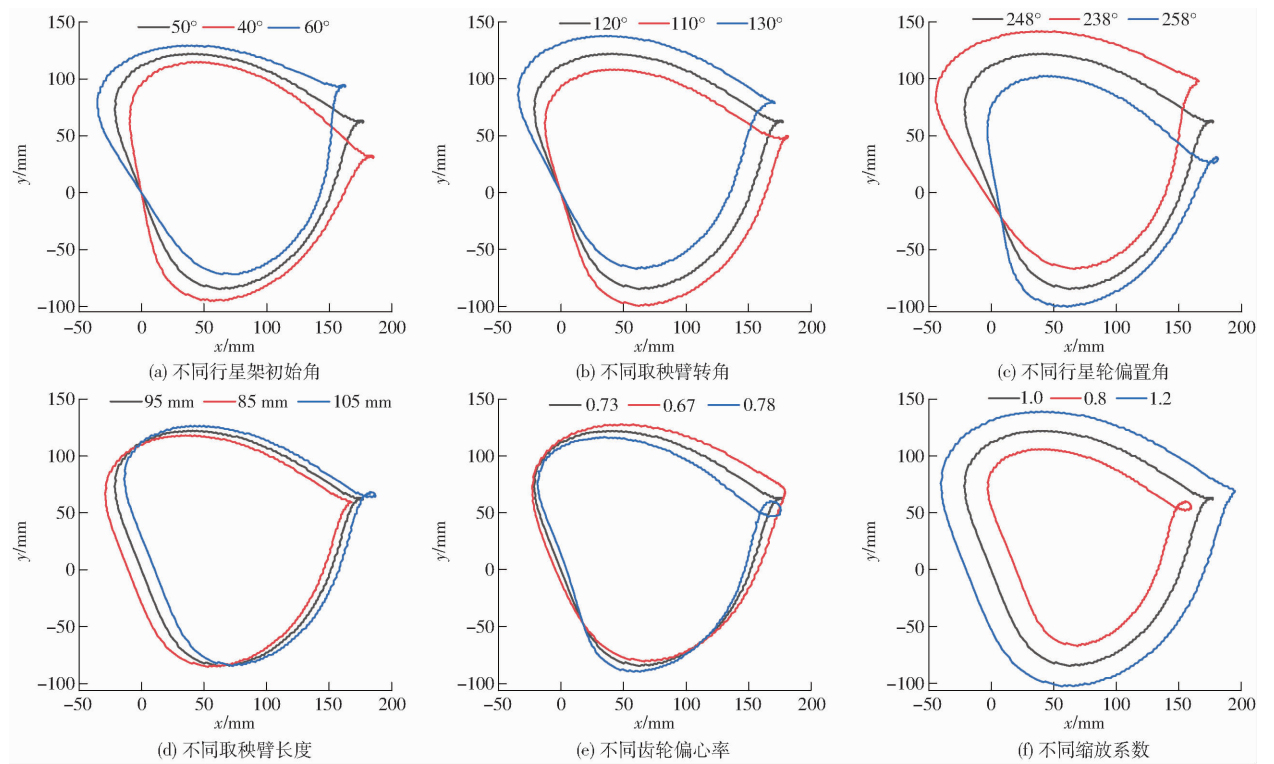


图5 各参数对取投秧静轨迹的影响

Fig.5 Effects of key parameters on static pick-up and delivery trajectory

缩放系数 k 为 1.0。优化后的“桃形”取投秧轨迹如图 6 所示。

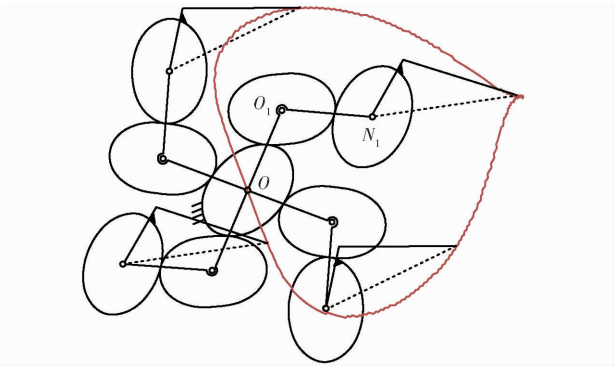


图6 Matlab 计算的取苗轨迹

Fig.6 The seedling extraction trajectory in Matlab

4 取苗臂设计与齿轮箱传动比仿真分析

4.1 取苗臂原理和设计指标

根据优化所得取秧臂长度,为满足新型四臂高速移栽装置在高速取秧工况下的性能要求,本文在夹取装置方案设计中采用圆柱空间凸轮直接驱动取秧夹片的构型。该新型方案零件数量减少 44% (由 9 件减至 5 件),能显著简化结构。

取秧装置的机构简图如图 7 所示,采用空间凸轮-摆杆系统。空间凸轮转动时带动夹片摆动,实现取秧端的开合动作。以推程为例,凸轮旋转角为 φ ,夹片摆动角度为 ψ ,驱动端单边抬升 h_2 ,取秧端单边

