

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.011

# 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验

赵 匀 张卫星 辛 亮 解江涛 薛向磊 单伊尹

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为了避免移栽机构在夹取秧苗过程中对秧苗茎秆造成损伤, 针对夹取土钵的取苗方式, 提出了一种探入式番茄钵苗移栽机构。依据结构特性和工作原理, 建立了机构运动学理论模型, 根据设定的优化目标开发了移栽机构优化设计软件, 通过优化得到一组符合番茄钵苗移栽要求的结构参数。对栽植臂绝对转角和移栽机构绝对运动轨迹进行分析, 验证了机构的合理性和可行性。建立了探入式番茄钵苗移栽机构的三维模型并虚拟仿真, 对物理样机进行了高速摄影试验验证, 通过对移栽机构实际工作轨迹与理论及仿真轨迹进行对比分析, 验证了机构设计的正确性。对机构进行性能台架试验, 取苗成功率为 92.8%, 移栽成功率为 89.7%, 栽植合格率为 86.4%, 栽植优良率为 59.4%, 符合移栽要求, 验证了机构的实用性。

**关键词:** 番茄钵苗; 移栽机构; 探入式; 优化设计; 台架试验

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0105-08

## Design and Experiment of Extensible Potted Tomatoes Seedling Transplanting Mechanism

ZHAO Yun ZHANG Weixing XIN Liang XIE Jiangtao XUE Xianglei SHAN Yiyin

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

**Abstract:** To effectively reduce the damage to seedling stem caused by transplanting mechanism in the process of picking seedling, for the seedling pick-up device penetrating into the root mass, an innovative extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism was proposed. Kinematic theory model was established according to its characteristic and working principle, computer-aided analysis and optimization software was developed and used to obtain a set of structure parameters that satisfied the potted tomatoes seedling transplanting requirements. Absolute angle of the transplanting-arm and absolute trajectory was analyzed, and the rationality and feasibility of the structural parameters were verified. The three-dimensional modeling of the transplanting mechanism was established, which was used for the simulation testing, a physical prototype of the transplanting mechanism was subjected to the test bench on which the high-speed photography experiments were conducted, the results of working trajectory, theoretical trajectory and the virtual trajectory were essentially identical, verifying the validity and feasibility of the design. The performance test showed that the seedling picking was satisfactory as 92.8%, the transplanting success rate was 89.7%, the acceptability of planting was 86.4% and the planting excellent rate was 59.4%, the quality of transplanting was satisfactory. The transplanting mechanism can meet the technical requirements of tomato pot seedlings transplanting, which would provide references for the design and development of the tomato transplanting mechanism.

**Key words:** potted tomatoes seedling; transplanting mechanism; extension-type; optimization design; bench test

## 0 引言

现有旱田作物钵苗移栽机通过夹取秧苗方式移

栽, 主要分为夹取茎秆式和夹取土钵式<sup>[1-4]</sup>。前者通过末端执行器夹取钵苗的茎秆将钵苗从穴盘拔出, 后者则是通过夹取土钵将钵苗从穴盘中取出。

收稿日期: 2018-11-08 修回日期: 2018-11-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775104)和黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA16B302)

作者简介: 赵匀(1943—2017), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计与应用研究

通信作者: 辛亮(1989—), 男, 讲师, 博士后, 主要从事移栽机械机构创新优化设计研究, E-mail: xinliang@neau.edu.cn

番茄在我国既是经济作物又是大田作物,其茎秆脆嫩,在机械化移栽番茄苗时,通过末端执行器的挤压力夹取秧苗,会对茎秆造成严重的损伤,不仅会影响秧苗后期长势,严重时还会夹断茎秆;而通过夹取土钵的方式可以避免对秧苗和根的损伤,因此,对于机械化移栽番茄及类似秧苗,应利用夹钵式钵苗移栽机构。

近年来,国内外学者对夹钵式移栽机构开展了一系列研究<sup>[5-6]</sup>。CHOI等<sup>[7]</sup>提出了一种曲柄滑道式移栽机构,通过推杆驱动取苗针闭合与张开,完成取苗、投苗动作,取苗成功率高达97%,但易伤根,移栽效率仅为30~40株/(min·行);澳大利亚Transplant system公司开发的HD系列全自动移栽机采用气缸驱动末端执行器扎入土钵完成取苗,移栽效率高,但结构复杂、成本高<sup>[8]</sup>;王蒙蒙等<sup>[9]</sup>提出了一种曲柄摆杆式夹苗机构,该机构对土钵造成的损伤减轻且取苗成功率较高,但通过两套机构完成取苗动作,结构复杂,效率较低;蒋卓华等<sup>[10]</sup>研制的穴盘苗自动移栽机末端执行器,取苗过程对土钵的损伤程度较小,但该机构不适用于大田作业,更适用于室内工厂化移栽。因此,目前还没有适合我国大面积推广应用的轻筒型高效番茄钵苗移栽机构。

