

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.007

高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验

尹大庆 张诺一 周脉乐 杨禹超 尹思泽 王金武
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了提高蔬菜钵苗栽植效率,提出了一种高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构。以羊角椒钵苗为作业对象,建立了机构运动学模型,设定优化目标,运用 Visual Basic 6.0 开发栽植机构计算机辅助设计优化软件,通过优化得到满足要求的“水滴”形理论轨迹和一组符合栽植要求的机构参数。建立了三维模型,并运用 ADAMS 软件进行虚拟仿真,形成仿真轨迹,对栽植机构摆角变化与速度曲线进行分析,验证了栽植机构设计的合理性。运用 3D 打印技术加工物理样机,并进行台架试验,得到实际轨迹,验证了理论轨迹、仿真轨迹及实际轨迹的一致性。接苗-栽植试验表明,平均栽植合格率为 99.8%,平均栽植深度合格率为 99.2%,验证了该栽植机构的实用性。

关键词: 蔬菜钵苗; 鸭嘴式; 高速; 栽植机构; 参数优化; 台架试验

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0065-08 OSID: 

Optimal Design and Experiment of High Speed Duckbill Planting Mechanism with Variable Catch-seedling Attitude

YIN Daqing ZHANG Nuoyi ZHOU Maile YANG Yuchao YIN Size WANG Jinwu
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to improve the planting efficiency of planting mechanism, a high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude for the seedling pick-up mechanism was proposed. Sheep horn pepper seedlings were taken as the objects of seedling planting. The kinematics model of the mechanism was established. Its optimization goal was established, and the visual auxiliary analysis software was developed by using Visual Basic 6.0. The parameters to meet the requirements were optimized and the “water droplet” theoretical trajectory was formed. The three-dimensional modeling was performed for the kinematics simulation testing which was carried out by ADAMS. The angle and speed curve of duckbill planting mechanism was analyzed to verify the rationality of the design for the seedling planting mechanism. Three-dimensional printing technology was used to process some parts, and the high-speed photography bench test was carried out on the physical prototype. The correctness and feasibility of the theoretical model were verified by comparing the theoretical trajectory, simulation trajectory and actual working trajectory. The experiment showed that the average good qualified rate of planting was 99.8% and the average planting depth qualified rate was 99.2%. This verified the practicality of the mechanism and provided a theoretical basis for the cooperation between seedling planting and seedling pick-up mechanism.

Key words: vegetable potted seedling; duckbill; high speed; planting mechanism; parameter optimization; bench test

0 引言

中国是世界上最大的蔬菜生产国^[1],钵苗移栽是蔬菜主要种植方式之一^[2]。市场上使用的蔬菜移栽机以半自动机型为主,人工喂苗劳动强度大、效率低^[3-5]。国外移栽机以欧美和日本、韩国的为代

收稿日期: 2019-10-13 修回日期: 2019-11-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)
作者简介: 尹大庆(1970—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与应用研究,E-mail: 63900962@qq.com
通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

表,欧美国家多采用机、电、液、汽为一体的全自动移栽机,如意大利 Ferrari 公司的全自动移栽机,效率较高,但结构复杂、价格昂贵,且仅适用于大型农场^[6]。日本、韩国多使用小型移栽机,如日本洋马公司研制的自动蔬菜移栽机,栽植机构采用滑道式,滑道易磨损,效率低^[7]。近年来,国内学者也进行了很多针对性的研究。胡建平等^[8]提出一种等速齿轮行星轮系鸭嘴式栽植机构,将鸭嘴固定在行星轮上,能够满足多株距移栽要求。俞高红等^[9]对适用于大株距的不等速行星轮系鸭嘴式蔬菜钵苗栽植机构进行了研究,通过对非圆齿轮行星轮系的优化,解决了固定在行星轮上的鸭嘴工作态度问题,使其适合大株距移栽作物。王英等^[10]、陈建能等^[11]基于非圆齿轮行星轮系提出了一系列鸭嘴式移栽装置,对栽植回程轨迹、穴口形状以及动力学等进行了优化,使栽植效果良好,且作业平稳。

喂苗速度是制约鸭嘴式栽植机构效率的主要因素,当采用自动取苗机构并快速取苗、投苗时,钵苗的快速向下与鸭嘴的较高水平速度产生矛盾。为确保接苗的准确性,本文采用非圆齿轮行星轮系结合鸭嘴式植苗器,提出一种配合自动取苗机构的高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构,优化后接苗点形成“水滴”形轨迹,以实现不等速传动获得更优良的速度和加速度特性,缩短运苗时间。

1 设计要求与工作原理

1.1 设计要求

根据蔬菜移栽的农艺要求,机构在工作时形成的轨迹既要保证接苗时鸭嘴方向与钵苗方向一致和植苗时秧苗的直立度,又要满足蔬菜钵苗的农艺特性,并确保将秧苗植入土中,如图 1 所示。要求轨迹形成穴口宽度 $w \leq 30\text{ mm}$,深度 $u \geq 45\text{ mm}$ ^[10-13]。因此要求栽植机构以特定的轨迹实现接苗、运苗、入土开穴、栽植 4 个阶段的周期运动。