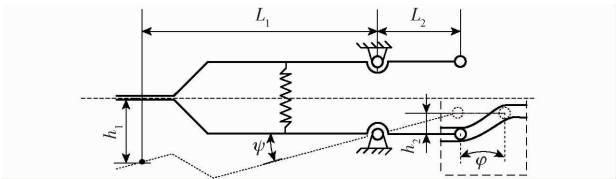


图7 摆杆夹苗机构简图

Fig.7 Schematic of swing rod seedling clamping mechanism

抬升 h_1 ,需满足条件

$$2h_1 > W \tag{14}$$

式中 W ——钵苗单穴宽度

同时,为保证装置运行平稳,应满足驱动端直径小于空间凸轮直径的 1/3,以控制 h_2 尽量减小,从而使凸轮驱动轮廓更为平顺。

4.2 空间摆动凸轮设计

4.2.1 凸轮摆杆运动过程分析

摆动圆柱凸轮的运动规律为:当凸轮工作时,凸轮的旋转带动从动件连杆进行摆动,从动件摆角 (即夹片摆动角度) ψ 与凸轮旋转角 φ 存在一定的运动规律^[17-19],即

$$\psi = f(\varphi) \tag{15}$$

为了满足高速取秧作业需求,需确保空间圆柱凸轮驱动摆杆运动时,其升程阶段与回程阶段均采用五次多项式运动规律进行控制。根据 4 个取秧臂尺寸条件,以其中一臂作为参考设计,从动件摆角的运动规律为

$$\psi(\varphi) = \begin{cases} 0 & (0^\circ \leq \varphi < 100^\circ) \\ 12(10\varphi_1^3 - 15\varphi_1^4 + 6\varphi_1^5) & (100^\circ \leq \varphi \leq 140^\circ) \\ 12 & (140^\circ < \varphi < 235^\circ) \\ 12[1 - (10\varphi_1^3 - 15\varphi_1^4 + 6\varphi_1^5)] & (235^\circ \leq \varphi \leq 265^\circ) \\ 0 & (265^\circ < \varphi \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\varphi_1 = \begin{cases} (\varphi - 100)/40 & (100^\circ \leq \varphi \leq 140^\circ) \\ (\varphi - 235)/35 & (235^\circ \leq \varphi \leq 265^\circ) \end{cases} \quad (17)$$

对角位移方程进行一次、二次求导即可得到其对应推程和回程的角速度和角加速度。图 8 为凸轮在运动过程中的角位移、角速度和角加速度曲线,摆杆运动过程中最大角加速度为 $0.0565\text{ }(^{\circ})/\text{s}^2$,其波动符合高速运动的要求。

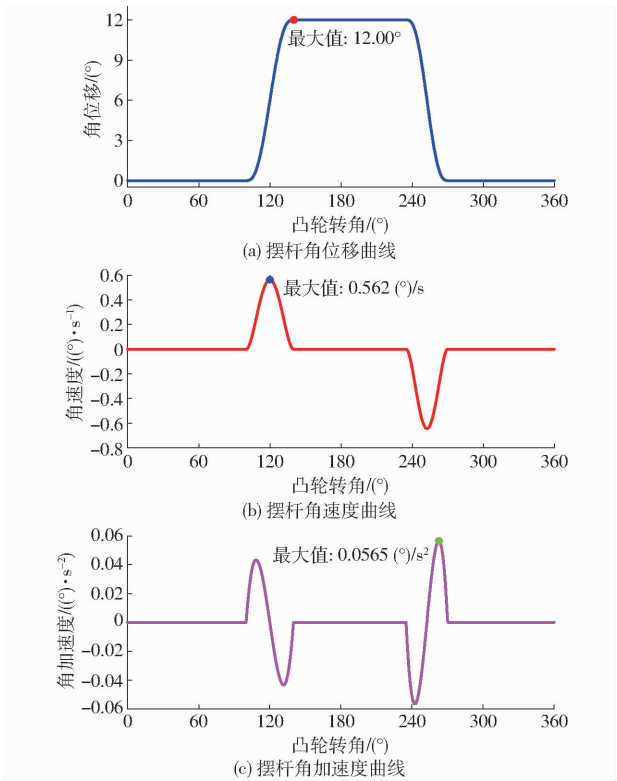


图 8 空间摆动凸轮运动特性曲线

Fig. 8 Motion characteristic curves of spatial swing cam

4.2.2 空间凸轮压力角分析

由于空间摆动凸轮在摆动过程中,产生偏离轴线的现象,在摆动空间凸轮的运动过程中,摆杆摆动端子轴线会和圆柱凸轮轴线之间存在偏差,因此,实际从动件轴线与圆柱凸轮表面的交点会偏离中心线,修正后的笛卡尔坐标展开方程^[20-21]为

$$\begin{cases} x = \frac{\pi R}{180} \left(\varphi + \arcsin \frac{L_0 \cos \psi - a}{R} \right) \\ y = L_0 \sin \psi \end{cases} \quad (18)$$

式中 a ——摆杆摆动端子轴线与圆柱凸轮轴线之间的距离

L_0 ——摆杆长度

如图 9 所示,空间凸轮压力角平面展开后,可得压力角 α 的表达式为^[22-23]

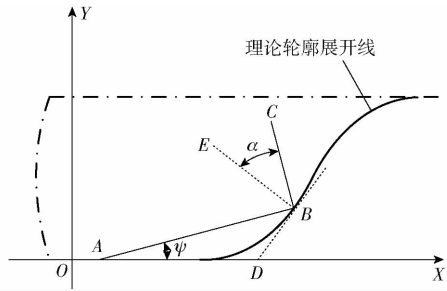


图 9 凸轮理论轮廓平面展开图

Fig. 9 Development plan of cam theoretical profile

$$\alpha = \angle EBC = \angle ABD = \arctan \frac{dy}{dx} - \psi \quad (19)$$

通过数值分析方法,将空间凸轮展开后的压力角曲线如图 10 所示,图 11 展示了取秧臂内部结构设计。该空间凸轮的压力角推程和回程均满足机械设计要求,符合高速运转的工况。