针对夹钵式移栽机构的发展现状及面临问题,本文提出一种探入式番茄钵苗移栽机构。该机构末端执行器中的秧针在取苗和植苗过程均沿着钵盘内壁的方向运动,通过探入和脱离钵体完成夹钵和投苗动作,可以避免对土钵和根系的损坏;同时采用非圆齿轮行星系机构,仅用一套回转机构完成番茄移栽过程,将末端执行器与回转机构相结合对该机构进行优化设计,以简化优化难度,得到满足番茄钵苗移栽要求的运动轨迹和姿态。

### 1 设计要求及工作原理

#### 1.1 设计要求

根据番茄移栽的农艺要求,课题组曾提出系列模拟人工移栽姿态的夹钵式“鹰嘴形”移栽轨迹<sup>[11]</sup>,该轨迹完全通过非圆齿轮行星系及固定在栽植臂上的取秧夹实现。在取苗阶段的轨迹是一段近似直线的曲线段且与秧苗放置方向近似平行,以确保秧针能将秧苗从穴盘中顺利地取出,但优化较难且极易造成齿轮节曲线有明显的内凹和外凸,如图1a,难以形成符合要求的齿廓;并且还会出现第一段栽植臂长度与齿轮中心距比值过大的优化结果,这种结构极易产生巨大的振动和惯性力,如图1b。为了避免以上问题,本文提出了一种探入式番茄钵苗移栽机构,将难以优化形成的取秧段“鹰嘴”轨迹用探入

式取秧夹实现,形成如图1c所示轨迹,相比而言该行星系中齿轮节曲线更为圆滑,也没有出现第一段栽植臂的长度与齿轮中心距的比值过大的问题。

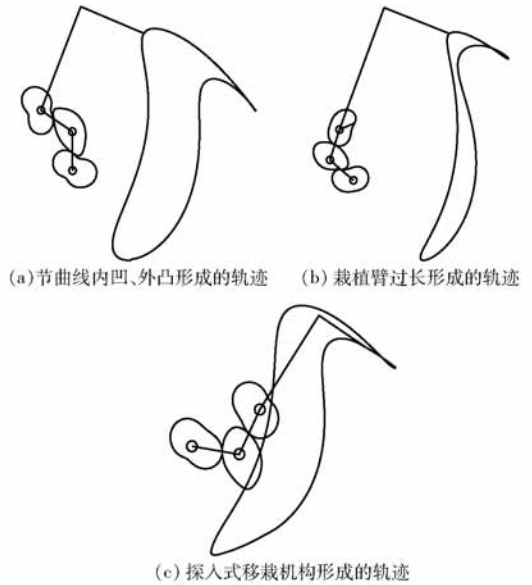


图1 番茄钵苗移栽轨迹

Fig. 1 Trajectories of potted tomatoes seedling transplanting mechanism

#### 1.2 工作原理

探入式番茄钵苗移栽机构总体包括传动机构和末端执行器两部分,如图2所示。传动部分由3个相互啮合的非圆齿轮组成;末端执行器部分由双面齿条、2个圆齿轮、2个单面齿条、凸轮、拨叉组成。动力由太阳轴输入,驱动齿轮箱匀速转动,使其内部非圆齿轮相互啮合转动,带动栽植臂做不等速运动。固接于齿轮箱的凸轮与铰接于栽植臂的拨叉相互作用,使拨叉绕着拨叉轴做往复的摆动,拨叉的另一侧与双面齿条用高副连接,使得双面齿条在栽植臂内做往复直线运动。在双面齿条的两侧对称地分布两

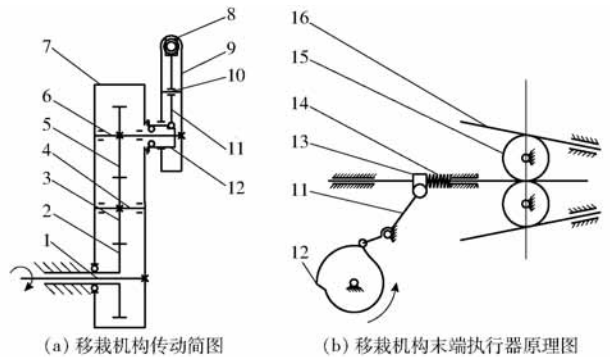


图2 探入式钵苗移栽机构简图

Fig. 2 Schematics of extensible potted seedling transplanting mechanism

- 1. 太阳轴 2. 太阳轮 3. 中间轮 4. 中间轴 5. 行星轮 6. 行星轴 7. 齿轮箱 8. 后盖 9. 栽植臂壳体 10. 拨叉轴 11. 拨叉 12. 凸轮 13. 双面齿条 14. 弹簧 15. 圆齿轮 16. 单面齿条

