

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.011

全自动草莓钵苗移栽机构优化设计与试验

许春林 吕志军 辛亮 赵匀

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了实现草莓钵苗机械化移栽,根据草莓种植农艺要求,提出了一种 Hermite 插值非圆齿轮行星轮系全自动草莓钵苗移栽机构,用一套回转机构依次完成取苗、输送、挖穴与栽植 4 个移栽工序,满足了草莓钵苗移栽所需的轨迹与姿态要求,保证了所取秧苗和所挖穴口的精准配合。根据移栽机构的工作原理,建立了运动学理论模型,并结合设定的优化目标,基于 Visual Basic 6.0 设计了计算机辅助分析优化设计软件,通过优化得到了一组满足移栽要求的机构参数。根据优化的参数对机构进行了二维设计、三维建模,通过 ADAMS 软件完成了虚拟样机仿真,应用 3D 打印技术制作了物理样机。在所搭建的草莓钵苗移栽试验台架上,利用高速摄像技术对物理样机进行了轨迹与姿态验证试验,通过对比分析得到理论轨迹、虚拟仿真轨迹和台架试验轨迹基本一致,验证了机构设计的正确性。并进行了机构的性能试验,结果表明取苗成功率为 92%,栽植成功率为 85%,平均栽植株距为 172.9 mm,所挖穴口深度、长度和宽度效果良好,满足草莓钵苗移栽要求。

关键词: 草莓钵苗; 移栽机构; 挖穴机构; Hermite 插值非圆齿轮; 优化设计

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0097-10

Optimization Design and Experiment of Full-automatic Strawberry Potted Seedling Transplanting Mechanism

XU Chunlin LÜ Zhijun XIN Liang ZHAO Yun

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

Abstract: To realize the mechanized transplanting of the strawberry pot seedlings, according to the agricultural requirements of strawberry cultivation, a full-automatic strawberry potted seedling transplanting mechanism with non-circular gear designed by using fitted Hermite curves as a the non-circular gear pitch curve was proposed, using only one mechanism to complete the four actions such as seedling picking, transporting, digging hole and transplanting. And the transplanting mechanism satisfied the requirements of the strawberry transplanting trajectory and attitude, ensuring the precise coordination of the seedling and the hole. Based on the working principle of the transplanting mechanism, the theoretical model and kinematic characteristics of the transplanting mechanism were analyzed, and the computer-aided analysis and optimization software based on Visual Basic 6.0 was designed and used to obtain a set of parameters which met the transplanting requirements. A virtual prototype of the transplanting mechanism was established and simulated by using the ADAMS software. The physical prototype of the transplanting mechanism was developed by the 3D printing technology, and the transplanting mechanism was mounted on a strawberry transplanting test bench on which high-speed photography experiment was conducted. The results of the theoretical analysis, virtual test, and physical prototype test were essentially identical, which verified the correctness of the mechanism design. The performance test showed that the success rate of seedling picking was 92%, the success rate of planting was 85%, and the average planting distance was 172.9 mm, the test revealed the depth, length and width of the digging holes met the transplant requirements of strawberry potted seedling.

Key words: strawberry potted seedling; transplanting mechanism; digging hole mechanism; Hermite interpolation non-circular gear; optimization design

收稿日期: 2019-06-25 修回日期: 2019-07-08

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: 许春林(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事耕作技术及机具研究,E-mail: 13904656458@163.com

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

0 引言

草莓是经济价值较高的小浆果,具有易繁殖、生长周期短、管理方便等优点^[1-2],其主要的种植方式是将生长在草莓匍匐茎繁殖形成的子株直接移栽到田中^[3]。而将子株栽植到带有营养土的钵盘中进行育秧,不仅能大幅提高移栽子株的成活率,使其根系更发达、苗更壮,而且有利于实现机械化移栽,提高作业效率^[4]。