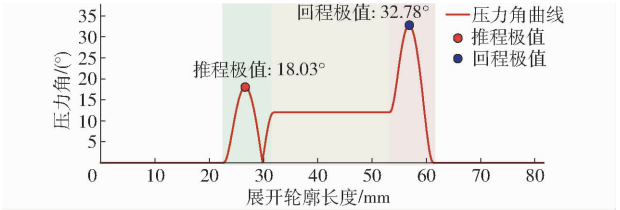


图 10 凸轮压力角曲线

Fig. 10 Cam pressure angle curve

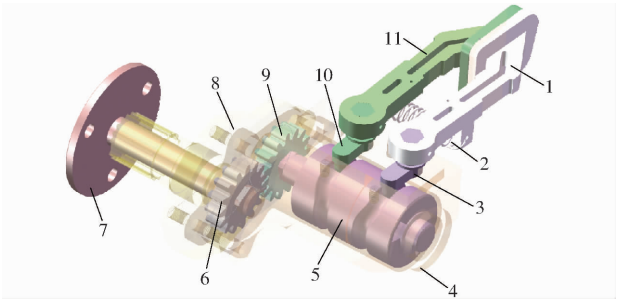


图 11 取秧臂内部结构图

Fig. 11 Transplanting arm internal structure

1. 右夹片 2. 拉紧弹簧 3. 右夹片底座 4. 取秧臂外壳 5. 圆柱空间凸轮 6、9. 驱动齿轮 7. 取秧驱动轴 8. 取秧臂底座 10. 左夹片底座 11. 左夹片

本设计将压力角作为关键变量进行量化控制,通过可控压力角设计优化机构的动力性能;同时,基于五次多项式运动规律构建凸轮曲线,精确设计凸轮转角与摆杆摆角之间的映射关系,实现高阶传动平顺性,从而从运动学源头保障高速运行时的动态平稳性。

4.3 齿轮箱传动比仿真分析

完成四臂水稻钵苗取秧装置的三维建模后,在 ADAMS 环境中对其进行动力学仿真。图 12 对比本机构与传统锁止弧行星轮系齿轮箱在整个运动周期

内的传动比仿真结果。本机构的第 1、2 级传动比最大值均为 1.45,总传动比最大值为 2.02,呈现周期性变化。对比分析表明,本机构在齿轮啮合阶段的总传动比最大值,以及整个周期内的传动波动,均显著低于传统取秧机构,传动过程更为平稳,且无传动比突变现象,满足高速低冲击的运行要求与设计指标。

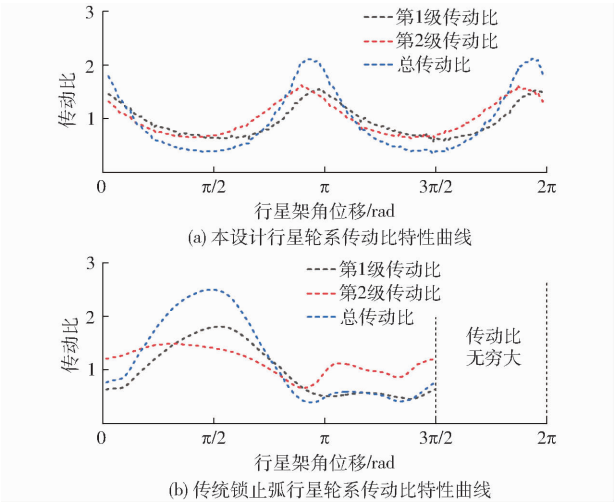


图 12 本设计和传统锁止弧设计传动比特性对比曲线
Fig. 12 Transmission characteristics of proposed and conventional designs

5 试验

5.1 取秧装置试验

本试验基于自主搭建的物理样机平台开展。如图 13 所示,该试验台架主要包括:两行秧箱、四臂取秧装置、对辊式射秧装置(辊直径 200 mm)以及植苗箱。试验材料为苗龄 20 d、含水率为 40% 的标准水稻钵苗秧盘。为采集运动数据,试验配备了高速摄像系统与红外测速仪。植苗箱内的田壤经旋耕处理,并在试验前沉淀 12 h。

为验证取秧装置的可行性,本研究首先进行了

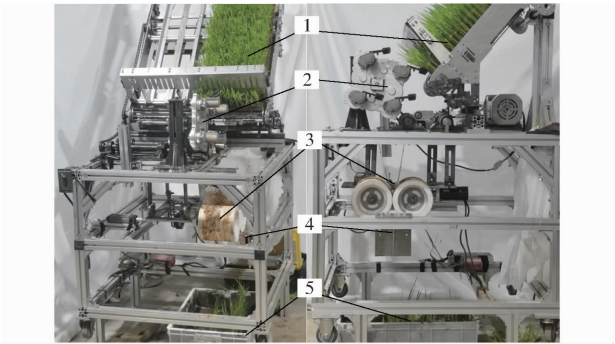


图 13 取射秧联合试验台
Fig. 13 Combined test bench for rice seedling picking and shooting
1. 秧苗秧箱 2. 取秧装置 3. 射秧装置 4. 红外测速仪 5. 植苗箱

取秧与射秧的单一性能试验。在搭建好的试验台上开展运动学测试。试验过程中,采用高速摄像机对取秧装置的运动轨迹进行捕捉记录,并基于视频数据进行分析^[24]。

利用图形分析软件,对采集到的取秧位置点进行分析,并通过红色点将取秧点位置依次显性标注,从而得到取秧轨迹点,然后将该实际轨迹和理论轨迹进行对比分析,如图 14 所示。理论轨迹和实际轨迹几乎保持一致,符合设计要求。

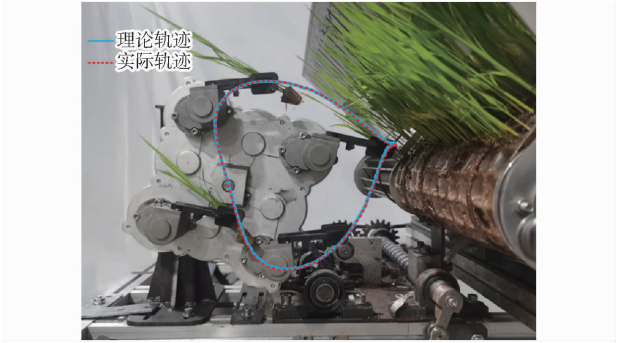


图 14 样机试验轨迹和理论轨迹对比
Fig. 14 Experimental trajectory validation against analytical model