个圆柱齿轮与其啮合,使圆柱齿轮转动,在每个圆柱齿轮的外侧各布置一个单面齿条与其啮合,单面齿条带动秧针一起做直线运动实现取秧和推秧。

栽植臂壳体内部的两单面齿条呈锥形配置,其夹角与秧盘穴口锥角一致。在取苗过程,两秧针沿着秧盘内壁插入到钵穴内,随即凸轮锁紧,拨叉不再摆动,秧针相对于栽植臂的直线运动停止,移栽机构通过两秧针的锥度夹紧配合沿着轨迹的“鹰嘴”段将钵苗从秧盘中取出,完成取苗动作;钵苗随轨迹输送秧苗,在栽植过程时,秧针由凸轮、拨叉控制,沿固定锥度回收,将钵苗推出完成栽植动作。齿轮箱的匀速圆周运动、非圆齿轮行星轮系的不等速运动、栽植臂壳体中的直线运动,合成形成了如图 1c 所示的移栽轨迹。该移栽机构利用探出的秧针快速地在取苗阶段形成类似直线的轨迹,解决了以往非探入式移栽机构在取苗阶段栽植臂绝对转角过大的问题,保证在取苗阶段秧针不搅动土钵,避免秧针对土钵和根系的伤害。

## 2 理论模型的建立

### 2.1 行星轮系理论模型

以经过变换的封闭帕斯卡蜗线为非圆齿轮的节曲线<sup>[12-13]</sup>,其中  $r(\varphi)$  为节曲线的向径,  $\varphi$  为节曲线向径的极角。

如图 3 所示,以行星架的转动中心  $O_1$  为坐标原点,水平方向为  $X$  轴,竖直方向为  $Y$  轴建立坐标系。

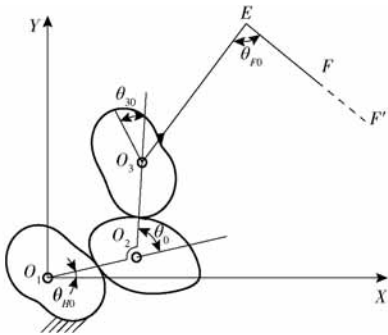


图 3 非圆齿轮行星轮系机构简图

Fig. 3 Schematic of non-circular gear train

令  $\theta_{H0}$  为行星架初始安装角,角速度为  $\omega$ ,本文以逆时针转动为正,顺时针转动为负。则行星架转角为

$$\theta = \omega t \quad (1)$$

行星架的绝对转角为

$$\theta_H(\theta) = \theta_{H0} + \theta \quad (2)$$

太阳轮相对行星架的转角为

$$\theta_1'(\theta) = -\theta \quad (3)$$

太阳轮绝对转角为

$$\theta_1(\theta) = \theta_H \quad (4)$$

太阳轮节曲线极径为  $r_1(\varphi)$ ,若相互啮合的两齿轮中心距为  $a$ ,根据齿轮啮合基本原理<sup>[14]</sup>,中间轮的节曲线极径为  $r_2(\varphi) = a - r_1(\varphi)$ ,行星轮的节曲线极径为  $r_3(\varphi) = a - r_2(\varphi)$ 。则中间轮相对于行星架转角为

$$\theta_2'(\theta) = \int_0^\theta \frac{r_1(\varphi)}{r_2(\varphi)} d\varphi \quad (5)$$

中间轮绝对转角为

$$\theta_2(\theta) = \theta_H(\theta) + \theta_2'(\theta) \quad (6)$$

建模时为了增加机构的可调性,便于优化出图 1c 所示的轨迹,引进行星架拐角  $\theta_0$ 。

行星轮相对于行星架转角为

$$\theta_3'(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \theta} \frac{r_2(\varphi)}{r_3(\varphi)} d\varphi \quad (7)$$

由于行星架拐角的引入,导致行星轮初始安装角为

$$\theta_{30} = \int_0^{\theta_0} \frac{r_2(\varphi)}{r_3(\varphi)} d\varphi \quad (8)$$

行星轮的绝对转角为

$$\theta_3(\theta) = \theta_H(\theta) + \theta_0 + \theta_{30} - \theta_3'(\theta) \quad (9)$$

行星架转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_1} = 0 \\ y_{O_1} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

中间轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_2}(\theta) = a \cos(\theta_{H0} + \theta) \\ y_{O_2}(\theta) = a \sin(\theta_{H0} + \theta) \end{cases} \quad (11)$$

行星轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_3}(\theta) = x_{O_2}(\theta) + a \cos(\theta_{H0} + \theta + \theta_0) \\ y_{O_3}(\theta) = y_{O_2}(\theta) + a \sin(\theta_{H0} + \theta + \theta_0) \end{cases} \quad (12)$$

