

高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构设计与试验

辛亮 孙铭翼 李泽泽 朱轩卫 冯宇琛 李嘉诚

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对目前旱地蔬菜钵苗移栽机大多适用于大株距(大于 260 mm)移栽且投接苗与栽植位置作业高度差大、移栽性能不佳等问题,本文提出一种高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构。根据中小株距蔬菜钵苗移栽农艺指导与机构设计要求,解析双行星架差速行星轮系栽植机构工作原理并建立其运动学理论模型;结合所提出优化目标构建目标函数,开发了基于 Matlab GUI 的栽植机构计算机辅助分析优化设计软件,通过人机交互方式获得 1 组较优的机构设计参数组合。通过三维建模与装配以及 ADAMS 软件虚拟仿真,初步验证了机构正确性与合理性。开展栽植机构物理样机试制与试验台架系统开发研究,通过空转试验测试,验证了栽植机构实际作业轨迹、姿态与虚拟仿真及理论设计的一致性;开展栽植机构接苗与栽植性能试验,试验结果表明,栽植机构在接苗与栽植各项试验指标均较为优秀,能够满足栽植机构预期设计要求与旱地移栽机械标准,验证了该机构的可行性与实用性。

关键词: 蔬菜钵苗移栽;栽植机构;双行星架差速行星轮系;非圆齿轮;优化设计

中图分类号: S223.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0161-09

OSID:



Optimization Design and Experiment of High Catching and Low Planting Type Differential Variable Attitude Planetary Gear System Planting Mechanism

XIN Liang SUN Mingyi LI Zeze ZHU Xuanwei FENG Yuchen LI Jiacheng

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

Abstract: In response to the current problem that dryland vegetable pot seedling transplanting machine mostly applies to large plant spacing (more than 260 mm) transplanting, and there is a large height difference between the seedling catching and planting position, as well as a poor transplanting performance, the high catching and low planting type differential variable attitude planetary gear system planting mechanism was proposed. Based on the agronomic guidance for small and medium plant spacing of vegetable pot seedling transplanting and transplanting mechanism design requirements, the working principle of the double planetary carrier differential planetary gear system planting mechanism was analyzed and its kinematic theoretical model was established. A computer-aided analysis and optimization design software for planting mechanism based on Matlab GUI was developed by combining the objective function constructed with the proposed optimization objectives. A set of optimal mechanism design parameter combinations was obtained through human-computer interaction. The correctness and rationality of the mechanism were preliminarily verified through 3D modeling and assembly, as well as virtual simulation by ADAMS software. The experimental research on the physical prototype of planting mechanisms and the development of test bench systems were carried out. Through idle testing, the consistency of trajectory and attitude of planting mechanism among the actual operation, virtual simulation, and theoretical design was verified. The experimental research on the seedling catching and planting performance of planting mechanism was conducted. The results showed that the planting mechanism was excellent in all experimental indicators of seedling catching and planting, which could meet the expected design requirements of planting mechanism and the standards of dry land transplanting

收稿日期: 2024-06-06 修回日期: 2024-06-28

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

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

machinery, and it verified the feasibility and practicality of the planting mechanism.

Key words: vegetable pot seedlings transplanting; planting mechanism; double planetary carrier differential planetary gear system; non circular gears; optimization design

0 引言

中国是世界蔬菜生产第一大国,超过 60% 的蔬菜种植采用钵苗移栽方式^[1],实现蔬菜自动化移栽已成为农业生产的迫切需要和未来发展趋势^[2]。现阶段旱地移栽机械无论半自动或全自动机型基本均针对大株距栽植开发^[3-4]。具有代表性的欧美国家多采用机电一体化技术开发大型全自动移栽机,如 Ferrari Futura Twin^[5],结构复杂、价格昂贵,适用大地块平原;日韩多采用精密小型移栽机,如日本洋马 PF2R 型全自动旱田钵苗移栽机^[6],移栽株距为 260 ~ 800 mm^[7-8]。而大多数绿叶蔬菜要求中小株距种植,因此仅能依靠人工或少量半自动移栽,劳动强度大、人工成本高、生产效率低。

不论人工投苗的半自动移栽机还是能实现自动投苗的全自动移栽机,最终均需栽植机构实现植苗作业,因此其作业性能起决定性作用^[9]。目前大多数移栽机受整体配置结构限制,投苗接苗处位置高,田间栽植位置低,因此作业高度差大。常见栽植机构主要有传统旋转式、多连杆式、齿轮滑道式以及行星轮式等。传统旋转式多应用于半自动机型,在旋转圆盘上均匀布置多个栽植器,作业形成圆形相对轨迹,最高点接投落苗最低点栽植,结构大、接苗栽植效果差;日本井关提出的七杆式栽植机构^[10]与陈星谷等^[11]提出的曲柄摇杆复合平行四杆式栽植机构为典型多连杆机构,作业轨迹有所改善,但为达到接苗位置,栽植器整体结构特别庞大,导致仅能单臂往复作业、振动大;日本洋马齿轮滑道式栽植机构,受长滑道限制也仅能安装一个栽植器,滑道易磨损,不适宜高速移栽^[12];尹大庆等^[13]提出的高速变姿态鸭嘴式栽植机构与 IQBAL 等^[14]设计的双行星架轮系栽植机构,利用行星轮系机构传动特点实现了栽植器轨迹和姿态优化,虽可缓解部分接苗姿态与振动问题,但为满足移栽机接苗与栽植位置较大高度差,行星轮系整体或栽植器结构庞大,因此导致仅能单臂作业,高速作业性能不佳,或双臂作业虽达到作业高度但质量、空间也会过大,较难实现中小株距作业。

针对上述栽植机构存在不同程度的结构庞大、高速作业振动大、接苗成功率低、栽植效果不佳等问题,根据中小株距蔬菜钵苗移栽农艺指导,结合全自动与半自动移栽机高位置接苗与低位置栽植的配置