在取秧试验中,设置取苗转速从 60 r/min 起始,以 10 r/min 为梯度逐步提升至 180 r/min,记录每一转速下的取秧成功率。利用高斯过程回归对采集数据进行拟合,结果如图 15 所示。可以看出,在转速低于 110 r/min 时,平均取秧成功率始终维持在 95.0% 以上;当转速上升至 110 r/min 后,因试验台振动加剧与甩苗惯性增大,取苗成功率随转速提高呈现逐渐下降的趋势。

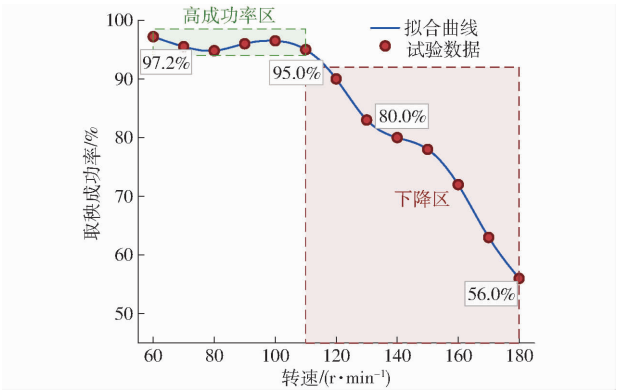


图 15 转速和取秧成功率之间的关系曲线
Fig. 15 Relationship between rotational speed and seedling picking success rate

在根据上述试验数据,设定转速 110 r/min 进行 5 组取秧试验结果表明:平均取秧成功率为 94.46%,各次试验成功率波动范围为 93.2% ~ 96.8%,表明装置运行稳定且重复性良好,满足设计要求。

5.2 射秧装置试验

5.2.1 射秧速度和入土深度试验

为保证试验结果的可参考性,本研究选取杭州市萧山区南阳街道试验田的土壤作为试验土基,进行射秧速度与钵体入土深度的试验。该土壤经旋耕处理后,被填充至规格为 520 mm × 350 mm × 150 mm 的试验箱内,并静置沉淀 12 h。此制备流程旨在确保土壤条件符合当地农艺要求,从而保证试验结果的可靠性与参考价值。如图 16 所示,在含水率 50% 的条件下,测得射秧速度和根钵入土深度之间的关系。随着射秧速度的增加,秧苗根部的入土深度随之增加,受限于土壤阻力和试验箱土基深度的影响,当速度超过 12 m/s 时,入土深度随着射秧速度的增加,变化趋势逐渐放缓,当射秧速度达到 5 m/s 时,深度为 2.5 ~ 3.0 cm,满足该工况下水稻钵苗种植农艺要求。

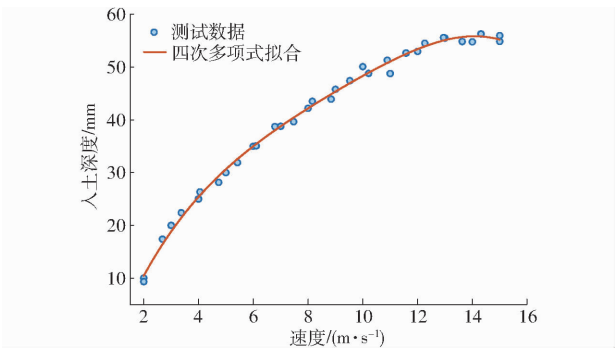


图 16 射秧速度和入土深度关系曲线

Fig. 16 Relationship between shooting velocity and soil penetration depth

5.2.2 对辊转速和射秧离去速度试验

由于钵苗和对辊的接触属于较复杂的曲面接触,并且钵苗根部含水率和根系排布也会对加速效果产生一定的影响。为了获得比较准确可靠的参数关系,进行样机射秧试验。

通过控制对辊转速,并利用红外测速仪与角度测量仪分别测得秧苗根部入土初速度及钵苗入土姿态,进而系统评估对辊半径、转速、射秧速度、射秧深度与直立度之间的关系。

在进行对辊转速和射秧离去速度关系研究试验时,选取两种尺寸规格的对辊进行对比试验,数据拟

合曲线如图 17 所示。

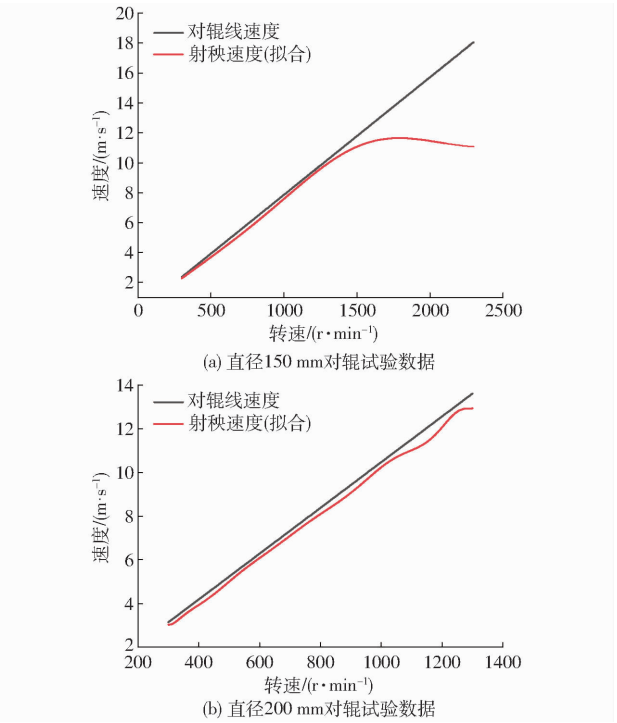


图 17 不同转速与射秧速度的拟合曲线

Fig. 17 Fitting curves of different rotational speeds and seedling shooting speeds