1.1.1 轨迹与姿态

栽植机构轨迹与姿态如图 2、3 所示,接苗时,鸭嘴栽植器应尽量靠近投苗点,在最高点(AB 段)附近接苗,且通过在最高点的摆动产生停顿,延长接苗时间以避免漏苗以及钵苗土钵损伤。植苗时为保证钵苗直立度,鸭嘴栽植器与土壤约呈 90°角(CD 段),入土角与出土角基本一致。综上所述,针对高速非圆齿轮行星轮系取苗机构设计出配套的栽植机构,得到满足蔬菜钵苗移栽要求的运动轨迹——“水滴”形轨迹。

1.1.2 工作速度

在栽植过程中,接苗段速度降低,保证秧苗输送

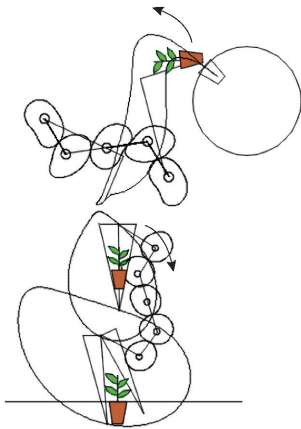


图 1 自动移栽机构示意图

Fig. 1 Mechanism schematic of automatic transplanter

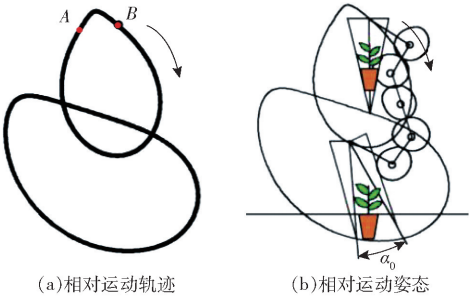


图 2 相对轨迹及姿态

Fig. 2 Relative trajectory and attitude

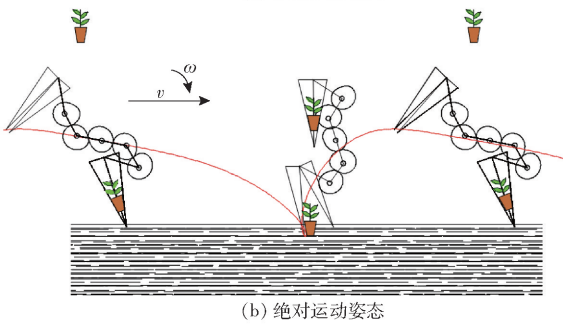
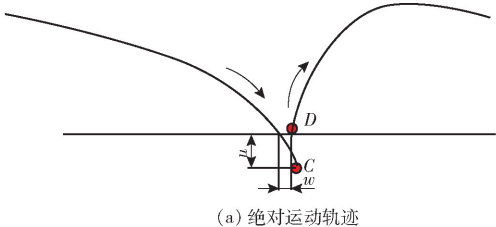


图 3 绝对轨迹及姿态

Fig. 3 Absolute trajectory and attitude

过程中无损伤;运苗段速度增加,提高植苗效率;植苗段速度减小且鸭嘴栽植器在最低点栽植速度趋于零速栽植^[4]。

1.1.3 鸭嘴栽植器开合状态

鸭嘴栽植器在运苗、开穴、接苗前保持闭合状态,当鸭嘴栽植器处于最低点时,打开鸭嘴栽植器进行钵苗栽植,在下一次接苗前(鸭嘴栽植器最低点高于秧苗顶端一段距离时)鸭嘴栽植器闭合,避免发生带苗现象。

鸭嘴栽植器开合大于秧苗钵体尺寸,且满足凸轮加工工艺要求,保证鸭嘴栽植器开合运动稳定,减少栽植部件开合振动,故要求鸭嘴栽植器张开角 $40^\circ \geq \alpha_0 \geq 30^\circ$ 。

1.2 工作原理

栽植机构包括传动和栽植两部分,如图4所示。传动部分由5个相互啮合的非圆齿轮及行星轴、中间轴、太阳轴、齿轮箱、法兰盘组成;栽植部分由凸轮、推杆、推板、支撑板、前鸭嘴支撑架、前鸭嘴、后鸭嘴支撑架、后鸭嘴、弹簧组成。动力输出轴带动齿轮箱匀速转动,使其内部的非圆齿轮相互啮合,驱动支撑板做不等速运动。凸轮固接在齿轮箱上,随着凸轮转动,推动在滑道中的推杆平动,推杆的另一侧与推板连接,并在推板的滑槽中进行往复运动,从而推动固接在推板上的前鸭嘴支撑架绕转轴转动,使前鸭嘴打开,后鸭嘴支撑架固接在支撑板上,从而达到打开鸭嘴栽植器的目的,待凸轮转过一定角度,弹簧复位驱动鸭嘴栽植器闭合,实现鸭嘴栽植器开合动作。