$L_1$ 、 $L_2$  分别表示第 1 段栽植臂  $O_3E$  和第 2 段栽植臂  $EF$  的长度,  $\theta_{E0}$  为栽植臂初始安装角,  $\theta_{F0}$  为第 2 段栽植臂与第 1 段栽植臂的拐角,则  $E$ 、 $F$  坐标为

$$\begin{cases} x_E(\theta) = x_{O_3}(\theta) + L_1 \cos(\theta_{H0} + \theta + \theta_{E0} + \theta_3'(\theta)) \\ y_E(\theta) = y_{O_3}(\theta) + L_1 \sin(\theta_{H0} + \theta + \theta_{E0} + \theta_3'(\theta)) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_F(\theta) = x_E(\theta) + L_2 \cos(\theta_{H0} + \theta + \theta_{E0} + \theta_3'(\theta) - \theta_{F0}) \\ y_F(\theta) = y_E(\theta) + L_2 \sin(\theta_{H0} + \theta + \theta_{E0} + \theta_3'(\theta) - \theta_{F0}) \end{cases} \quad (14)$$

### 2.2 末端执行器理论模型

以凸轮转动中心  $O_3$  为坐标原点,水平方向为  $X$  轴,竖直方向为  $Y$  轴建立坐标系,如图 4 所示。由栽植臂尖点运动学规律可以求出栽植臂上任一点的运动规律<sup>[15]</sup>。设  $F'$  的初始坐标为  $(x_{F_0}, y_{F_0})$ ,  $H$  的初始坐标为  $(x_{H_0}, y_{H_0})$ 。由于末端执行器上下对称,所以

只对上半部分进行分析。

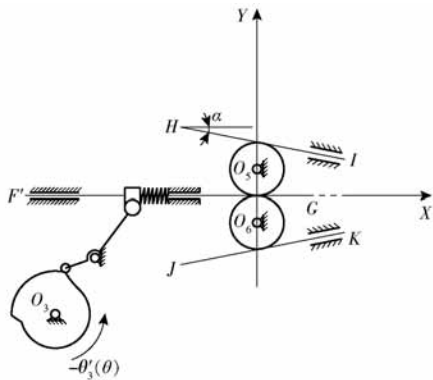


图4 移栽机构末端执行器结构简图

Fig.4 End-effector structure schematic of transplanting mechanism

采用反转法对末端执行器进行运动学建模<sup>[14]</sup>。即在整個末端执行器上加一个公共转角  $-\theta'_3(\theta)$ ，此时，栽植臂壳体相对机架的角度为  $\theta'_3(\theta) - \theta'_3(\theta) = 0$ ，凸轮相对于机架角度为  $0 - \theta'_3(\theta) = -\theta'_3(\theta)$ 。根据凸轮运动规律可推出  $F'$  点运动规律，设  $F'$  坐标的变化规律为  $\Delta H(\theta)$ 。则  $F'$  相对栽植臂的位移为

$$\begin{cases} x_{F'}(\theta) = x_{F'_0} + \Delta H(\theta) \\ y_{F'}(\theta) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

在图4中双面齿条的长度为  $L_3$ ，圆柱齿轮的半径为  $r$ ，单面齿条的长度为  $L_4$ ，单面齿条安装角（与  $X$  轴正向夹角）为  $\alpha$ ，则  $G$  相对栽植臂的位移为

$$\begin{cases} x_G(\theta) = x_{F'}(\theta) + L_3 \\ y_G(\theta) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

圆柱齿轮相对栽植臂转角为

$$\beta(\theta) = \frac{\Delta H(\theta)}{r} \quad (17)$$

$H$  点相对栽植臂的位移为

$$\begin{cases} x_H(\theta) = x_{H_0} - \Delta H(\theta) \cos \alpha \\ y_H(\theta) = y_{H_0} + \Delta H(\theta) \sin \alpha \end{cases} \quad (18)$$

$I$  点相对栽植臂的位移为

$$\begin{cases} x_I(\theta) = x_H(\theta) + L_4 \cos \alpha \\ y_I(\theta) = y_H(\theta) - L_4 \sin \alpha \end{cases} \quad (19)$$