设计需求,本文采用差速轮系、双行星架轮系以及非圆齿轮不等速传动特性结合的方式,提出一种高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构,并针对该机构开展理论建模、优化设计、软件开发和试验研究。

1 设计要求与工作原理

1.1 设计要求

为了满足栽植机构实现高接低栽的配置与中小株距栽植需要以及提高接苗栽植性能要求,栽植机构需确保整体轨迹高度及其接苗与栽植位置高度差,适用于株距 150 ~ 200 mm,栽植器结构小巧避免钵苗与内壁发生过多碰撞,工作时形成接苗、运苗、栽植、返程 4 个阶段作业工序。

接苗阶段:栽植机构相对运动状态作业要求如图 1 所示,接苗阶段鸭嘴式栽植器需在最高接苗点附近(AB 段)变化姿态,使接苗口始终朝向接苗点,同时接近接苗位置时栽植器应逐渐保持竖直,减小小接苗点附近水平速度,提高接苗容错率,适应不同角度的接投苗。

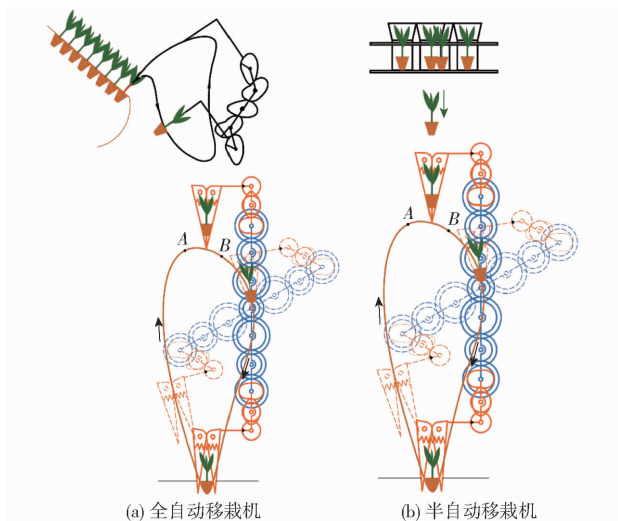


图 1 栽植机构配合作业设计要求示意图

Fig. 1 Schematics of design requirements for planting mechanism matching operation

运苗阶段:栽植器需平稳运行且使钵苗尽可能处于栽植器最低位置,运动轨迹圆滑,行进方向运行作业空间小,栽植器作业姿态倾角不宜大,防止转速增加造成钵苗损伤或甩出。

栽植阶段:栽植机构绝对运动状态如图 2 所示,整体作业高度需足够大,栽植阶段鸭嘴式栽植器进入和离开土壤时(CD 段)需控制姿态变化,且与土壤接触部分形成的绝对运动轨迹环扣需较小,使其

摆动角度差减小,降低栽植器在土壤中的扰动,形成有利于钵苗栽植直立度的小穴口;栽植时确保栽植器姿态尽可能保持竖直,最低点水平与竖直速度趋近于零,实现栽植机构零速栽植,提高栽植质量,并且栽植后轨迹不前倾,避免出现推倒秧苗现象。

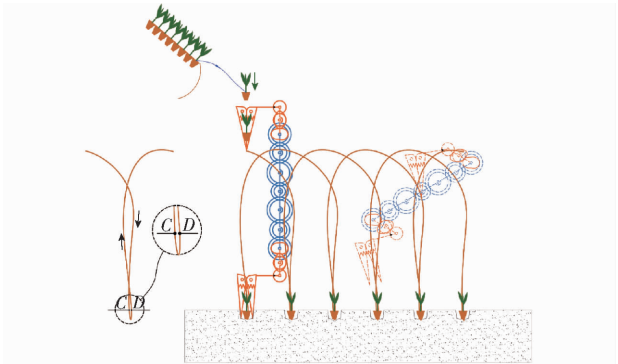


图 2 栽植机构绝对运动状态示意图

Fig. 2 Schematic of absolute motion state for planting mechanism

返程阶段:返程阶段前半段鸭嘴式栽植器需保持张开,防止夹苗、带苗,但需使栽植器在点 A 之前完成闭合,且维持闭合状态直到下一个接苗点位置准备接苗,进行循环作业。

鸭嘴式栽植器作业要求:当栽植器运行到最低点时,鸭嘴需快速打开,钵苗以竖直姿态落下,鸭嘴保持张开并随着双行星架轮系机构运转,直到完全越过栽植好的钵苗后闭合,双行星架轮系继续回转带动栽植器进行下一栽植作业循环过程。因此,栽植器姿态在最低点进行栽植时需与地面垂直,鸭嘴开合宽度大于钵苗钵体尺寸。鸭嘴开合装置正常运行或鸭嘴在土层中遇到无法逾越的阻力与障碍时不能出现卡死的情况,同时在满足凸轮加工工艺要求的前提下,使鸭嘴能够快速且平稳开启,并尽量减小栽植时的振动。

1.2 工作原理

为了实现上述各作业要求,设计栽植机构以双臂作业行星轮系机构为基本构型,提出利用差速轮系、双行星架轮系以及非圆齿轮不等速传动特性相结合的方式,构成栽植机构整体传动机构与栽植器配合方案,如图 3 所示。由于栽植机构为相位角相差 180° 对称布置,因此仅对单侧作业部件进行说明。

差速传动特性主要由传动机构总成实现,双行星架轮系传动机构由第 1 行星轮系机构与第 2 行星轮系组成,第 1 行星轮系由两套相互啮合的圆齿轮组成,第 2 行星轮系由非圆齿轮与圆齿轮组成两级传动;栽植器由凸轮、栽植器壳体、拨杆、压缩弹簧、推杆、鸭嘴片、连杆 I 和连杆 II 组成。