试验结果表明,在栽植辊直径一定时,射秧速度随对辊转速增加而增大,但存在一个临界转速。超过该临界点后,射秧速度将不再增长而趋于稳定,此现象与 2.2 节的理论分析相符。此外,射秧速度亦受栽植辊直径的显著影响,随着栽植辊直径的增大,对应的临界转速点向更高转速区间移动,使得射秧速度的稳定上限得以显著提高。当栽植辊直径增至 200 mm 时,射秧速度的稳定上限被显著提升 12 m/s 以上,该速度完全满足种植作业要求。

5.2.3 静态条件下射秧倾角和立苗角度试验

为研究射秧装置在动态与静态条件下秧苗的射秧角,本试验进行了静态模拟分析。如图 18 所示,为使秧苗在实际作业中的合速度方向垂直向下,需为其赋予一定的横向速度。为此,本研究通过调节左右对辊垂直方向偏差,并利用高速摄像机对标记的秧苗根部进行轨迹追踪,以标定垂直线为基准,综合评估了射秧轨迹倾角。

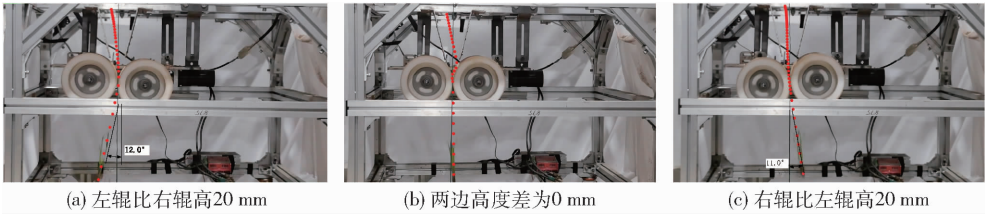


图 18 不同对辊位置高度差对射秧的影响

Fig. 18 Effect of height difference between roller pairs on seedling ejection

同时,为了确保秧苗植苗角度与实际射秧倾角的一致性,通过角度测量仪,测量植苗箱内每棵秧苗栽植角度,试验效果如图 19 所示。最后取每次植苗

箱内秧苗直立度倾角的平均值,左倾、垂直、右倾的平均值分别为 12.89°、1.23°和 11.61°。射秧根部轨迹角度最大平均差为 0.89°,符合要求。

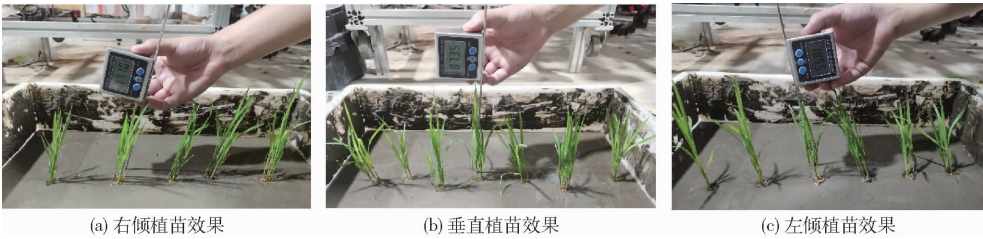


图 19 各个落苗方向植苗效果角度测量

Fig. 19 Angular measurement of planting effectiveness for various seedling-drop directions

目前高速水稻钵苗插秧机平均工作效率为 0.36 hm²/h,单行取栽作业效率为 160 株/min。6 行移栽机田间前进速度为 0.4~0.8 m/s,对应射秧机为 320 次/min,对应前进速度为 0.68~1.36 m/s,为保证钵苗垂直落入泥土中,结合离去速度 5~7 m/s,射秧入射角应该在 7.82°~15.78°之间调节。该试验对实际水稻钵苗移栽具有指导意义。

5.3 正交试验

5.3.1 试验设计

以取秧臂转速 *A*、对辊转速 *B*、射秧角度 *C*、土壤含水率 *D* 为试验因素进行四因素三水平正交试验,如表 1 所示。利用取射秧试验台进行试验,每组试验重复 3 次,计算植苗成功率。其成功评价指标为:①栽植直立度在 ±15°之间。②栽植深度在 20~30 mm 之间。

表 1 正交试验因素水平
Tab. 1 Orthogonal test factors and levels

水平	因素			
	取秧臂转速/ (r·min ⁻¹)	对辊转速/ (r·min ⁻¹)	射秧角度/ (°)	土壤含水 率/%
1	100	600	0	25
2	110	750	6	45
3	120	900	12	65

5.3.2 试验结果及分析

正交试验方案及结果见表 2,对试验数据进行多元拟合,得到各个因素与植苗成功率 *Y* 之间的回归方程

$$Y = -652 + 8.92A + 0.45B + 1.41C + 3.48D - 0.0013AD + 0.0042BC - 0.04A^2 - 0.127C^2 - 0.0358D^2 \quad (20)$$

表 3 方差分析结果表明,对辊转速、射秧角度、土壤含水率对植苗成功率均具有显著影响。具体而言,在钵苗根土比保持恒定的条件下,随着对辊转速的提高,散坨率呈上升趋势;而对辊转速过低则会对栽植深度产生不利影响。此外,土壤含水率亦显著