### 3 参数优化仿真与栽植臂绝对转角分析

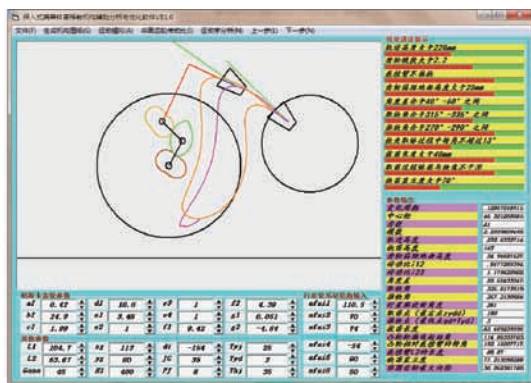
#### 3.1 优化目标的确立

根据番茄钵苗移栽的农艺要求，结合机构特性，共设立 17 个优化目标<sup>[16-19]</sup>：轨迹高度大于 220 mm；齿轮模数大于 2.2 mm；栽植过程中栽植臂不推倒秧苗；齿轮箱最低点距地面高度大于 25 mm；取秧角介于  $315^\circ \sim 335^\circ$  之间；推秧角介于  $270^\circ \sim 290^\circ$  之间；角度差介于  $40^\circ \sim 60^\circ$  之间；秧针从钵盘取苗过程中转角不超过  $13^\circ$ ；拔苗长度大于 40 mm；取

苗过程钵苗与秧盘不干涉；秧苗直立度大于  $75^\circ$ ；初始位置两秧针尖点距离为 36 ~ 39 mm；取苗秧针倾角在  $13^\circ \sim 15^\circ$  之间；最低点时两秧针尖点距离为 16.5 ~ 19 mm；初始位置双面齿条与土钵不干涉；秧针入钵深度大于 30 mm；末端执行器秧针探出时总长度不超过 120 mm。

#### 3.2 优化设计软件开发

根据所建立的理論模型，基于 Visual Basic 6.0 开发了移栽机构的辅助优化设计软件，该软件可在优化过程中实现人机交互且操作简单，可大幅度减少优化的时间。优化设计软件的界面如图 5 所示。



(a) 移栽机构优化软件主界面



(b) 末端执行器优化软件界面

图5 移栽机构优化软件界面

Fig.5 Interface of optimization software for transplanting mechanism

运用上述移栽机构优化设计软件，通过人机交互的方式进行参数优化<sup>[20]</sup>，得到一组满足番茄钵苗移栽农艺要求的结构参数。

#### 3.3 栽植臂绝对转角分析

秧针从开始探入钵盘到土钵完全离开钵盘这一过程中，秧针会随栽植臂摆动，从而造成秧针在钵盘中对土钵进行搅动，对土钵产生一定程度的损坏，并且摆角越大，损坏程度越高。因此，取苗过程中控制栽植臂转角对于保证钵苗的移栽质量极为重要。

本文所优化栽植臂的绝对转角变化曲线如图 6 所示。通过优化设计软件可知，秧针开始进入土钵时行星架转角为  $185^\circ$ ，土钵完全离开钵盘时行星架

转角为  $215^\circ$ , 分析图 6 可以看出, 在取苗过程中栽植臂绝对转角只是在小范围内波动, 曲线段近似一段直线, 符合取苗过程中秧针不搅动土钵的要求。行星架相对转角在  $340^\circ \sim 20^\circ$  (下一周期) 时为投苗阶段, 此阶段栽植臂转角曲线也近似直线段, 波动极小, 可以有效避免在栽植过程中秧苗倾倒, 符合栽植的农艺要求。行星架相对转角在  $215^\circ \sim 340^\circ$  范围时为输送阶段, 在这一阶段栽植臂绝对转角曲线波动较大, 但此过程中秧苗完全脱离了钵盘且秧针与钵苗之间无相对运动, 不会对土钵造成损坏。行星架相对转角在  $20^\circ \sim 185^\circ$  范围内为栽植结束到开始取苗阶段, 此阶段秧针与土钵没有任何接触, 栽植臂绝对转角波动变化不会对土钵产生损坏。在整个移栽周期内栽植臂绝对转角变化曲线较为光滑, 说明非圆齿轮在传动的过程中振动较小, 运转平稳, 齿轮啮合良好。

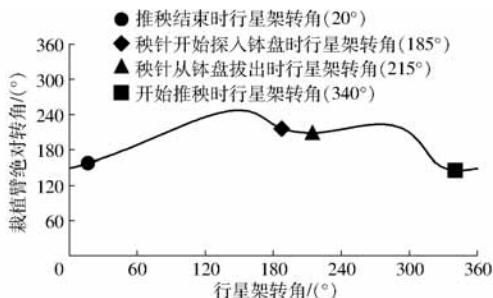


图 6 栽植臂绝对转角变化曲线

Fig. 6 Changing curve of absolute angle of transplanting-arm

### 3.4 移栽机构的绝对轨迹分析

移栽过程中, 栽植动作对秧苗的栽植质量起关键的作用, 而栽植动作的好坏一般通过移栽机构的绝对轨迹体现出来。非探入式移栽机构的绝对轨迹一般为底部是“环扣”状曲线, 绝对运动轨迹往往会在栽植臂完成栽植后, 推倒前一次已经栽植好的秧苗, 严重影响栽植的质量。