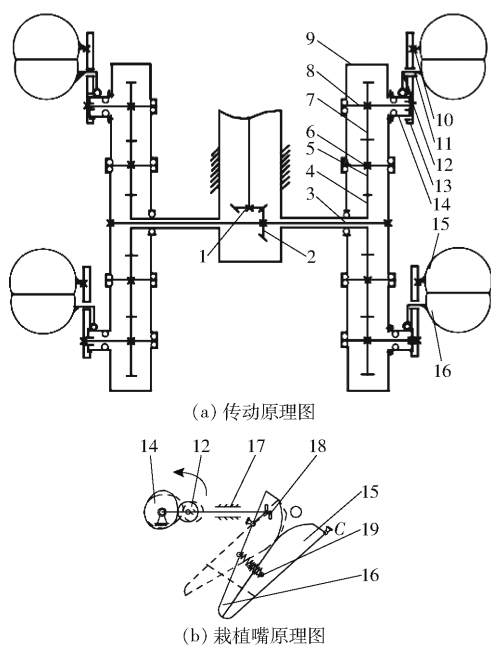


图4 栽植机构原理图

Fig. 4 Principle diagrams of seedling planting mechanism

1. 上锥齿轮 2. 下锥齿轮 3. 动力输出轴 4. 太阳轮 5. 中间轮 6. 中间轴 7. 行星轮 8. 行星轴 9. 齿轮箱 10. 后鸭嘴支撑架 11. 前鸭嘴支撑架 12. 推杆 13. 支撑板 14. 凸轮 15. 后鸭嘴 16. 前鸭嘴 17. 滑道 18. 推板槽 19. 弹簧

2 理论模型建立

2.1 传动机构理论模型

以太阳轮转动中心 O_1 为原点,水平方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴建立坐标系,机构简图如图5所示。工作过程中,行星架顺时针运动。针对传动机

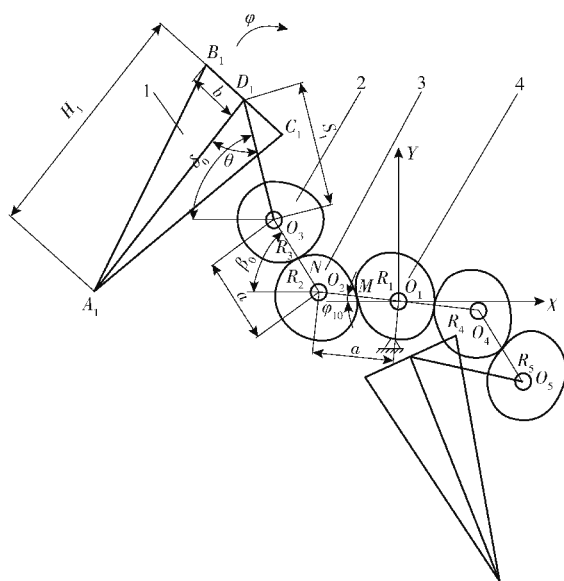


图5 栽植机构简图

Fig. 5 Schematic of seedling planting mechanism

1. 鸭嘴栽植器 2. 行星轮 3. 中间轮 4. 太阳轮

构一侧进行研究, M 为太阳轮与中间轮的啮合点, N 为中间轮与行星轮的啮合点, R_1 为太阳轮的向径, R_2 为中间轮的向径, φ_0 为整体转角, α 为太阳轮初始安装角,规定行星架顺时针转动为正,逆时针转动为负。当行星架顺时针转动 φ 时,行星架的绝对转角 $\varphi_h(\varphi)$ 为

$$\varphi_h(\varphi) = \varphi_0 + \varphi + \alpha \quad (1)$$

太阳轮的相对转角 $\varphi_{1h}(\varphi)$ 和绝对转角 $\varphi_1(\varphi)$ 分别为

$$\begin{cases} \varphi_{1h}(\varphi) = -\varphi \\ \varphi_1(\varphi) = \varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

中间轮的相对转角 $\varphi_{2h}(\varphi)$ 和绝对转角 $\varphi_2(\varphi)$ 分别为

$$\begin{cases} \varphi_{2h}(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{R_1(\varphi)}{a - R_1(\varphi)} d\varphi \\ \varphi_2(\varphi) = \varphi_h(\varphi) + \varphi_{2h}(\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式中 a ——齿轮中心距,mm

为便于机构可调,引入行星架拐角 β_0 ,则行星轮的相对转角 $\varphi_{3h}(\varphi)$ 和绝对转角 $\varphi_3(\varphi)$ 分别为

$$\begin{cases} \varphi_{3h}(\varphi) = \int_{\beta_0}^{\beta_0 + \varphi_{2h}(\varphi)} \frac{R_2(\varphi)}{a - R_2(\varphi)} d\varphi \\ \varphi_3(\varphi) = \varphi_h(\varphi) + \beta_0 - \varphi_{30} - \varphi_{3h}(\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\varphi_{30} = \int_0^{\beta_0} \frac{R_2(2\pi - \varphi)}{a - R_2(2\pi - \varphi)} d\varphi$

式中 φ_{30} ——行星轮初始安装角,rad

太阳轮转动中心坐标为

$$x_1(\varphi) = y_1(\varphi) = 0 \quad (5)$$

中间轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_2(\varphi) = a \cos(\varphi_0 + \varphi) \\ y_2(\varphi) = a \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

行星轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_3(\varphi) = x_2(\varphi) + a \cos(\varphi_0 + \varphi + \beta_0) \\ y_3(\varphi) = y_2(\varphi) + a \sin(\varphi_0 + \varphi + \beta_0) \end{cases} \quad (7)$$