表 2 正交试验方案与结果

Tab. 2 Orthogonal experiment and results

序号	因素				植苗成功 率 <i>Y</i> /%
	<i>A</i> / (r·min ⁻¹)	<i>B</i> / (r·min ⁻¹)	<i>C</i> / (°)	<i>D</i> /%	
1	100	600	6	45	83.0
2	120	600	6	45	83.5
3	100	900	6	45	78.5
4	120	900	6	45	79.0
5	110	750	0	25	71.0
6	110	750	12	25	72.0
7	110	750	0	65	74.0
8	110	750	12	65	75.0
9	100	750	6	25	70.0
10	120	750	6	25	73.0
11	100	750	6	65	73.5
12	120	750	6	65	75.5
13	110	600	0	45	80.0
14	110	900	0	45	77.0
15	110	600	12	45	82.0
16	110	900	12	45	80.5
17	100	750	0	45	81.5
18	120	750	0	45	82.5
19	100	750	12	45	85.0
20	120	750	12	45	86.0
21	110	600	6	25	69.5
22	110	900	6	25	67.5
23	110	600	6	65	75.0
24	110	900	6	65	72.5
25	110	750	6	45	92.2
26	110	750	6	45	91.8
27	110	750	6	45	91.5

影响植苗的最终直立度。

5.3.3 因素影响效应分析

基于已建立的植苗成功率回归模型,图 20 中各响应面展示了不同因素交互作用对植苗成功率 *Y* 的影响规律。各图均在固定其余变量的条件下,分析两因素间的交互效应。

表 3 方差分析结果
Tab.3 Analysis of variance results

来源	平方和	均方	F	P
A	5.33	176.72	3.88	0.072 2
B	27.00	27.00	19.67	0.000 8
C	17.52	17.52	12.76	0.003 8
D	42.19	42.19	30.73	0.000 1
AB	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	1.000 0
AC	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	1.000 0
AD	0.250 0	0.250 0	0.182 1	0.677 1
BC	0.562 5	0.562 5	0.409 7	0.534 2
BD	0.062 5	0.062 5	0.045 5	0.834 6
CD	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	1.000 0
A ²	85.33	85.33	62.15	0.000 1
B ²	252.08	252.08	183.60	0.000 1
C ²	111.02	111.02	80.86	0.000 1
D ²	1 092.52	1 092.52	795.73	0.000 1
残差	16.48	1.37		
失拟项	16.23	1.62	13.16	0.072 6
误差	0.246 7	0.123 3		
总和	1 240.75			

图 20a 显示,取秧臂转速 A 一定时,对辊转速 B 升高, Y 呈先增后减趋势; B 一定时, Y 总体变化平缓,但 A 超过 110 r/min 后下降。在 A 为 110 r/min、 B 为 735 r/min 时, Y 较优。图 20b 中,取秧臂转速 A 一定时,射秧角度 C 增大, Y 先升后降; C 一定时, Y 变化幅度较小。较优条件为: A 为 110 r/min、 C 为 6° 。图 20c 表明,取秧臂转速 A 一定时,随土壤含水率 D 增加, Y 先增后减; D 一定时, Y 变化平缓。较

优条件为: A 为 110 r/min、 D 为 46%。图 20d 中,对辊转速 B 一定时,随射秧角度 C 增加, Y 先升后降; C 一定时,随 B 增加, Y 亦呈先升后降趋势。较优条件为: B 为 735 r/min、 C 为 6° 。图 20e 显示,对辊转速 B 一定时,土壤含水率 D 增加使 Y 先增后减; D 一定时, B 增加同样使 Y 先升后降。当 D 处于较高或较低值时, Y 显著下降。较优点为: B 为 735 r/min、 D 为 46%。图 20f 中,射秧角度 C 一定时,随土壤含水率 D 增加, Y 先增后减; D 一定时, C 变化对 Y 影响较小,表明 Y 主要受 D 制约。较优条件为: C 为 6° 、 D 为 46%。

综上,在考察范围内,取秧臂转速约 110 r/min、对辊转速约 735 r/min、射秧角度 6° 、土壤含水率约 46% 时,植苗成功率较高。

为确定植苗成功率最高的参数组合,本研究基于 5.3.2 节建立的植苗成功率回归模型,利用 Design-Expert 软件对参数进行最优化求解。优化模型为

$$\begin{cases} \max Y \\ \text{s. t. } \begin{cases} 100 \text{ r/min} \leq A \leq 200 \text{ r/min} \\ 600 \text{ r/min} \leq B \leq 900 \text{ r/min} \\ 0^{\circ} \leq C \leq 12^{\circ} \\ 25\% \leq D \leq 65\% \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

最佳参数组合为:取秧臂转速 A 为 110 r/min,对辊转速 B 为 734 r/min,射秧角度 C 为 6.7° ,土壤含水率 D 为 46%,此时植苗成功率 Y 为 92.01%。