目前,我国已成为世界上最大的草莓生产国,但大多仍采用手工移栽的方式,国内外市场上未见针对草莓的全自动移栽装备^[5]。草莓钵苗与旱田作物秧苗移栽要求相近,移栽机构是旱田移栽的关键工作部件。欧美国家全自动移栽机多采用机、电、液一体化技术,由单片机、电磁阀、气缸和机械手等装置分别完成取苗、输送和栽植等动作,价格昂贵,没有在国内得到推广^[6];日本井关公司开发的全自动钵苗移栽机,其核心机构由取苗和植苗两套机构组合而成,分别用滑道传动完成取苗动作,用鸭嘴式栽植器完成栽植动作,结构复杂、效率低^[7-8]。国内移栽机仍处于起步阶段,市场上主要是半自动移栽机,劳动强度大,漏苗率高,作业效率低^[9-11]。国内科研单位针对蔬菜、花卉等移栽机构也展开了研究,包括应用于温室等的系列穴盘苗末端执行器的开发^[12-13];俞高红等^[14-15]提出了一种旋转式穴盘苗取苗机构和行星轮系蔬菜钵苗栽植机构,用回转体完成取苗动作,通过栽植机构将钵苗植入土中。

为了实现草莓钵苗的取栽一体化全自动移栽,本文提出一种采用一套回转机构实现草莓钵苗移栽的取苗、输送、挖穴和栽植4道工序的移栽机构。以Hermite插值法构建新型非圆齿轮^[16-18],利用非圆齿轮传动分别实现“鹰嘴形”相对运动取苗轨迹^[19]和配合凸轮滑道机构的挖穴轨迹;基于理论分析与建模,开发辅助分析优化设计软件,对全自动草莓钵苗移栽机构进行优化,以得到满足草莓移栽要求的运动轨迹和姿态。

1 移栽机构设计要求与工作原理

1.1 机构设计要求

草莓钵苗移栽是将匍匐茎子株移植到营养盘中育秧后移栽钵苗的过程,而草莓具有弓背朝向固定方向生长的特性,因此,为了便于草莓后期的移栽、生长、采收和管理,首先要求子株需在钵盘中朝同一方向进行育秧^[20]。

育秧后的草莓钵苗如图1所示,其形态特征为茎叶分散、茎脆嫩易断、根系发达,易成良好的基质

与根系结合体^[2-3]。因此,移栽机构采用夹片扎入土钵中夹取的方式从钵盘中取秧,拔取土钵段轨迹长度要足够长,转角要小,保证土钵完全脱离钵盘过程不损伤土钵及根须,即满足夹土钵式的“鹰嘴形”取苗轨迹;然后夹持钵苗运输到栽植部位,栽植机构配合挖穴机构将钵苗强制推秧至挖好的穴孔内,栽植深度实现上不埋心、下不露根的定植深度原则^[1],栽植后不推倒已栽好的秧苗,回程后完成一次移栽。



图1 草莓钵盘育苗根系盘根效果图

Fig. 1 Root packing effect diagram of strawberry seedlings

为了提高移栽效率,要求采用回转机构一次性完成全部取苗、输送、挖穴、栽植4道工序,回转一周完成两次移栽,且以上过程均不发生任何干涉。

1.2 机构工作原理

移栽机构是草莓移栽机的核心工作部件,该机构由两部分组成:非圆齿轮行星轮系传动与栽植臂部件组成的取苗栽植机构,见图2a;固定在匀速转动行星架上的凸轮配合非匀速运动栽植臂部件中杆机构组成的挖穴机构,见图2b。

两机构共同配合运转并分别在相应时刻完成取苗、输送、挖穴和栽植4道移栽工序。由于双臂机构的上、下取苗栽植机构和上、下挖穴机构布置在中心轴的两侧,运动轨迹和姿态相同,所以只对单侧移栽机构进行分析。

为了满足移栽机构复杂轨迹的设计要求,需提高非圆齿轮节曲线和中心距的调节范围。因此,本机构非圆齿轮传动采用二级传动,太阳轮和中间轮A为一级传动,中间轮B和行星轮为二级传动,分别对应的两个齿轮节曲线参数一致^[21-22]。相互啮合的齿轮均满足主动轮转一周从动轮也转一周,总传动比为1^[23-25]。

取苗栽植机构工作原理:动力输入轴驱动行星架顺时针转动,在固定于机架的太阳轮的配合下,通过中间轮A和中间轴驱动中间轮B相对行星架做顺时针方向的自转,使行星轮及行星轴驱动栽植臂