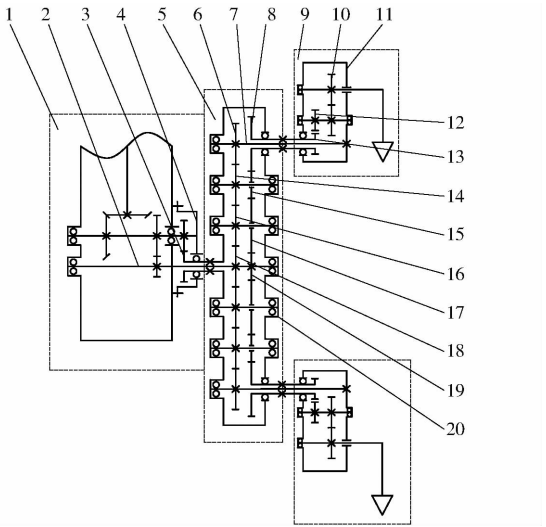


图 3 栽植机构工作原理图

Fig. 3 Principle diagrams of planting mechanism

- 1. 传动机构总成 2. 中心轴 3. 传动从动齿轮 4. 传动箱
- 5. 第 1 行星轮系机构 6. 行星齿轮 I 7. 行星轴 8. 行星齿轮 II
- 9. 第 2 行星轮系机构 10. 第 2 轮系行星齿轮 11. 第 2 齿轮箱
- 12. 非圆中间齿轮 13. 中心非圆齿轮 14. 第 2 中间齿轮 I
- 15. 第 2 中间齿轮 II 16. 第 1 中间齿轮 I 17. 第 1 中间齿轮 II
- 18. 中心齿轮 I 19. 中心齿轮 II 20. 第 1 齿轮箱

动力通过传动机构总成使中心轴与传动从动齿轮获得传动比为 1:3 的同向旋转动力,因此通过中心轴传递中心齿轮 I、中心齿轮 II 与通过传动从动齿轮传递第 1 齿轮箱进行同向差速转动;通过第 1 行星轮系机构中两列不同的中间齿轮传动关系,使行星齿轮 I 获得与中心齿轮 I 间传动比为 1:2 的动力,同时使行星齿轮 II 获得与中心齿轮 II 间传动比为 1:1 的动力,行星齿轮 I 与行星齿轮 II 分别通过传动使第 2 行星轮系机构随着第 1 行星轮系机构的旋转反方向整周旋转,并且第 2 齿轮箱内部的非圆齿轮行星轮系 1:1 传动的相对旋转运动,使栽植机构中与第 2 轮系行星齿轮固接的栽植器获得特殊的接苗、栽植轨迹与姿态。整体栽植机构第 1 行星轮系和第 2 行星轮系均处于竖直状态时其整体高度最大,从而实现较高位置接苗较低位置栽植;而机构行进方向作业时与第 1 行星轮系机构反向旋转的第 2 行星轮系机构带动栽植器运行空间变小,从而实现中小株距栽植需求;通过非圆齿轮不等速传动的配合,实现栽植器在接苗阶段变化姿态始终朝向接苗落苗位置,栽植阶段变化姿态实现零速投苗、小栽植穴口以及防推倒秧苗轨迹;机构旋转一圈完成两次栽植作业。

鸭嘴式栽植器结构原理如图 4 所示,固接于第 2 齿轮箱的凸轮与铰接于栽植臂壳体的拨杆在压缩弹簧的作用下推动推杆上下往复移动,推杆驱动相互铰接的连杆 I、连杆 II 运动,从而驱动与连杆 II 固

由于主行星架两组齿轮为同轴关系, 因此只需计算 1 组齿轮转动中心坐标, 第 1 中间齿轮 I 转动中心点 A 坐标为

$$\begin{cases} x_A(\varphi) = (R + i_{12}R) \cos(\varphi_0 + \varphi) \\ y_A(\varphi) = (R + i_{12}R) \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (11)$$

式中 R ——中心齿轮 I 分度圆半径, mm

i_{12} ——中心齿轮 I 与第 1 中间齿轮 I 分度圆半径之比

第 2 中间齿轮 I 转动中心点 B 坐标为

$$\begin{cases} x_B(\varphi) = (R + 2i_{12}R + i_{13}R) \cos(\varphi_0 + \varphi) \\ y_B(\varphi) = (R + 2i_{12}R + i_{13}R) \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (12)$$

式中 i_{13} ——中心齿轮 I 与第 2 中间齿轮 I 分度圆半径之比

行星齿轮 I 转动中心点 C 坐标为

$$\begin{cases} x_C(\varphi) = (2R + 2i_{12}R + 2i_{13}R) \cos(\varphi_0 + \varphi) \\ y_C(\varphi) = (2R + 2i_{12}R + 2i_{13}R) \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (13)$$

非圆中间齿轮转动中心点 D 坐标为

$$\begin{cases} x_D(\varphi) = x_C(\varphi) + a \cos(\varphi_c + \varphi_{4a}(\varphi)) \\ y_D(\varphi) = y_C(\varphi) + a \sin(\varphi_c + \varphi_{4a}(\varphi)) \end{cases} \quad (14)$$

式中 φ_c ——第 2 齿轮箱初始安装角度, rad

第 2 轮系行星齿轮转动中心点 E 坐标为

$$\begin{cases} x_E(\varphi) = x_D(\varphi) + 2r \cos(\varphi_c + \varphi_{4a}(\varphi)) \\ y_E(\varphi) = y_D(\varphi) + 2r \sin(\varphi_c + \varphi_{4a}(\varphi)) \end{cases} \quad (15)$$

式中 r ——上第 2 行星齿轮分度圆半径, mm

2.2 栽植器运动学分析

栽植器结构与运动分析如图 6 所示, 第 2 行星轮系行星齿轮与凸轮转动中心相同, 凸轮与第 2 齿轮箱固定, 在 XOY 坐标系下, 过凸轮中心 E 水平方向引入辅助线 EP_1 , 其与推杆 EP_2 垂直。