5.4 取秧装置联合试验

为验证取秧与射秧装置的协同性能,本研究在

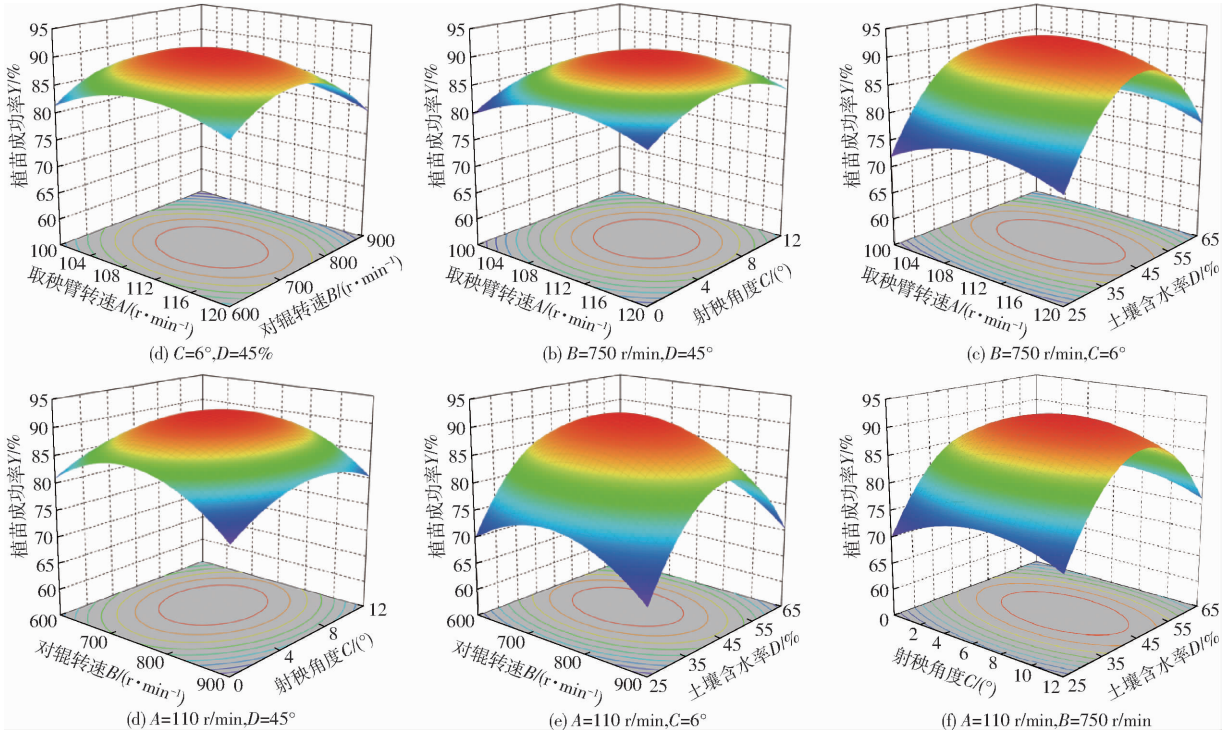


图 20 因素交互作用对植苗成功率影响的响应面

Fig.20 Response surfaces of interaction effects on planting success rate

前期试验基础上开展了台架联合试验,系统评估了联动工况下两装置的匹配性与稳定性,并基于综合成功率、植苗合格率、作业效率及秧苗损伤率等指标,全面评价了系统综合作业性能。

5.4.1 试验条件与参数设定

基于正交试验所确定的最优参数组合,本研究选用育苗期为 25 d 的钵苗作为试验对象。试验秧盘规格为每盘 408 株(12 株×34 行),土壤含水率控制在 45%~50% 范围内,以此开展取秧与射秧联合作业试验。

5.4.2 试验方法与评价指标

试验时,装置连续运行,完成从秧盘取秧、投秧、经对辊加速射秧直至植苗入土的全过程。每组试验连续作业 2 min,共进行 5 组重复试验。评价指标定义如下:

(1)综合成功率为成功植苗合格株数占总理论取苗株数的百分比。

(2)植苗合格率为符合农艺要求的株数占成功取苗并加速射秧的植苗株数的百分比。本试验中“合格”定义为:秧苗入土深度在 2.5~3.5 cm 范围内,且植后直立度倾角小于 15°。

(3)作业效率是指单位时间内成功栽植的秧苗株数。

(4)秧苗损伤率(散坨率)为出现钵体松散或明显茎秆损伤的株数占总作业株数的百分比。

为客观评估栽植过程中秧苗的损伤情况,本研究结合高速摄像记录的钵体散坨过程与栽植终端状态进行综合判定。具体损伤判定标准为:①若秧苗钵体出现土壤明显脱落(经验性判断脱落体积大于 10%)。②其栽植终端状态呈“漂移”(歪斜、倾倒)或“未植入”状态。③茎秆弯折角度大于等于 15°。④出现表皮撕裂、明显挤压变形等结构性破损。该标准兼顾过程与结果,确保判定的工程相关性和可操作性。栽植效果见图 21。

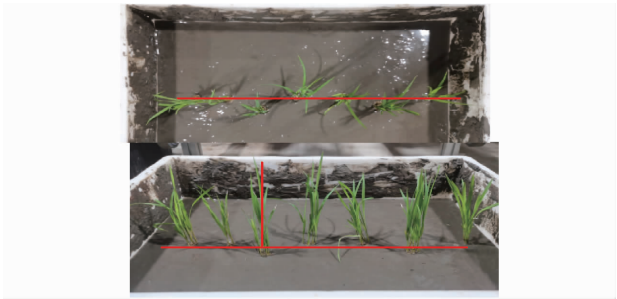


图 21 植苗效果

Fig. 21 Seedling planting performance

5.4.3 试验结果与分析

联合试验结果如表 4 所示。对结果进行分析可

知:系统的综合成功率平均值为 91.6%,与独立取苗试验的成功率(95.0%)基本一致,表明取秧与射秧两装置衔接顺畅,射秧过程未对取秧稳定性产生负面影响。植苗合格率平均值高达 95.2%,验证了射秧速度(4.5 m/s)与前进速度(0.8 m/s)匹配良好,秧苗能获得优异の入土姿态和直立度。平均作业效率稳定在 435 株/min,提升 172%,达到了设计要求,体现了四臂装置的高效性。秧苗损伤率平均值为 2.1%,处于较低水平,说明该高速射秧方式对秧苗的冲击在可接受范围内,满足农艺对秧苗完整性的要求。

表 4 取射秧装置联合试验结果

Tab. 4 Joint test results of seedling picking and throwing mechanism

组号	总株数/ 株	成功取秧数/ 株	植苗合格数/ 株	综合成功率/%	植苗合格率/%	作业效率/(株·min ⁻¹)	秧苗损伤率/%
1	816	785	745	91.3	94.9	433	2.1
2	816	790	755	92.5	95.6	439	1.9
3	816	780	740	90.7	94.9	430	2.4
4	816	788	752	92.2	95.4	437	2.1
5	816	782	743	91.1	95.0	432	2.2
平均值	816	785	747	91.6	95.2	435	2.1