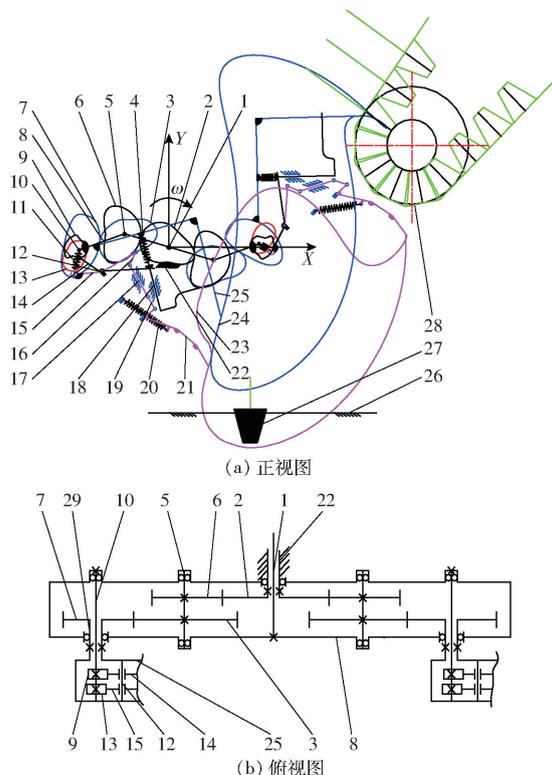


图 2 草莓钵苗移栽机构结构示意图

Fig. 2 Schematics of strawberry potted seedling transplanting mechanism

1. 动力输入轴 2. 太阳轮 3. 中间轮 B 4. 推秧弹簧 5. 中间轴 6. 中间轮 A 7. 行星轮 8. 行星架 9. 推秧凸轮 10. 凸轮轴 11. 拨叉拉簧 12. 拨叉轴 13. 挖穴凸轮 14. 推秧拨叉 15. 挖穴拨叉 16. 连杆 A 17. 连杆 B 18. 推秧杆 19. 连杆 C 20. 挖穴铲拉簧 21. 挖穴铲 22. 机架 23. 挖穴相对运动轨迹 24. “鹰嘴形”相对运动取苗轨迹 25. 栽植臂部件 26. 地面 27. 钵苗 28. 秧箱 29. 行星轴

部件相对行星架做逆时针方向不等速运动,形成满足移栽要求的夹土钵取苗的“鹰嘴形”相对运动轨迹;栽植臂部件内的推秧凸轮与推秧拨叉作用,在推秧弹簧作用下,使推秧杆直线往复运动,控制秧针在相应位置完成闭合夹苗与张开推秧动作。

挖穴机构工作原理:挖穴凸轮随行星架做顺时针匀速转动,与栽植臂部件中挖穴拨叉的非匀速运动形成相对运动,从而挖穴拨叉依次通过连杆机构驱动挖穴铲摆动形成满足挖穴要求的相对运动作业轨迹。

通过两套机构不同时刻的配合,实现双臂机构互不干涉,同时作业过程中的取苗和运输阶段挖穴机构远离秧箱与栽植臂,防止发生干涉;在栽植钵苗时,挖穴机构在田中进行挖穴,随后栽植臂部件配合挖穴机构且不发生干涉地控制推秧装置进行推秧,准确可靠地将钵苗栽植到所挖的穴孔中,完成栽植,回程准备下一次作业,机构旋转一周完成两次移栽过程。

1.3 机构轨迹和姿态分析

保证全自动草莓钵苗移栽机构取苗栽植和挖穴质量的关键和难点是移栽和挖穴轨迹与姿态的优化设计,包括取苗栽植机构和挖穴机构各时刻的配合以及双臂作业整个过程互不干涉等,因此对移栽各关键时刻的轨迹和姿态进行分析:通过分析模拟人工取苗、栽植和挖穴动作,可知取苗、挖穴和栽植依次完成,精准配合,并要保证所挖穴口与所取钵苗一一对应。秧针取苗近似直线的进出轨迹是成功的关键,因此栽植臂形成的是“鹰嘴形”轨迹,如图 3a 所示。机构顺时针方向旋转,秧针在 A 点开始进入钵土并开始逐渐夹紧,到达 B 点后完全夹紧土钵,在 AB 段秧针沿着垂直钵盘方向且近似直线插入钵土中,之后开始取出钵苗,通过 C 点时处于被夹持状态的土钵完全脱离钵盘,BC 段长度应大于钵土的深度,CD 段是秧苗的输送阶段,秧针一直处于夹持钵土的状态,输送阶段钵土不与秧箱干涉,移栽机构在 D 点处完成推苗动作,实现钵苗的栽植过程,在 DEA 段,秧针处于张开状态,栽植臂准备下一周期的取苗和栽植作业。在 FG 段,挖穴铲处于工作阶段,能够满足穴口深度、长度和宽度要求,在 GHF 段,挖穴铲处于非工作阶段,挖穴铲准备下一周期的挖穴作业,此阶段主要是避免移栽机构其他部件的干涉。