图 7 所示为优化设计软件所输出的移栽机构的绝对运动轨迹, 该绝对轨迹的下部为栽植阶段的轨迹, 是在非圆齿轮行星轮系的不等速运动、秧针的直线运动和机器的运动复合形成的栽植阶段“V”字形轨迹, 前一周期的栽植阶段轨迹与下一周期的取秧

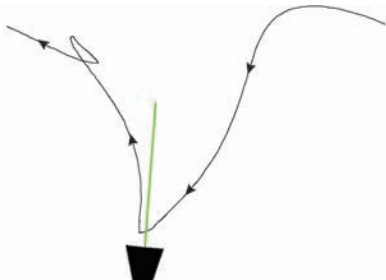


图 7 移栽机构的绝对运动轨迹

Fig. 7 Absolute trajectory of transplanting mechanism

轨迹无交点, 此轨迹可以保证将钵苗栽植后至下一次移栽周期开始前, 不推倒前一周期已栽植好的钵苗, 符合该移栽机构的设计要求。

## 4 试验验证

### 4.1 移栽机构仿真验证

根据优化设计软件所优化得到的机构最优结构参数, 对移栽机构在 NX 8.0 中进行三维结构设计并完成装配。然后将装配好的三维模型导入 ADAMS 2014 中进行虚拟仿真, 所得的相对运动轨迹与优化的理论轨迹基本一致, 初步验证了机构原理的正确性和结构的合理性, 虚拟仿真轨迹如图 8 所示。



图 8 虚拟仿真轨迹

Fig. 8 Trajectory of virtual simulation

### 4.2 高速摄影验证试验

通过虚拟仿真验证机构结构合理后, 对机构进行物理样机加工, 为了提高研发效率, 采取 3D 打印技术对部分零件进行制造, 完成移栽机构的装配。在试验台上, 采用高速摄影技术对移栽机构运行进行记录, 并得到样机实际工作过程中秧针尖点轨迹及姿态, 如图 9 所示。

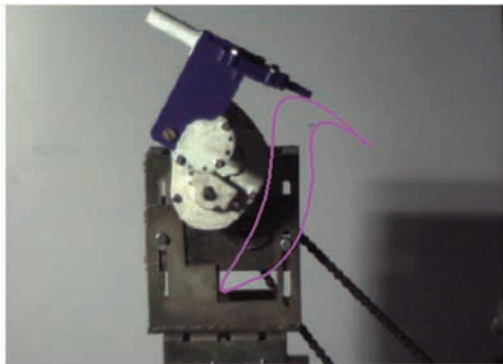


图 9 物理样机的实际工作轨迹

Fig. 9 Trajectory of physical prototype

图 10 分别为优化的理论轨迹与物理样机实际工作轨迹在坐标系中的示意图。图 10a 中, 秧针开始探出时的坐标点为 A, 秧针探出结束时的坐标点 (最右点) 为 B, 土钵完全脱离秧盘时的轨迹坐标点为 C, 秧针开始回收时的轨迹坐标点为 D, 秧针回收

结束时的轨迹坐标点为  $E$ , 轨迹最高点为  $F$ 。图 10b 中, 与实际工作轨迹相互对应的点分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ , 两轨迹坐标及对比误差如表 1 所示。通过两组数据的对比可以看出, 理论轨迹与实际轨迹上各点坐标之间略有差别, 分析主要原因有: 物理样机加工的过程中会存在误差; 在实际作业的过程中机器存在振动。但经过分析两轨迹存在的误差在允许范围内, 不会影响移栽机构的实际作业效果。

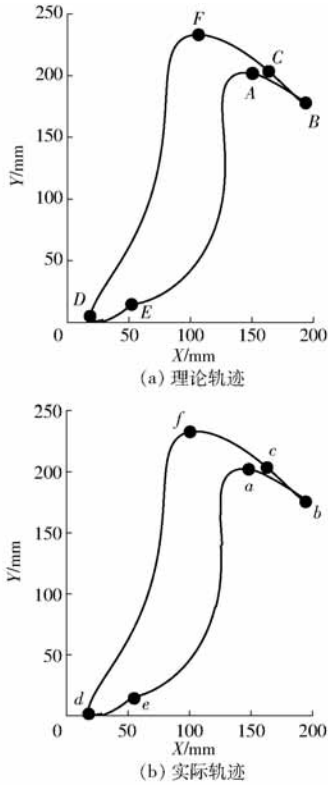


图 10 理论轨迹与实际轨迹对比

Fig. 10 Comparison of theoretical and actual trajectories

表 1 理论轨迹与实际轨迹坐标对比

Tab. 1 Coordinate comparison of theoretical and actual trajectories

理论坐标	实际坐标	误差
$A(149.66, 206.83)$	$a(148.86, 206.83)$	$(-0.8, 0)$
$B(197.31, 175.17)$	$b(196.00, 174.91)$	$(-1.31, -0.26)$
$C(163.90, 200.82)$	$c(163.10, 200.82)$	$(-0.8, 0)$
$D(22.18, 0.85)$	$d(22.17, 0.85)$	$(-0.01, 0)$
$E(56.02, 14.96)$	$e(55.06, 14.40)$	$(-0.96, -0.56)$
$F(106.71, 233.03)$	$f(105.91, 233.03)$	$(-0.80, 0)$