联合试验结果表明,本文所设计的四臂取射秧装置在优化参数下协同工作稳定、可靠,实现了高速、高成功率取苗与高直立度、低损伤植苗的统一,综合性能满足水稻钵苗高效精准移栽的作业要求。

6 结论

(1)设计并验证了一种基于二阶椭圆齿轮传动的四臂取秧机构。该机构通过优选椭圆参数和传动设计,最大传动比仅为 2.02,实现了高速运行与低冲击的特性;并通过自主开发的轨迹调控程序与台架试验,证实了其工作性能与可行性。

(2)深入分析了射秧速度与对辊转速、半径之间的关联,揭示了其对秧苗入土深度的影响规律。同时,通过对射秧入射角与移栽机前进速度的匹配研究,为机构的精准控制与优化奠定了理论基础。

(3)通过对比不同机械化种植模式,明确了钵苗移栽的技术优势。在此基础上,采用增加取秧臂数量(由 2 株/r 增至 4 株/r)、将取秧与植苗环节分离并结合射秧装置,将最高转速由 80 r/min 提升至 110 r/min,使栽植效率提升 172%(由 160 株/min 提升至 435 株/min),同时提高了整机作业的可靠性,为提升水稻种植效率与机械化水平提供了新路径。

参 考 文 献

- [1] 原培超, 纪要, 张文毅, 等. 水稻钵苗机械化移栽研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 29–34, 57. YUAN Peichao, JI Yao, ZHANG Wenyi, et al. Research status and prospects of mechanized transplanting of bowl-seedlings in rice[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 29–34, 57. (in Chinese)
- [2] 叶洋洋, 肖丽萍, 黄粮粮, 等. 水稻钵苗移栽机发展研究与展望[J]. 南方农机, 2018, 49(19): 5–7.
- [3] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273–1289. ZHANG Hongcheng, GONG Jinlong. Research status and development discussion on high-yield agronomy for mechanized rice cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1273–1289. (in Chinese)
- [4] 陈品, 徐春春, 纪龙, 等. 2024 年我国水稻产业形势分析及 2025 年展望[J]. 中国稻米, 2025, 31(2): 1–5.
- [5] 张妮, 张国忠. 水稻种植机械化技术研究现状与展望[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 5–10. ZHANG Ni, ZHANG Guozhong. Research status and prospect of rice planting mechanization[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17): 5–10. (in Chinese)
- [6] 陈雄飞, 廖仲维, 刘木华, 等. 一种钵体苗顶出带送式有序抛秧机: CN 116438982 A[P]. 2023–07–18.
- [7] 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, 51(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, 51(9): 1–20. (in Chinese)
- [8] 辛亮, 王明成, 张浩, 等. 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 Liang, WANG Mingcheng, ZHANG Hao, et al. Optimization design and experiment of non-circular gear-linkage combination type transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 63–70. (in Chinese)
- [9] 童俊华, 俞高红, 朱赢鹏, 等. 三臂回转式蔬菜钵苗取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 113–121. TONG Junhua, YU Gaohong, ZHU Yingpeng, et al. Design and experiment of three-arms rotary vegetable plug seedling pick-up mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 113–121. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 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, 149. WU Guohuan, YU Gaohong, ZHOU Haili, et al. Reverse design and tests of three-arms rotary rice seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 84–91, 149. (in Chinese)
- [12] 谢世民, 周誉株, 薛晓迪, 等. 水稻钵苗取-栽协同作业式移栽机构设计与试验[J]. 中国水稻科学, 2026(1): 131–144. XIE Shimin, ZHOU Yuzhu, XUE Xiaodi, et al. Design and experiment of rice pot seedling pick-up and planting cooperative working transplanting mechanism[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2026(1): 131–144. (in Chinese)
- [13] YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 43–55.
- [14] HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and test of combined pick-up device for automatic and precise transplanting of vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 17–32.
- [15] 崔巍, 赵亮, 刘立晶, 等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 79–84. CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 79–84. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 汤腾跃. 无误差的摆动从动件空间凸轮综合设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. TANG Tengyue. A comprehensive error free design for oscillating follower spatial cam[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [18] ABDERAZEK H, YILDIZ A R, MIRJALILI S, et al. Comparison of recent optimization algorithms for design optimization of a cam-follower mechanism[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 191: 105237.
- [19] POZO-PALACIOS J, FULBRIGHT N J, VOTH J A F, et al. Comparison of forward and inverse cam generation methods for the design of cam-linkage mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 190: 105465.
- [20] 罗鑫鑫, 贺沅玮. 摆动式圆柱凸轮机构的 3D 凸轮设计法[J]. 机械工程师, 2019(1): 44–46, 49. LUO Xinxin, HE Yuanwei. 3D cam design method of oscillating cylindrical cam mechanism[J]. Mechanical Engineer, 2019(1): 44–46, 49. (in Chinese)
- [21] LAN Weibin, FAN Shouwen, FAN Shuai. Analysis of structural design defects in parallel overloading mechanisms with cam transmission mechanism[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 107: 717–739.
- [22] 陈俊华, 辛勇. 摆动从动件圆柱凸轮凹槽轮廓线的 3D 展开法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 121–124. CHEN Junhua, XIN Yong. Research of cylindrical cam with oscillating follower 3D spread[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 121–124. (in Chinese)
- [23] YIN Honghuan, YU Hongbin, ZHANG Weiye. Influence of cam profile errors in a modulator on the dynamic response of the heald frame[J]. AUTEX Research Journal, 2024, 24(1): 20240007.
- [24] LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Kinematic analysis and experiment of planetary five-bar planting mechanism for zero-speed transplanting on mulch film[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2016, 9(4): 84–91.