由于机构关于太阳轮中心呈 180° 对称, 另一侧齿轮分析同理。

根据以上几何关系及栽植点、接苗点轨迹方程, 利用 Visual Basic 6.0 编程求解传动机构动态坐标值。

2.2 栽植嘴机构理论模型

栽植嘴机构简图如图 6 所示, 以太阳轮中心为原点建立坐标系。太阳轮固连在机架上, 随底盘前进, 因行星轮中心与凸轮中心原点相同。以凸轮中心为原点建立坐标系, 整体绕 O 点旋转, 移栽机前进方向与 X 轴正向相同。令 x_0, y_0 为参数在以 O 点为原点的坐标系下的坐标分量, x'_0, y'_0 为参数在 O' 点为原点的坐标系下的坐标分量。行星架 OO' 为原动件, 点 F 为前鸭嘴转轴中心, 点 G 为前鸭嘴与推板铰接点, 点 A_1 为栽植点, OO' 顺时针转动带动鸭嘴开合机构转动。凸轮随行星架 OO' 以角速度 ω 转动角度 φ , 通过建立数学模型, 判断鸭嘴栽植器位置来优化栽植机构轨迹与姿态。

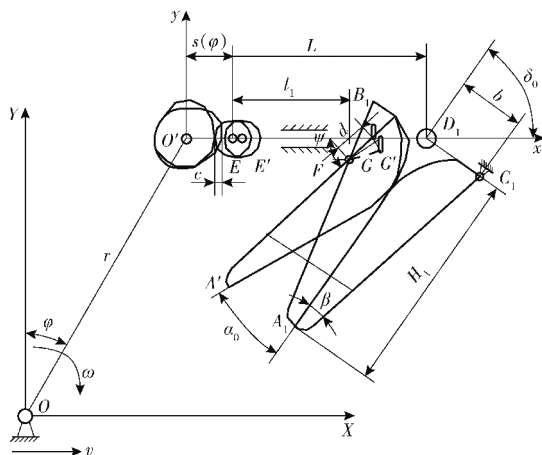


图 6 栽植嘴机构简图

Fig. 6 Schematic of planting mechanism

通过行星轮转动中心的位置坐标可求出栽植臂拐点坐标为

$$x_{D1}(\varphi) = x_3(\varphi) + s_1 \cos(\gamma + \varphi - \varphi_{3h}) \quad (8)$$

$$y_{D1}(\varphi) = y_3(\varphi) + s_1 \sin(\gamma + \varphi - \varphi_{3h}) \quad (9)$$

通过栽植臂拐点可以求出栽植点坐标

$$x_{A1}(\varphi) = x_{D1}(\varphi) + H_1 \cos(\varphi - \varphi_{3h} + \gamma - \theta) \quad (10)$$

$$y_{A1}(\varphi) = y_{D1}(\varphi) + H_1 \sin(\varphi + \gamma - \varphi_{3h} - \theta) \quad (11)$$

其中

$$\gamma = \varphi_0 + \beta_0 + \delta_0$$

式中 s_1 ——支撑板长度, mm

θ ——鸭嘴栽植器相对支撑板转角, rad

δ_0 ——支撑板与行星架转角, rad

当鸭嘴栽植器处于闭合位置时, 各点坐标为

$$\begin{cases} x_{O'C_1}(\varphi) = x_{A1}(\varphi) + H_1 \cos\left(\beta(\varphi) - \arctan \frac{b}{H_1}\right) \\ y_{O'C_1}(\varphi) = y_{A1}(\varphi) + H_1 \sin\left(\beta(\varphi) - \arctan \frac{b}{H_1}\right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{O'B_1}(\varphi) = x_{A1}(\varphi) + H_1 \cos\left(\beta + \arctan \frac{b}{H_1}\right) \\ y_{O'B_1}(\varphi) = y_{A1}(\varphi) + H_1 \sin\left(\beta + \arctan \frac{b}{H_1}\right) \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\beta(\varphi) = \arctan \frac{y_{A1}(\varphi) - x_{A1}(\varphi)}{y_{D1}(\varphi) - x_{D1}(\varphi)}$

式中 H_1 ——鸭嘴栽植器高度, mm

b ——鸭嘴栽植器半径, mm

β ——鸭嘴栽植器斜角, rad

当鸭嘴栽植器张开角 α_0 时, 各点坐标为

$$\begin{cases} x_{O'B'}(\varphi) = x_{O'B_1}(\varphi) + H_1 \cos\left(\beta(\varphi) + \arctan \frac{b}{H_1}\right) \\ y_{O'B'}(\varphi) = y_{O'B_1}(\varphi) + H_1 \sin\left(\beta(\varphi) + \arctan \frac{b}{H_1}\right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_{O'A'}(\varphi) = x_{O'A_1}(\varphi) + H_1 \cos(\gamma + \varphi_{3h} - \theta + \alpha_0) \\ y_{O'A'}(\varphi) = y_{O'A_1}(\varphi) + H_1 \sin(\gamma + \varphi_{3h} - \theta + \alpha_0) \end{cases} \quad (15)$$