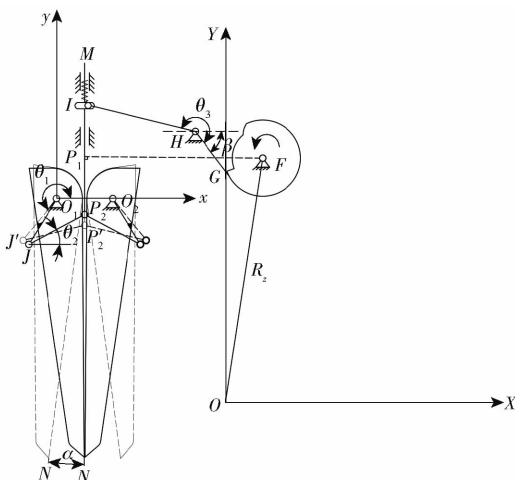


图 6 栽植器运动学分析图

Fig. 6 Kinematic analysis diagram of planter

通过第 2 行星轮系行星齿轮可求得点 P_1 坐

标为

$$\begin{cases} x_{P_1}(\varphi) = x_E(\varphi) - L_{O'P_1} \cos(\varphi_{4a}(\varphi) + \varphi_{g_2H_2}) \\ y_{P_1}(\varphi) = y_E(\varphi) - L_{O'P_1} \sin(\varphi_{4a}(\varphi) + \varphi_{g_2H_2}) \end{cases} \quad (16)$$

通过点 P_1 坐标可求出栽植器尖点 N 坐标为

$$\begin{cases} x_N(\varphi) = x_{P_1}(\varphi) - L_{P_1N} \cos\left(\varphi_{4a}(\varphi) + \varphi_{g_2H_2}(\varphi) + \frac{\pi}{2}\right) \\ y_N(\varphi) = y_{P_1}(\varphi) - L_{P_1N} \sin\left(\varphi_{4a}(\varphi) + \varphi_{g_2H_2}(\varphi) + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (17)$$

以左鸭嘴转动中心 O_1 为原点建立坐标系, 通过以上几何关系以及行星轮系运动学分析, 通过 Matlab 软件对该运动学模型进行编程, 求解出每个时刻坐标值并以动画形式输出显示, 便于后续辅助分析与优化。

令 x_{O_1} 、 y_{O_1} 分别表示 x 、 y 方向分量表达式, 建立栽植器理论模型^[17], 已知常量为 L_{O_1J} 、 L_{JP_2} 、 $x_{O_1P_2}$, 已知变量 θ_1 。

建立矢量方程

$$L_{O_1J} + L_{JP_2} = L_{O_1P_2} \quad (18)$$

将矢量方程转换为解析形式, 即

$$\begin{cases} x_{O_1J} = L_{O_1J} \cos \theta_1 \\ y_{O_1J} = L_{O_1J} \sin \theta_1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} x_{O_1P_2} = x_{O_1J} + L_{JP_2} \cos \theta_2 \\ y_{O_1P_2} = y_{O_1J} + L_{JP_2} \sin \theta_2 \end{cases} \quad (20)$$

由式(19)、(20)可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sqrt{L_{JP_2}^2 - (x_{O_1P_2} - x_{O_1J})^2}}{x_{O_1P_2} - x_{O_1J}} \quad \left(0 < \theta_2 < \frac{\pi}{2}\right) \quad (21)$$

根据上述理论分析, 当鸭嘴张开角度为 α 时点 J 和点 P_2 坐标为

$$\begin{cases} x_{O_1J'} = L_{O_1J} \cos(\theta_1 - \alpha) \\ y_{O_1J'} = L_{O_1J} \sin(\theta_1 - \alpha) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} x_{O_1P_2'} = x_{O_1J'} + L_{O_1J} \cos \theta_2' \\ y_{O_1P_2'} = y_{O_1J'} + L_{O_1J} \sin \theta_2' \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{其中 } \theta_2' = \arctan \frac{\sqrt{L_{JP_2}^2 - (x_{O_1P_2'} - x_{O_1J'})^2}}{x_{O_1P_2'} - x_{O_1J'}} \quad (24)$$

求得推杆推程 c_{11} 为

$$c_{11} = |y_{O_1P_2'} - y_{O_1P_2}| \quad (25)$$

分析 HI 段与 HG 段, 根据几何关系得到点 G 的坐标方程为

$$\begin{cases} x_{O_1G} = x_{O_1H} + L_{HG} \cos \beta \\ y_{O_1G} = y_{O_1H} - L_{HG} \sin \beta \end{cases} \quad (26)$$

其中
$$\beta = \theta_3 + \arcsin \frac{y_{o_1I} - y_{o_1H}}{L_{HI}} - \pi \quad (27)$$

当鸭嘴张开角度为 α 时

$$\begin{cases} x_{o_1G'} = x_H + L_{HG} \cos \beta' \\ y_{o_1G'} = y_H - L_{HG} \sin \beta' \end{cases} \quad (28)$$

其中
$$\beta' = \theta_3 + \arcsin \frac{y_{o_1I} - |y_{o_1P_2} - y_{o_1P_2}| - y_{o_1H}}{L_{HI}} - \pi \quad (29)$$

则凸轮推程 c_{22} 为

$$c_{22} = |r_{GE} - r_{G'E}| \quad (30)$$

其中
$$r_{GE} = \sqrt{(x_{o_1G} - x_{o_1E})^2 + (y_{o_1G} - y_{o_1E})^2} \quad (31)$$

$$r_{G'E} = \sqrt{(x_{o_1G'} - x_{o_1E})^2 + (y_{o_1G'} - y_{o_1E})^2} \quad (32)$$

3 优化软件开发及参数确定

3.1 优化目标

根据蔬菜钵苗移栽农艺指导与栽植机构配置设计要求,结合适用中小株距栽植作业范围为 150 ~ 200 mm,设立优化目标^[18-19]:包括两栽植臂最短距离大于 10 mm,确保栽植臂不干涉;穴口宽度为 0 ~ 30 mm;齿轮箱距地面距离大于 20 mm;非圆齿轮模数大于 2.5 mm;栽植器出入土角度差为 0° ~ 20°;轨迹高度大于 500 mm;穴口直立度(穴口中点与栽植最低点偏移量)小于 10 mm。