### 4.3 物理样机取苗与栽植试验

为了进一步验证探入式钵苗移栽机构的实用性, 本文对移栽机构进行取苗与栽植试验, 如图 11 所示。

试验地点为东北农业大学工程学院农业机械化实验中心, 试验选用苗高为 150 mm 左右、苗龄为 45 d 的番茄钵苗<sup>[21]</sup>, 在育秧的过程中选用寿禾粉冠

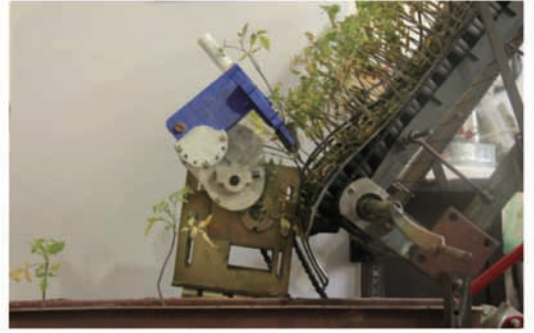


图 11 取苗与栽植试验

Fig. 11 Test of picking seeding and transplanting

F1 号番茄种子, 育秧基质选用原土与番茄育苗专用营养土的混合物, 其配比(原土与营养土的体积比)为 1:1<sup>[22]</sup>。为了配合课题组所研发的秧箱, 本试验选用特定软质秧盘进行育苗, 每张秧盘的穴数为 120 穴, 软质秧盘的上穴口尺寸为 37 mm × 37 mm, 下穴口尺寸为 17 mm × 17 mm, 穴口深度为 40 mm。将装配好的移栽机构安装到课题组自主研发的水旱田多功能试验台上进行性能试验<sup>[23]</sup>。考虑到 3D 打印移栽机构部分零件的强度, 试验过程设定工作转速为 30 r/min。

选取 3 盘番茄钵苗共 360 株进行试验, 试验过程中移栽机构将钵苗顺利从钵盘中完全取出即为取苗成功, 其中从钵盘中成功取出的数量为 334 株, 取苗成功率为 92.8%; 而成功取出的钵苗经过移栽机构的输送成功栽植到土槽中的数量为 323 株, 移栽成功率为 89.7%; 在农艺上栽植后以秧苗的直立度(秧苗与地面的水平夹角)大于 45°为栽植合格, 大于 70°为栽植优良<sup>[24-26]</sup>, 移栽成功的秧苗中直立度大于 45°的秧苗数量为 311 株, 栽植合格率为 86.4%, 直立度大于 70°的秧苗数量为 214 株, 栽植优良率为 59.4%。以上试验数据均符合栽植要求, 验证了移栽机构性能的合理性与实用性。经过分析, 造成秧苗未从穴盘中成功取出的主要原因包括: 秧苗的盘根状况不佳, 导致在秧针夹取土钵的过程中基质破碎; 部分秧苗在生长的过程中产生了连根的现象, 秧针夹取土钵的过程中阻力过大未能将秧苗取出。造成秧苗未能成功栽植到土槽中的主要原因为: 在输送的过程中由于振动造成土钵基质的松动脱落, 导致秧苗在两秧针间脱落。造成秧苗合格率过低的主要原因为: 土槽所开穴口深度不够或者穴口过大, 且在栽植过程中没有及时进行覆土、镇压等过程。

## 5 结论

(1) 提出了一种探入式番茄钵苗移栽机构, 可以实现夹取土钵的取苗方式, 结构简单, 成本低, 能

够避免秧针对土钵和根系的损伤。

(2) 根据探入式移栽机构的结构特点, 结合番茄钵苗移栽的农艺要求, 确立了优化目标, 并开发了优化设计软件, 通过人机交互的方式, 优化得到一组满足番茄钵苗移栽要求的结构参数。

(3) 利用物理样机, 进行高速摄像试验, 得到样

机的实际工作轨迹, 通过对比理论轨迹与实际工作轨迹, 验证了机构原理和机构设计的正确性。

(4) 进行台架试验, 得到探入式移栽机构的取苗成功率为 92.8%, 移栽成功率为 89.7%, 栽植合格率为 86.4%, 栽植优良率为 59.4%, 验证了移栽机构的实用性。