由于鸭嘴栽植器开合角度由凸轮控制, 故根据鸭嘴栽植器张开角 α_0 , 可以推出凸轮推程

$$c = d\alpha_0 / \sin(180^\circ - \psi - \alpha_0) \quad (16)$$

式中 c ——凸轮推程, mm

d ——转动中心与推杆间距离, mm

ψ ——转动中心与推杆间转角, rad

根据以上几何关系求解前后鸭嘴栽植点、接苗点的每时刻坐标值并拟合运动轨迹以图形的形式输出, 便于进行栽植机构轨迹及姿态优化。

3 软件开发

根据已经建立的理论模型, 开发栽植机构优化设计软件, 简化设计过程, 便于解决多目标、多参数、强耦合性的问题, 缩短栽植机构设计周期。

3.1 优化目标

根据蔬菜钵苗移栽的农艺要求及栽植机构设计要求, 选取羊角椒栽植株距 400 mm 进行优化设计, 并确立蔬菜栽植机构需要满足的目标要求, 共设立 7 个优化目标: 入土与出土时鸭嘴栽植器相对于地

面摆动角度差在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间; 齿轮箱与地面距离大于 25 mm; 轨迹高度大于 200 mm; 齿轮模数大于 2.5 mm (由齿数及节曲线周长确定, 节曲线周长通过优化软件优化参数获得); 穴口宽在 $0 \sim 30$ mm 之间; 穴口直立度 (穴口中点与栽植最低点偏移量) 小于等于 15 mm; 栽植臂不干涉^[14-19]。

3.2 优化软件及参数确定

本软件通过调节优化设计变量 (齿轮节曲线参数及鸭嘴栽植器结构参数), 达到设定的目标, 实现对栽植机构的结构尺寸、运动状态、轨迹的模拟, 进而实现栽植机构的优化^[20]。通过数学模型将图形可视化, 使栽植机构更直观且易于操作, 优化设计软件界面如图 7 所示。

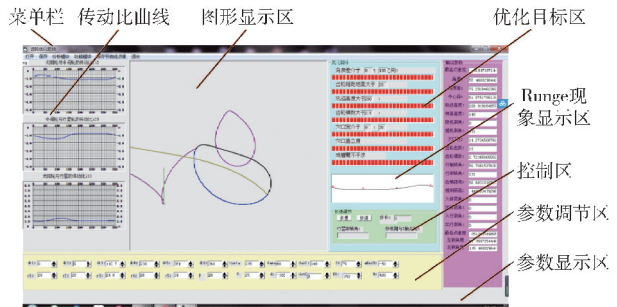


图 7 栽植机构优化设计软件界面

Fig. 7 Software interface for optimal design of seedling mechanism

应用栽植机构计算机优化软件得到一组较优的满足蔬菜栽植农艺要求的参数, 齿轮节曲线参数包括 (r_i 为齿轮节曲线的向径, θ_i 为齿轮节曲线的极角): $r_1 = 29$ mm, $r_2 = 28$ mm, $r_3 = 24.8$ mm, $r_4 = 26$ mm, $r_5 = 31$ mm, $\theta_1 = 0^{\circ}$, $\theta_2 = 5^{\circ}$, $\theta_3 = 110.7^{\circ}$, $\theta_4 = 230^{\circ}$, $\theta_5 = 351^{\circ}$, $\theta_6 = 360^{\circ}$; 结构参数包括: 鸭嘴栽植器相对支撑板转角 $\theta = 235^{\circ}$, 太阳轮初始安装角 $\alpha = 25^{\circ}$, 机构及轨迹相对于坐标原点转角 $\varphi_0 = 149^{\circ}$, 支撑板相对行星架转角 $\delta_0 = 6^{\circ}$, 支撑板长度 $s_1 = 75$ mm, 行星架拐角 $\beta_0 = -50^{\circ}$, 鸭嘴栽植器高度 $H_1 = 150$ mm。机构优化的目标值: 入土与出土时鸭嘴栽植器相对于地面摆动角度差 $M_1 = 18^{\circ}$, 齿轮箱与地面距离 $M_2 = 27$ mm, 轨迹高度 $M_3 = 229$ mm, 齿轮模数 $M_4 = 2.7$ mm, 穴口宽 $M_5 = 14$ mm, 穴口直立度 $M_6 = 12$ mm, 栽植臂最小距离 $M_7 = 45$ mm, 皆满足优化目标要求。

4 三维模型建立与试验验证

根据栽植机构计算机优化软件所得的参数对栽植机构进行结构设计以及三维模型建立, 包括非圆齿轮行星轮系以及鸭嘴式栽植机构, 并按照初始安装位置完成栽植机构的整体装配。高速变姿态接苗

鸭嘴式栽植机构三维模型如图 8 所示, 对鸭嘴栽植器相关参数根据蔬菜秧苗物理特性进行设计。

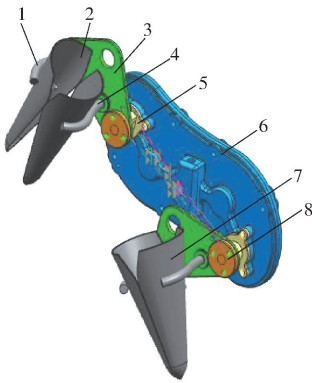


图 8 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构三维模型

Fig. 8 Three-dimensional model of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude

1. 前鸭嘴支撑架 2. 前鸭嘴 3. 支撑板 4. 后鸭嘴支撑架
5. 凸轮 6. 齿轮箱 7. 后鸭嘴 8. 行星轴

4.1 基于 ADAMS 的仿真分析

将装配好的模型导入 ADAMS 软件中进行虚拟样机的运动仿真, 边界条件设置: 转速 40 r/min、前进速度 0.53 m/s、重力加速度 9.8 m/s^2 , 可得栽植机构的相对、绝对运动轨迹 (图 9) 与理论轨迹 (图 10) 基本一致。