3.2 优化软件及结果

根据所建立的运动学模型以及目标函数,通过 Matlab GUI 编写高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构计算机辅助分析优化设计软件,结合不同参数对优化目标影响规律与栽植机构设计经验,通过人机交互方式进行栽植机构优化设计^[20],软件界面如图 7 所示。

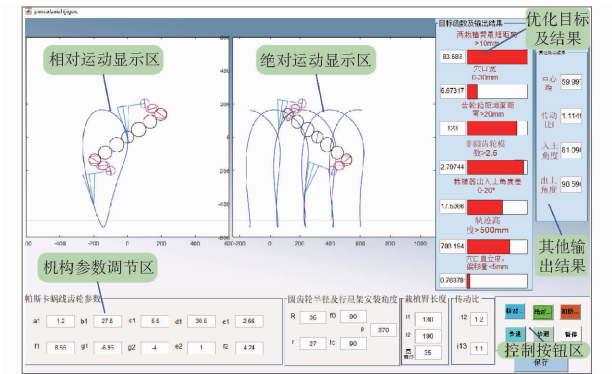


图 7 栽植机构优化设计软件界面

Fig.7 Optimization design software for planting mechanism

通过计算机辅助优化设计软件获得 1 组较优的机构参数组合,包括帕斯卡蜗线齿轮参数: $a_1 = 1.2$, $b_1 = 27.5$, $c_1 = -5.5$, $d_1 = 30.5$, $e_1 = 2.66$, $f_1 =$

8.55, $g_1 = -6.95$, $g_2 = -4$, $e_2 = 1$, $f_2 = 4.24$;结构参数: $i_{12} = 1.2$, $i_{13} = 1.1$, $R = 36$ mm, $r = 27$ mm, $b = 35$ mm, $\varphi_0 = 90^\circ$, $\varphi_c = 90^\circ$, $L_1 = 130$ mm, $L_2 = 190$ mm。

当株距为 185 mm 时,机构优化目标为:两栽植臂最短距离为 83.58 mm、穴口宽为 6.67 mm、齿轮箱距地面为 123 mm、非圆齿轮模数为 2.80 mm、栽植器出入土角度差为 17.51°、轨迹高度为 703.19 mm、穴口直立度为 0.76 mm。经优化软件验证,在该组机构参数组合下,株距分别为 150、200 mm 时均符合目标要求。

4 虚拟仿真与物理样机验证试验

4.1 ADAMS 虚拟仿真

根据优化设计软件确定的参数组合对栽植机构进行结构设计并三维建模,包括差速传动总成、帕斯卡非圆齿轮双行星架轮系机构以及栽植臂和鸭嘴栽植器等。按照软件优化参数中初始安装位置进行整体装配,经干涉检验合格后,形成栽植机构整体模型,如图 8a 所示。

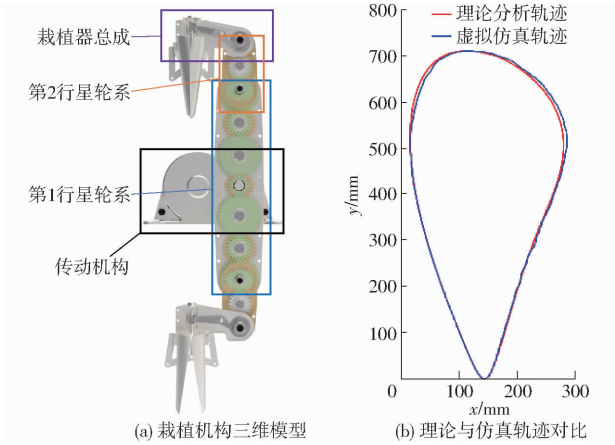


图 8 栽植机构三维模型与轨迹对比验证

Fig.8 Comparison and verification of 3D model and trajectory of planting mechanism

为了初步验证栽植机构可行性,判断整体运行空间与株距实现情况等,首先将栽植机构三维模型导入 ADAMS 虚拟样机仿真软件中进行相对运动模拟状态运动仿真^[21],设定驱动轴转速为 60 r/min,仿真时间为 2 s,步长为 0.01 s,通过仿真使栽植机构进行整体运转,将所获得的仿真相对运动轨迹与软件中理论轨迹对比分析,如图 8b 所示,结果表明两者基本保持一致。

同时获取栽植机构整体结构运行空间,其中栽植器运行纵向接苗与栽植位置高度差可达 900 mm 以上,双行星架轮系机构运转行进方向最大距离为第 1 行星轮系机构外壳运转半径,仅 298 mm,而鸭

嘴栽植器外壳行进方向的相对最大运行空间仅约为 300 mm。相较于同等条件下常规旋转式或双臂行星轮系栽植机构,栽植器结构至少缩小 1/3 以上,可实现增加接苗与栽植高度差至少 228 mm 以上,行进方向运行空间缩小约 300 mm,不仅能减小运行惯性力、避免较大振动以及秧苗在栽植器内过多碰撞导致的破损,而且为实现中小株距栽植提供途径。

利用 ADAMS 软件中的传感器与脚本仿真模拟实际工况,进行绝对运动状态下的接苗与栽植虚拟试验验证。保持驱动轴转速为 60 r/min,设定前进速度为 0.37 m/s,步长为 0.01 m/s,模拟仿真结果如图 9 所示。仿真结果表明,栽植器在接苗阶段可以实现变姿态运转始终朝向接苗位置接苗,成功接苗后与栽植器贴合性较好,在栽植阶段通过差速变姿态运转实现小穴口并且没有出现推苗与带苗的现象。因此,进一步验证了栽植机构工作原理的正确性与结构设计的合理性,也为下一步试制物理样机、接苗可靠性试验与栽植性能试验奠定基础。