### 参 考 文 献

- [1] 吕志军, 单伊尹, 王杰, 等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 30-34. LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seedling-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 30-34. (in Chinese)
- [2] 赵匀, 刘星, 薛向磊, 等. 茄子钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 152-160. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180517&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180517&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.017. ZHAO Yun, LIU Xing, XUE Xianglei, et al. Optimal design and experiment of potted eggplant seedling transplanting mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 152-160. (in Chinese)
- [3] 廖庆喜, 张照, 胡乔磊, 等. 油菜钵苗移栽机气动取苗机构设计与轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 70-78. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171109&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171109&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.009. LIAO Qingxi, ZHANG Zhao, HU Qiaolei, et al. Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape paper pot seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 70-78. (in Chinese)
- [4] 赵雄, 沈明, 陈建能, 等. 棉花移栽机旋转式取苗机构的运动学分析及虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 13-20. ZHAO Xiong, SHEN Ming, CHEN Jianneng, et al. Kinematic analysis and virtual experiment of rotary pick-up mechanism on cotton transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 13-20. (in Chinese)
- [5] 刘姣娣, 曹卫彬, 田东洋, 等. 基于苗坨力学特性的自动移栽机执行机构参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 32-39. LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Optimization experiment of transplanting actuator parameters based on mechanical property of seedling pot [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 32-39. (in Chinese)
- [6] 韩绿化, 毛罕平, 缪小花, 等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 260-265. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131144&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131144&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044. HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260-265. (in Chinese)
- [7] CHOI W C, KIM D C, RYUI K, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplants [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(1): 13-19.
- [8] KONOSUKE T. Development of fully automatic vegetable transplanter [J]. Japan Agriculture Research Quarterly, 2000, 34: 21-28.
- [9] 王蒙蒙, 宋建农, 刘彩玲, 等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 49-57. WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese)
- [10] 蒋卓华, 蒋焕煜, 童俊华. 穴盘苗自动移栽机末端执行器的优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(6): 1119-1125. JIANG Zhuohua, JIANG Huanyu, TONG Junhua. Optimal design of end-effector on automatic plug seedling transplanter [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(6): 1119-1125. (in Chinese)
- [11] 赵匀, 张留远, 张昊, 等. 共轭凸轮与行星轮系组合式水稻钵苗移栽机构: 201210421617.1 [P]. 2012-10-30.
- [12] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [13] 王国强, 蒯文刚, 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.
- [14] 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [15] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 赵匀. 农业机械分析与综合 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [17] XIN Liang, LÜ Zhijun, WANG Wenqing, et al. Optimal design and development of a double-crank potted rice seedling transplanting mechanism [J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(1): 31-40.
- [18] 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 kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 35-42. (in Chinese)
- [19] 俞高红, 黄小艳, 叶秉良, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构的机理分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 16-22. YU Gaohong, HUANG Xiaoyan, YE Bingliang, et al. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16-22. (in Chinese)
- [20] 赵匀, 刘志平, 辛亮, 等. 水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 87-93. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180410&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180410&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.010. ZHAO Yun, LIU Zhiping, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 87-93. (in Chinese)
- [21] 周淑霞. 加工番茄育苗移栽机采高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2016(4): 24-26.
- [22] 王秀峰, 陈振德. 番茄工厂化育苗[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 宫成宇. 多功能钵苗移栽试验台设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. GONG Chengyu. Test-bed design and experiment research on multi-function transplanting machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [25] 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): 73-77. 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): 73-77. (in Chinese)
- [26] 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150706&journal\\_id=jcsam](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. 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. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 140 页)

- [27] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业技术出版社, 2007.
- [28] 王家胜, 尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43. WANG Jiasheng, SHANG Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 38-43. (in Chinese)
- [29] 顾峰玮, 胡志超, 吴惠昌, 等. 4LT-A型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 1-9. GU Fengwei, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Development and experiment of 4LT-A staggered-digsugar beet combine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1-9. (in Chinese)
- [30] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 4UGS2型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 26-33. LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 26-33. (in Chinese)
- [31] 全国农业机械标准化技术委员会. NY/T 648—2015 马铃薯收获机质量评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [32] LOPEZ-MAESTRESLAS A, KERESZTES J C, GOODARZI M, et al. Non-destructive detection of blackspot in potatoes by vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2016, 70(12): 229-241.
- [33] YU Pengcheng, LI Changying, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: hardware design and calibration[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 103-111.
- [34] YU Pengcheng, LI Changying, TAKEDA, et al. Visual bruise assessment and analysis of mechanical impact measurement in southern highbush blueberries[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(1): 29-37.
- [35] XU Rui, TAKEDA F, KREWER G, et al. Measure of mechanical impacts in commercial blueberry packing lines and potential damage to blueberry fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 110(12): 103-113.