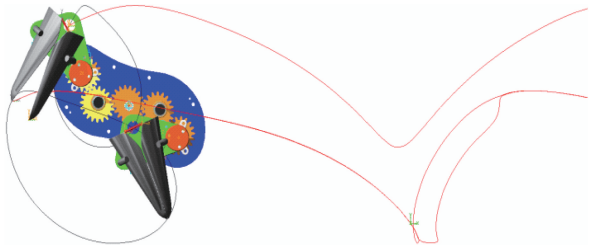


图 9 虚拟仿真轨迹

Fig. 9 Virtual simulation track

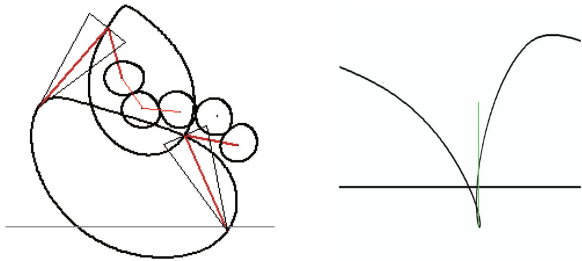


图 10 优化软件理论轨迹

Fig. 10 Theoretical trajectory of optimization software

4.1.1 鸭嘴栽植器摆角

支撑板初始位置相对于 Y 轴正方向转角为 6° , 鸭嘴栽植器相对于 Y 轴正方向摆动角度变化如图 11 所示。支撑板转角为 $19^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时鸭嘴栽植器摆角在 $11^{\circ} \sim -10^{\circ}$ 之间变化, 为鸭嘴栽植器入土栽植阶段。当支撑板转角为 28° 时鸭嘴栽植器运动到最低点位置 (A 点) 且鸭嘴栽植器摆角为 0° , 为最佳

栽植点,保证栽植的起始直立度。当支撑板转角为 $52^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 时鸭嘴栽植器摆角在 $-20^{\circ} \sim 17^{\circ}$ 之间变化,为接苗阶段。当支撑板转角为 28° 时(B 点)为最佳接苗点,此时鸭嘴栽植器摆角为 0° ,满足设计要求。

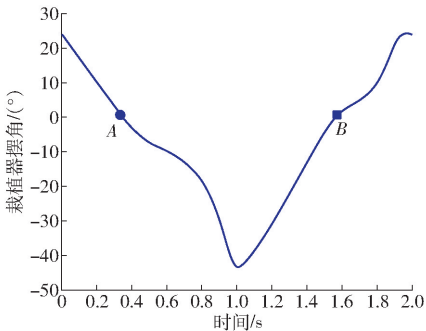


图 11 鸭嘴栽植器摆角变化曲线

Fig. 11 Variation curve of angle for duckbill planter

4.1.2 速度曲线

在移栽效率为 80 株/min 时,仿真后接苗点水平方向速度如图 12 所示。栽植点水平方向速度如图 13 所示。

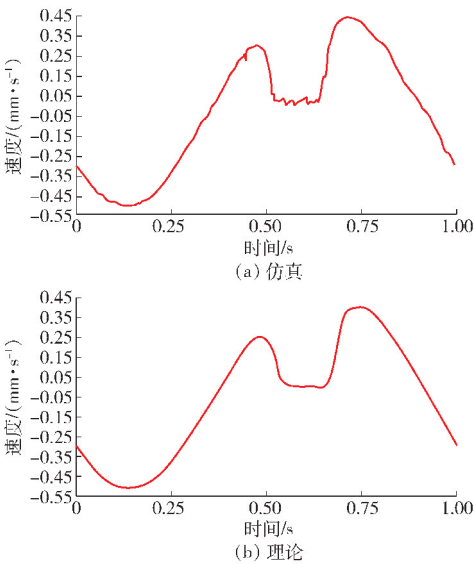


图 12 接苗点水平方向速度曲线

Fig. 12 Horizontal direction velocity curves of jointing point

由图 12、13 可知,栽植机构在 ADAMS 仿真中得到的速度曲线与计算机仿真优化软件中得到的曲线趋势相同。鸭嘴栽植器在接苗的一段时间内水平速度趋近于零,便于接苗平稳准确,不损伤钵钵。在鸭嘴栽植器入土阶段,栽植点的水平速度也接近于零,有利于实现零速栽植,从而保证秧苗的直立度,满足设计要求。