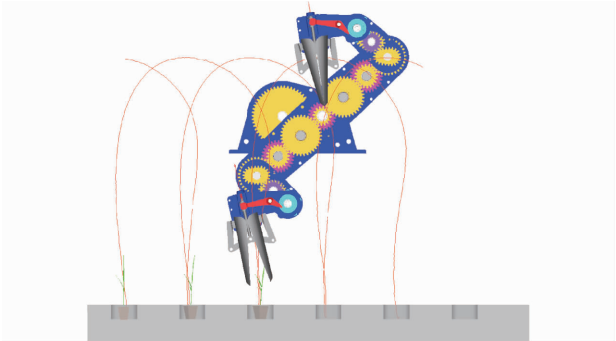


图 9 ADAMS 模拟栽植试验

Fig.9 ADAMS simulated planting experiments

通过后处理分析导出栽植机构关键接苗点与栽植器尖点在仿真时间 2 s 内的水平和竖直速度曲线,如图 10 所示。2 s 内第 1 行星架转过 720°,当第 1 行星架转过 360°时,上栽植器到达接苗最高点,在最高点附近接苗位置点水平速度也不断降低趋于零,鸭嘴口始终对准投苗点,因此,可有效延长接苗时间,进而增加接苗成功率;而当第 1 行星架分别运动到 180°、540°时,上栽植器进行栽植动作,栽植器栽植尖点水平与竖直速度趋近于零,因此可以实现零速栽植,满足栽植机构设计要求。

4.2 栽植机构空转试验

为了验证栽植机构实际作业效果,开展物理样机的加工装配与试验台架系统开发研究,搭建的总体试验台架如图 11a 所示。首先进行栽植机构的台架空转试验测试,通过对拍摄视频进行逐帧描点的方式获得实际栽植机构栽植器尖点的相对运动作业轨迹,如图 11b 所示。

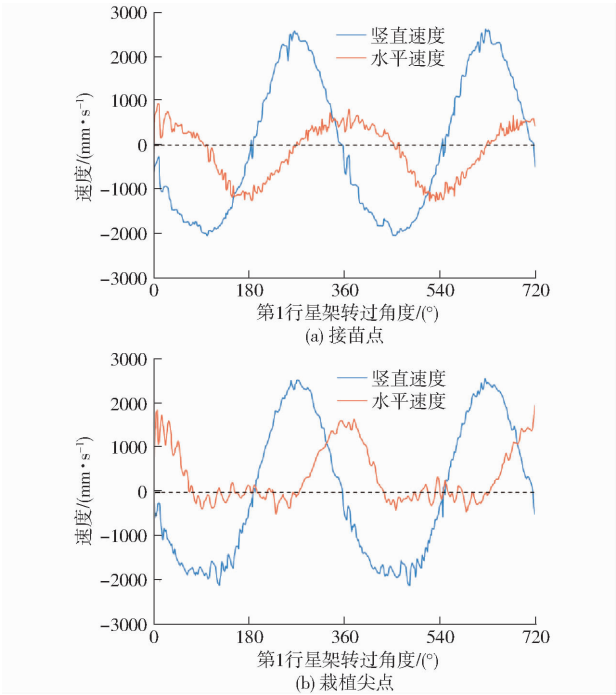


图 10 栽植器接苗点与栽植尖点速度曲线

Fig.10 Velocity curve of seedling catching point and planting tip

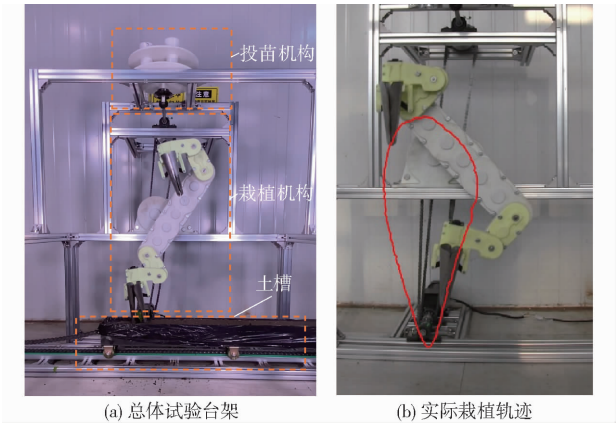


图 11 栽植机构空转试验

Fig.11 Idling test of planting mechanism

分别在此过程记录栽植机构运转过程栽植臂各关键位置的姿态角,如图 12 所示,包括接苗位置(理论姿态角度:0°)、接苗后(第 1 行星架转过 20°,理论姿态角度:5.61°)、入土时(第 1 行星架转过 165°,理论姿态角度:6.69°)、栽植点(理论姿态角度:0°)、出土时(第 1 行星架转过 225°,理论姿态角度:8.59°)、接苗前(第 1 行星架转过 335°,理论姿态角度:7.06°)6 个关键位置实际姿态角,结果表明实际与理论值基本保持一致。

通过空转试验轨迹与姿态对比分析,验证了该栽植机构实际作业轨迹、姿态与虚拟仿真及理论设计的一致性。

4.3 栽植机构接苗-栽植性能试验

为了验证其整体作业性能,设计一种与栽植机

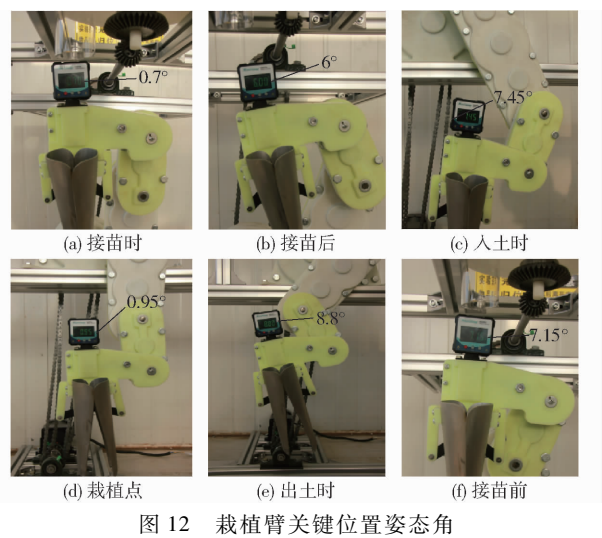


图 12 栽植臂关键位置姿态角

构相配合的转盘式投苗机构^[22]与移动土槽,通过传动设计使该机构能够自动配合进行接苗试验与栽植试验,验证栽植机构接苗成功率,并且通过移动土槽调速电机设置不同转速以完成不同株距下栽植性能试验。