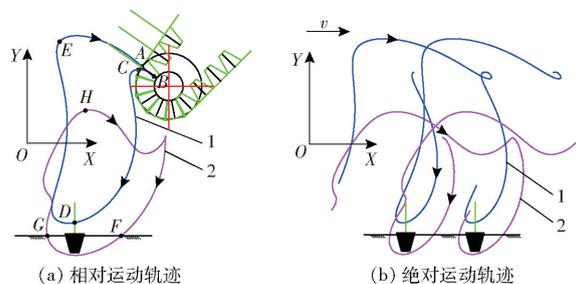


图 3 移栽机构运动轨迹

Fig. 3 Motion trajectories of transplanting mechanism

1. 取苗轨迹 2. 挖穴轨迹

移栽机构工作状态下形成的绝对运动轨迹如图 3b 所示。

2 移栽机构运动学模型建立

2.1 基于 Hermite 插值成型的非圆齿轮节曲线

非圆齿轮节曲线的选择是非圆齿轮设计的关键,相较于偏心、椭圆和卵形等非圆齿轮,本文运用 Hermite 插值方法成型的非圆齿轮节曲线,可提高非圆齿轮的调节范围,满足移栽和挖穴特定、复杂的轨迹要求。Hermite 插值多项式不仅要求所插入点上的函数值相等,而且对应的导数也相等,因此成型的曲线过渡更光滑^[18]。

Hermite 插值多项式为

$$H_{2n+1}(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \alpha_i(x) + \sum_{i=0}^n f'(x_i) \lambda_i(x) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \alpha_i(x) = \left[1 - 2(x - x_i) \sum_{k=0, k \neq i}^n \frac{1}{x_i - x_k} \right] l_i^2(x) \quad (2)$$

$$\lambda_i(x) = (x - x_i) l_i^2(x) \quad (3)$$

$$l_i(x) = \sum_{k=0, k \neq i}^n \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \quad (4)$$

式中 $(x_i, f(x_i))$ ——插值点坐标

$f'(x_i)$ ——插值点导数

$\alpha_i(x), \lambda_i(x)$ ——Hermite 插值基函数

$l_i(x)$ ——Lagrange 插值基函数

由 Hermite 插值多项式可知,在极坐标系中分别给出 $n+1$ 个满足要求的插值点的极角 φ_n 、极径 r_n 和导数 d_n ,可以推导出满足要求的节曲线方程

$$r(\varphi) = \sum_{i=0}^n r_n \alpha_i(\varphi) + \sum_{i=0}^n d_n \lambda_i(\varphi) \quad (5)$$

通过实际调试可得插值点数 $n+1=5$ 时,满足移栽的节曲线要求, $n+1 < 5$ 时节曲线调节范围不满足要求, $n+1 > 5$ 时会出现节曲线突变的 Runge 现象;当首尾插值点重合时,保证节曲线的封闭性。由 $2n+1=2 \times 4+1=9$,可知所求节曲线方程为9次 Hermite 插值多项式^[18]。

2.2 机构运动学分析

以太阳轮的转动中心 O_1 为坐标原点,水平方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴建立坐标系,分别建立取苗栽植机构和挖穴机构运动学理论模型。以单侧栽植臂和挖穴机构为研究对象^[21],另一侧为行星架转过 180° 后的位置。

2.2.1 取苗栽植机构运动学分析

取苗栽植机构结构简图如图4所示。规定行星架逆时针转动角度为正, $\beta_j(\varphi)$ 为齿轮 j 相对行星架

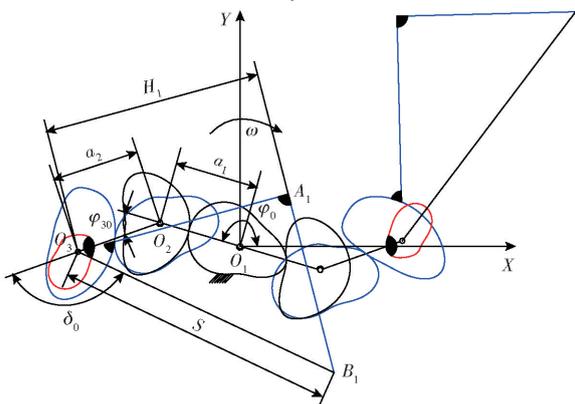


图4 取苗栽植机构结构简图

Fig.4 Structure sketch of seedling-picking and planting mechanism

的转角, $\varphi_j(\varphi)$ 为齿轮 j 的绝对转角。行星架的初始安装角为 φ_0 ,当行星架顺时针转过 φ 时,各角度分析如下:

行星架的绝对转角为

$$\varphi_H(\varphi) = \varphi_0 - \varphi \quad (6)$$

太阳轮相对行星架的转角和绝对转角分别为

$$\begin{cases} \beta_1(\varphi) = \varphi \\ \varphi_1(\varphi) = \varphi_0 \end{cases} \quad (7)$$

中间轮 A 相对行星架的转角和绝对转角为

$$\begin{cases} \beta_2(\varphi) = \sum_{i=0}^{\varphi-1} \frac{r_1(360 - \beta_1(i))}{a_1 - r_1(360 - \beta_1(i))} (\beta_1(i+1) - \beta_1(i)) \\ \varphi_2(\varphi) = \varphi_H(\varphi) - \beta_2(\varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $r_1(i)$ ——一级传动太阳轮节曲线极径,mm

a_1 ——相互啮合的一级传动齿轮(太阳轮和中间轮 A)中心距,mm

因为齿轮中间轮 B 和中间轮 A 是同轴固定,所以中间轮 B 相对行星架的转角和绝对转角为

$$\begin{cases} \beta_3(\varphi) = \beta_2(\varphi) \\ \varphi_3(\varphi) = \varphi_2(\varphi) + \varphi_{30} \end{cases} \quad (9)$$

式中 φ_{30} ——行星架拐角所引起的中间轮 B 的初始安装角, $(^\circ)$

行星轮相对行星架的转角和绝对转角为

$$\begin{cases} \beta_4(\varphi) = \sum_{i=0}^{\varphi-1} \frac{r_2(\beta_3(i))}{a_2 - r_2(\beta_3(i))} (\beta_3(i+1) - \beta_3(i)) \\ \varphi_4(\varphi) = \varphi_H(\varphi) + \varphi_{30} + \beta_4(\varphi) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $r_2(i)$ ——二级传动中间轮 B 节曲线极径,mm

a_2 ——相互啮合的二级传动齿轮(中间轮 B 和行星轮)中心距,mm

在以 O_1 为原点建立的直角坐标系中,各点的坐标分析如下:

太阳轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_1}(\varphi) = \varphi H / 180 \\ y_{O_1}(\varphi) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 H ——草莓株距,mm

中间轮 A 和中间轮 B 转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_2}(\varphi) = a_1 \cos((\varphi_H(\varphi) + \varphi_{30}) \pi / 180) + \varphi H / 180 \\ y_{O_2}(\varphi) = a_1 \sin((\varphi_H(\varphi) + \varphi_{30}) \pi / 180) \end{cases} \quad (12)$$

行星轮转动中心坐标为

$$\begin{cases} x_{O_3}(\varphi) = x_{O_2}(\varphi) + a_2 \cos((\varphi_H(\varphi) + \varphi_{30}) \pi / 180) + \varphi H / 180 \\ y_{O_3}(\varphi) = y_{O_2}(\varphi) + a_2 \sin((\varphi_H(\varphi) + \varphi_{30}) \pi / 180) \end{cases} \quad (13)$$

栽植臂拐点 A_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{A_1}(\varphi) = x_{O_3}(\varphi) + H_1 \cos(\gamma\pi/180 + \\ \arctan \sqrt{S^2 - H_1^2}) + \varphi H/180 \\ y_{A_1}(\varphi) = y_{O_3}(\varphi) + H_1 \sin(\gamma\pi/180 + \\ \arctan \sqrt{S^2 - H_1^2}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 H_1 ——非圆行星轮转动中心 O_3 到栽植臂拐点 A_1 的距离, mm

S ——非圆行星轮转动中心 O_3 到栽植臂秧针尖点 B_1 的距离, mm

栽植臂秧针尖点 B_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{B_1}(\varphi) = x_{O_3}(\varphi) + S \cos(\gamma_1\pi/180) + \varphi H/180 \\ y_{B_1}(\varphi) = y_{O_3}(\varphi) + S \sin(\gamma_1\pi/180) \end{cases} \quad (15)$$