4.2 高速摄影试验验证

为缩短研发周期,采用 3D 打印技术制造物理样机。将装配好的样机安装在试验台上进行高速摄影试验,测量鸭嘴栽植器栽植 endpoint 及上端中心点形

成的实际轨迹。对高速摄影得到的实际轨迹与计算机优化软件中得到的优化轨迹进行比对,如图 14 所示,理论轨迹与实际轨迹基本一致。

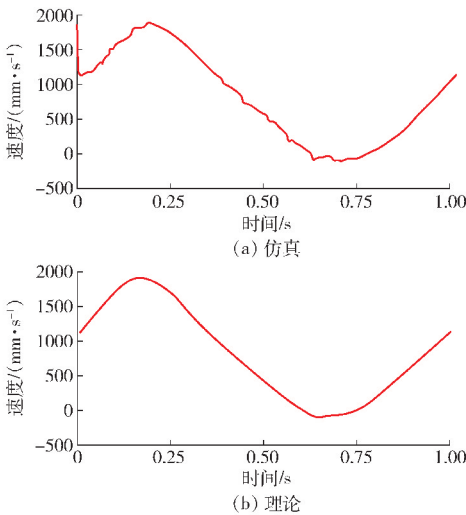


图 13 栽植点水平方向速度曲线

Fig. 13 Horizontal velocity curves of planting point

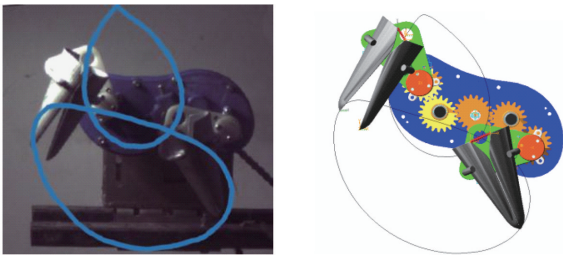


图 14 高速摄影与优化轨迹对比

Fig. 14 Comparison of high-speed photography and optimized trajectory

4.3 物理样机接苗与栽植试验

为进一步验证高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构的性能,对栽植机构进行接苗与栽植试验,试验选取的羊角椒钵苗如图 15 所示,当钵苗 6 片子叶、钵苗苗龄为 45 d 时进行试验,试验选用特定软质秧盘进行育苗,穴数为 72 穴,上穴口尺寸为 40 mm × 40 mm,下穴口尺寸为 20 mm × 20 mm,穴口深度为 45 mm^[21]。随机选取 50 株钵苗进行物理特性统计分析,钵体高度最大值为 44.8 mm,钵苗高度最大值为 137.2 mm,叶冠直径最大值为 88.2 mm,钵体上



图 15 羊角椒秧苗

Fig. 15 Sheep horn pepper seedling

端尺寸最大值为 39.3 mm,钵体下端尺寸最大值为 18.8 mm。

试验采用课题组研制的多功能钵苗移栽试验台^[8,22-23],栽植试验如图 16 所示,安装物理样机,设置试验台工作转速为 30 r/min,并以 0.4 m/s 的速度移动土槽。取 144 株钵苗进行试验,处理数据时去除前后 5 株钵苗取 134 株为一组进行试验,并重复 3 次,栽植效果如图 17 所示。

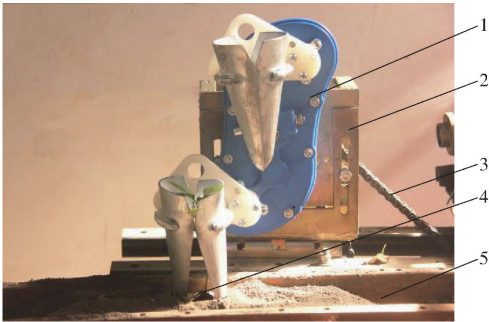


图 16 接苗-栽植试验现场

Fig. 16 Seedling - planting test diagram

1.栽植机构 2.试验台架 3.传动部件 4.秧苗 5.土槽



图 17 接苗-栽植试验效果

Fig. 17 Seedling - planting test effect diagram

栽植性能验证标准如下:秧苗茎秆与地面的夹角 $\alpha_1 \leq 45^\circ$ 为倒伏, $45^\circ < \alpha_1 < 70^\circ$ 为合格, $\alpha_1 \geq 70^\circ$ 为优良,栽植深度 h 满足 $32 \text{ mm} \leq h \leq 60 \text{ mm}$ 为合格^[24-25]。

对所得数据进行整理得到试验结果如表 1 所示,参考旱地栽植机械行业标准 JB/T 10291—2013 要求,栽植效果需达到伤苗率小于等于 5%,栽植合格率大于等于 90%,栽植深度合格率大于等于 75%^[19,25]。在试验台上进行的试验结果如表 1 所示:平均栽植合格率为 99.8%,平均栽植深度合格率为 99.2%,结果证明机构能够较好地满足栽植要求。

表 1 栽植性能验证试验结果

Tab.1 Test results for verification of seedling performance

序号	总株数/株	倒伏株数/株	合格株数/株	优良株数/株	优良率/%	栽植合格率/%	深度合格率/%
1	134	0	18	116	86.6	100	99.3
2	134	0	23	111	82.8	100	99.5
3	134	1	19	114	85.1	99.3	98.9
均值	134	0.3	19.3	113.7	84.8	99.8	99.2

5 结论

(1)根据蔬菜钵苗在移栽农艺上对轨迹、姿态、接苗与栽植的要求,建立了目标函数,优化获得“水滴”形接苗点的相对运动轨迹,通过鸭嘴栽植器在接苗点的停留和摆动延长接苗时间。

(2)提出了一种高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构,建立了栽植机构的数学模型,根据数学模型开发了计算机优化软件,优化得出满足工作要求的设计参数。

(3)通过分析比较理论轨迹、ADAMS 仿真轨迹和高速摄影轨迹,验证了栽植机构的理论模型与结构设计正确性与可行性。通过仿真分析得到接苗点以及栽植点的速度曲线,验证了接苗与栽植时的速度满足设计要求。

(4)台架试验结果表明,栽植机构的平均栽植合格率为 99.8%,平均栽植深度合格率为 99.2%,满足直立度与移栽要求,验证了该栽植机构的实用性。

参 考 文 献

[1] 王立浩,方智远,杜永臣,等.我国蔬菜种业发展战略研究[J].中国工程科学,2016,18(1):123-136.
WANG Lihao, FANG Zhiyuan, DU Yongchen, et al. Study on development strategy of vegetable seed industry in China [J]. Chinese Engineering Science, 2016,18(1):123-136. (in Chinese)

[2] XIN J,KAIXUAN Z,JIANGTAO J,et al. Design and experiment of automatic transplanting device for potted tomato seedlings [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019,233(3): 1045-1054.