栽植性能试验主要从穴口宽度均值、钵苗立苗率、栽植深度合格率、株距变异系数来衡量栽植效果^[23]。结合栽植农艺要求,规定钵苗与地面夹角范围在 55°~125°之间为合格立苗度,规定钵苗覆土表面到钵苗根部垂直距离在钵苗钵体高度 0.8~1.5 倍之间为栽植深度合格植株^[24-25]。选取适宜中小株距种植的生菜钵苗作为移栽对象进行性能试验,部分过程如图 13 所示,试验结果如表 1 所示。



图 13 栽植效果图及性能试验测量图

Fig. 13 Planting effect diagram and performance test measurement diagram

经试验研究与综合分析得到,本文所提出的高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构在株距 150、185、200 mm 下进行接苗与栽植性能试验,平均接苗成功率分别为 96.36%、95.31%、97.40%;株距变异系数分别为 2.145%、1.752%、1.935%;穴口宽度均值分别为 75.81、78.15、80.47 mm;平均立

表 1 栽植性能试验结果

Tab. 1 Planting performance test results

理论株距/mm	试验序号	株数	接苗成功率/%	株距变异系数/%	穴口宽度均值/mm	立苗率/%	栽植深度合格率/%
150	1	64	96.88	2.793	75.82	93.75	98.44
	2	64	98.44	2.018	75.70	96.88	100
	3	64	93.75	1.623	75.92	90.63	96.88
	平均值	64	96.36	2.145	75.81	93.75	98.44
185	1	64	95.31	1.369	78.32	89.06	100
	2	64	92.19	2.037	78.19	93.75	98.44
	3	64	98.44	1.851	77.95	92.19	98.44
	平均值	64	95.31	1.752	78.15	91.67	98.96
200	1	64	98.44	2.118	80.39	93.75	100
	2	64	95.31	1.711	80.58	87.50	100
	3	64	98.44	1.976	80.45	89.06	98.44
	平均值	64	97.40	1.935	80.47	90.10	99.48

苗率为 93.75%、91.67%、90.10%;平均栽植深度合格率分别为 98.44%、98.96%、99.48%。不仅在接苗与栽植两个方面性能均表现优秀,满足旱地钵苗移栽农艺要求^[26],而且还满足中小株距为 150~200 mm 栽植要求,验证了本文栽植机构可行性与实用性。经过分析存在接苗与栽植失败原因主要包括:①由于天气条件限制,部分钵苗根系盘根效果不理想,未能形成正常的土钵形状,土钵松散,导苗管长度略短,投苗机构转动盘初始安装位置不准确等原因均造成接苗失败。②缺少覆土镇压装置,鸭嘴式栽植器开穴后钵苗落入穴坑,未配合进行覆土镇压,同时部分钵苗钵体松散因此易使栽植完成后的钵苗出现倾斜甚至倒伏的现象。上述问题将在后续研究中进行完善与避免。

5 结论

(1)采用双行星架差速轮系结合非圆齿轮传动,提出了一种高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构,通过特定的传动比关系实现了两个行星架的相对转动从而满足中小株距作业要求,并且能实现高处接苗低处栽植;通过非圆齿轮不等速传动的特性,使栽植器形成特定的取栽轨迹与姿态,实现旋转 1 周完成 2 次变姿态接苗与栽植的高效运转,同时能够保证接苗成功率与栽植质量。

(2)通过对栽植机构工作原理析与运动学模型建立,设计了计算机辅助优化软件,并通过人机交互方式得到了满足优化目标的 1 组较优机构参数组合;通过对栽植机构结构设计与 ADAMS 虚拟仿真,不仅验证了仿真轨迹与理论轨迹的一致性,而且还通过对接苗点与栽植器尖点速度曲线的分析与栽植

模拟试验,验证了机构设计的正确性与合理性。

(3)以生菜钵苗为移栽对象,通过开展栽植机构在不同中小株距的接苗与栽植性能试验研究,证明了该机构不仅能实现在高位置接苗与低位置栽植作业的配置要求,而且还通过变姿态设计满足了作业过程较优的接苗与栽植性能,可适用于中小株距在 150 ~ 200 mm 之间变化,验证了该机构的可行性与实用性。

参 考 文 献

[1] 张凤兰. 我国蔬菜种业发展成效和趋势[J]. 蔬菜, 2022(5): 1-5.
ZHANG Fenglan. Development achievements and trends of vegetable seed industry in China[J]. Vegetables, 2022(5): 1-5. (in Chinese)

[2] 李林林, 邓干然, 林卫国, 等. 作物移栽机械栽植机构发展现状与趋势[J]. 现代农业装备, 2022, 43(1): 2-7.
LI Linlin, DENG Ganran, LIN Weiguo, et al. Development status and trend of mechanical planting mechanism for crop transplanting[J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(1): 2-7. (in Chinese)

[3] 崔巍, 颜华, 高希文, 等. 旱地移栽机械发展现状与趋势[J]. 农业工程, 2015, 5(2): 15-18.
CUI Wei, YAN Hua, GAO Xiwen, et al. Development status and trends of dryland transplantation machinery[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(2): 15-18. (in Chinese)

[4] 王永维, 何焯亮, 王俊, 等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 19-25.
WANG Yongwei, HE Zhuoliang, WANG Jun, et al. Experimental study on the planting performance of automatic transplanting machines for dryland vegetable bowl seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 19-25. (in Chinese)

[5] 金鑫. 现代蔬菜育苗与栽植技术及装备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

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

[7] 俞高红, 李成虎, 汪应萍, 等. 小株距高密度蔬菜钵苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 96-105, 138.
YU Gaohong, LI Chenghu, WANG Yingping, et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 96-105, 138. (in Chinese)