[3] 肖名涛,孙松林,罗海峰,等.双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J].农业工程学报,2014,30(17):25-33.
XIAO Mingtao,SUN Songlin,LUO Haifeng,et al. Kinematic analysis and experiment of dual parallelogram multi-pole planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(17):25-33. (in Chinese)

[4] JIN S J,FRANK G O,JA E M J,et al. A study on improving the performance of the planting device of a vegetable transplanter [J]. Journal of Biosystems Engineering,2018,43(3):202-210.

[5] ASHUTOSH P, ADARSH K, INDRA M, et al. Development and evaluation of semi-automatic six row onion seedlings transplanter[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America,2019,50:29-35.

- [6] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等.移栽机械发展现状与展望[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):44-53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Development status and prospect of transplanting machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [7] 姬江涛,杨林辉,金鑫,等.行星轮系滑道式钵苗栽植机构设计与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(18):83-92.
JI Jiangtao, YANG Linhui, JIN Xin, et al. Design and parameter optimization of planetary gear-train slip type pot seedling planting mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 83-92. (in Chinese)
- [8] 胡建平,潘杰,张晨迪,等.行星轮栽植机构优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):78-86.
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimal design and experiment on planetary gear planting mechanism of self-propelled transplanting machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.009. (in Chinese)
- [9] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.006. (in Chinese)
- [10] 王英,夏旭东,何小晶,等.偏心-椭圆齿轮行星轮系栽植装置动力学优化与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(1):38-46.
WANG Ying, XIA Xudong, HE Xiaojing, et al. Dynamics optimization and experiment of planting device driven by planetary eccentric gears and elliptic gears [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 38-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.006. (in Chinese)
- [11] 陈建能,王英,黄前泽,等.钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(10):62-67.
CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 62-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.009. (in Chinese)
- [12] 陈建能,夏旭东,王英,等.钵苗在鸭嘴式栽植机构中的运动微分方程及应用试验[J].农业工程学报,2015,31(3):31-39.
CHEN Jianneng, XIA Xudong, WANG Ying, et al. Motion differential equations of seedling in duckbilled planting nozzle and its application experiment [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 31-39. (in Chinese)
- [13] YU G H, TONG Z, SUN L, et al. Novel gear transmission mechanism with twice unequal amplitude transmission ratio [J]. ASME. J. Mech. Des., 2019, 141(9): 092304-092304-9.
- [14] 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [15] 王静远.玉米行星轮系钵苗移栽机设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
WANG Jingyuan. The design and research on multi-function maize planetary gear train transplanting machine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [16] DIXIT J, KUMAR V, ALI M. Development and evaluation of a single row manual vegetable transplanter [J]. Agricultural Engineering, 2018, 42(2): 58-66.
- [17] 楚宜民,燕亚民.2YZS烟草移栽机移栽装置的设计[J].农机化研究,2014,36(2):135-138.
CHU Y M, YAN Y M. Design of 2YZS tobacco transplanter transplanting device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 135-138. (in Chinese)
- [18] ROMUH A, ABOUZAID S, ELASHRY E, et al. Design and development of a transplanting unit for onion seedlings [D]. Alexandria University, 2019.
- [19] 代丽,孙良,赵雄,等.基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J].农业工程学报,2014,30(3):35-42.
DAI Li, SUN Liang, ZHAO Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematic objective function [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 35-42. (in Chinese)
- [20] 钱孟波,俞高红,俞益波,等.基于VB和ADAMS的水稻钵苗栽植机构参数优化及试验分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2015,36(5):539-544.
QIAN Mengbo, YU Gaohong, YU Yibo, et al. Parameter optimization and test analysis of rice planting mechanism based on VB and ADAMS [J]. Journal of Jiangsu University (Nature Science Edition), 2015, 36(5): 539-544. (in Chinese)
- [21] 杨中周.我国辣椒品种选育进展与展望[J].中国瓜菜,2017,30(5):1-6.
- [22] 金鑫,李树君,杨学军,等.膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(增刊):29-34.
JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization for pot seedling planting mechanism based on up-film transplanting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 29-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s06&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.006. (in Chinese)
- [23] 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. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 19-25. (in Chinese)
- [24] 封俊,顾世康,曾爱军,等.导苗管式栽植机的试验研究(II)栽植机的性能评价指标与检测方法[J].农业工程学报,1998,14(2):79-83.
FENG Jun, GU Shikang, ZENG Aijun, et al. Study on transplanter with chute and seedling aid springs (Part II) judging-targets system for transplanters [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 79-83. (in Chinese)
- [25] JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S].2013.