[8] GERVAIS L N. 中小株距蔬菜钵苗植苗机构的设计及试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
GERVAIS L N. Design and experiments of a pot seedling planting mechanism for vegetables with small and medium plant spacing[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)

[9] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78-86.
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimization design and experiment on planetary gears planting mechanism of self-propelled transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78-86. (in Chinese)

[10] 李鹏斌, 颜华, 王品隆, 等. 移栽机小株距栽植机构杆件优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 72-78.
LI Pengbin, YAN Hua, ZHANG Pinlong, et al. Optimization and test of small plant spacing planting mechanism rod for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 72-78. (in Chinese)

[11] 陈星谷, 尹文庆, 张美娜. 曲柄摇杆复合平行四边新型栽植机构的设计与试验[J]. 机械设计, 2015, 32(9): 65-70.
CHEN Xinggu, YIN Wenqing, ZHANG Meina. Optimum design and experiment of crank-rocker and parallelogram linkage mechanism of pot seedling transplanter[J]. Mechanical Design, 2015, 32(9): 65-70. (in Chinese)

[12] SATPATHY S K, GARG I K. Effect of selected parameters on the performance of a semi-automatic vegetable transplanter[J]. AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2008, 39(2): 47-51.

[13] 尹大庆, 张诺一, 周脉乐, 等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 65-72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65-72. (in Chinese)

[14] IQBAL M Z, ISLAM M N, ALI M, et al. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(6): 2605-2614.

[15] 任廷志, 刘大伟, 贡红艳. 蜗线齿轮副的设计与传动[J]. 机械设计, 2013, 30(1): 55-59.
REN Tingzhi, LIU Dawei, BEN Hongyan. Design and transmission of worm gear pair[J]. Mechanical Design, 2013, 30(1): 55-59. (in Chinese)

[16] 王国强, 蔺文刚, 赵云鹏. Pascal 蜗线齿轮的设计研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(6): 87-89.
WANG Guoqiang, LIN Wen'gang, ZHAO Yunpeng. Design and research of Pascal worm gear[J]. Automation & Instrumentation, 2016(6): 87-89. (in Chinese)

[17] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

MA Chaowei,ZHANG Hao,MA Xinming,et al. Method for the lightweight detection of wheat disease using improved YOLO v8 [J]. Transactions of the CSAE,2024,40(5):187 – 195. (in Chinese)

[14] FENG C, ZHONG Y, GAO Y, et al. Toood: task-aligned one-stage object detection [C] // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2021: 3490 – 3499.

[15] 陈伟,江志成,田子建,等. 基于 YOLO v8 的煤矿井下人员不安全动作检测算法[J/OL]. 煤炭科学技术, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240322.1343.003.html>.

[16] 玉米机械化收获减损技术指导意见[J]. 农机科技推广, 2023(10):4 – 7.

[17] 杨柯,姜春霞,张伟,等. 不同收获期对玉米子粒机械收获质量及产量的影响[J]. 玉米科学, 2023,31(3):88 – 94. YANG Ke,JIANG Chunxia,ZHANG Wei,et al. Effects of different harvesting time on the mechanical harvest quality and yield of maize grains[J]. Journal of Maize Sciences,2023,31(3):88 – 94. (in Chinese)

[18] 王金鹏,何萌,甄乾广,等. 基于改进 COF – YOLO v8n 的油茶果静态与动态检测计数方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4):193 – 203. WANG Jinpeng,HE Meng,ZHEN Qianguang,et al. *Camellia oleifera* fruit static and dynamic detection counting based on improved COF – YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):193 – 203. (in Chinese)

[19] 谢竞,邓月明,王润民. 改进 YOLO v8s 的交通标识检测算法[J/OL]. 计算机工程, <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0068742>.

[20] YANG L, ZHANG R Y, LI L, et al. Simam: a simple, parameter-free attention module for convolutional neural networks [C] // International Conference on Machine Learning. PMLR, 2021: 11863 – 11874.

[21] Detector, Anchor-Free Object. FCOS: a simple and strong anchor-free object detector [C] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2022.

[22] 刘伟宏,李敏,朱萍,等. 基于 YOLO v8n 改进的织物疵点检测算法[J/OL]. 棉纺织技术, <https://link.cnki.net/urlid/61.1132.TS.20240307.1107.004>.

(上接第 169 页)

[18] 王英. 面向高立苗率要求的栽植机构参数优化与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2014. WANG Ying. Optimization and experimental research on planting mechanism parameters for high seedling rate requirements [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)

[19] 俞高红,廖振飘,徐乐辉,等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 38 – 44. YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable pot-seedling planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38 – 44. (in Chinese)

[20] 辛亮,王明成,孙国玉,等. 番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 96 – 105. XIN Liang, WANG Mingcheng, SUN Guoyu, et al. Design and experiment of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 96 – 105. (in Chinese)

[21] 尹文庆,刘海马,胡飞,等. 旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 51 – 60. YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optmization design and experiment on eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51 – 60. (in Chinese)

[22] 韩长杰,杨宛章,司明理. 转盘式投苗机构的设计与调整[J]. 新疆农业大学学报, 2007,30(2): 74 – 76. HAN Changjie, YANG Wanzhang, SI Mingli. Design and adjustment of turnplate-type dropping seedling mechanism [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007,30(2): 74 – 76. (in Chinese)

[23] 王永维,唐海燕,王俊,等. 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化[J]. 农业机械学报, 2016,47(1): 91 – 100. WANG Yongwei, TANG Yanhai, WANG Jun, et al. Parameter optimization for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter in high-speed condition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):91 – 100. (in Chinese)

[24] 郭畅. 行星轮式茄子钵苗栽植机构的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021. GUO Chang. Design and experimental study of planetary wheel type eggplant bowl seedling planting mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[25] ZHANG Jiqiang, NIU Ziru, LI Tianhua, et al. Design and optimization of planting process parameters for 2ZYX – 2 type green onion ditching and transplanting machine [J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2020(1): 147 – 166.

[26] JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S]. 2013.