其中 $\gamma_1 = -\varphi + \beta_4(\varphi) + \delta_0$ (16)

式中 δ_0 ——栽植臂的初始安装角, ($^\circ$)

2.2.2 挖穴机构运动学分析

(1) 挖穴拨叉转动中心 O_6 的坐标求解

挖穴机构结构简图如图 5 所示。为满足挖穴部件的正常传动, 将凸轮旋转一定角度使挖穴部件初始位置为 $O_3M_1 \perp O_6M_1$, L_2 为 O_6M_1 的长度, $L_2 = \sqrt{L_1^2 - r_t^2(0)}$, 此时 $\theta = 0^\circ$, L_1 为 O_3O_6 长度, $r_t(\theta)$ 为凸轮节曲线极径, mm, 挖穴拨叉的转动中心 O_6 布置于栽植臂部件上, 其相对行星架的转角和绝对转角为

$$\begin{cases} \beta_{O_6}(\varphi) = \beta_4(\varphi) \\ \varphi_{O_6}(\varphi) = -\varphi + \beta_4(\varphi) + \delta_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中 δ_1 ——转动中心 O_6 的初始安装角, ($^\circ$)

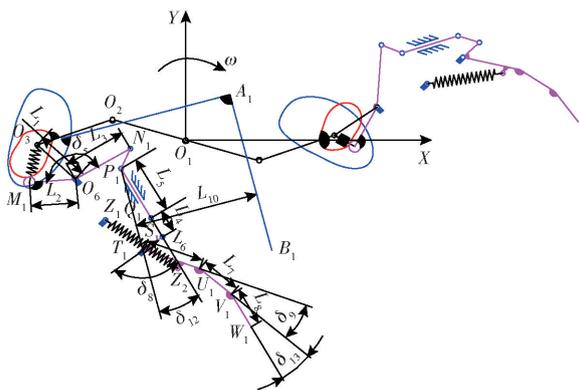


图 5 挖穴机构结构简图

Fig. 5 Structure sketch of hole-digging mechanism

挖穴拨叉转动中心 O_6 的坐标为

$$\begin{cases} x_{O_6}(\varphi) = x_{O_3}(\varphi) + L_1 \cos(\varphi_{O_6}(\varphi)\pi/180) + \varphi H/180 \\ y_{O_6}(\varphi) = y_{O_3}(\varphi) + L_1 \sin(\varphi_{O_6}(\varphi)\pi/180) \end{cases} \quad (18)$$

(2) 挖穴拨叉两端点 M_1 和 N_1 的坐标求解

在拨叉拉簧作用下, 挖穴凸轮和挖穴拨叉始终

接触, 假设挖穴凸轮旋转运动, 挖穴拨叉随之旋转, 设接触点为 $(x_A(\theta), y_A(\theta))$, 有

$$\begin{cases} x_A(\theta) = r_t(\theta) \cos(\theta\pi/180) \cos(t_\varphi(k)) - \\ r_t(\theta) \sin(\theta\pi/180) \sin(t_\varphi(k)) \\ y_A(\theta) = r_t(\theta) \cos(\theta\pi/180) \sin(t_\varphi(k)) - \\ r_t(\theta) \sin(\theta\pi/180) \cos(t_\varphi(k)) \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$t_\varphi(k) = (\varphi_6 - k + \delta_1)\pi/180 - \arccos(r_t(0)/L_1) \quad (20)$$

式中 $t_\varphi(k)$ ——挖穴凸轮绝对旋转角度, rad

设点 A 和点 O_6 的距离误差为

$$d_s(\theta) =$$

$$\sqrt{|(x_A(\theta) - x_{O_6}(k))^2 + (y_A(\theta) - y_{O_6}(k))^2 - L_2^2(k)|} \quad (21)$$

式中 θ, k 为循环变量, θ 循环嵌套于 k 循环中, 循环次数均为 360 次, 每循环一次 k, θ 计算 360 次, 在编写的程序中得出此时满足下面条件的 θ , 可知有 2 个值满足条件, 此时将循环分为 $0 \leq k \leq z$ 和 $z < k \leq 360$ 两部分即可判断出, 本文取 $z = 222$, 分别输出循环 1 第 1 个满足条件的 θ 值和循环 2 第 2 个满足条件的 θ 值。

$$d_s(\theta) \leq \xi \quad (22)$$

其中 z, ξ 为判断值, 本文取 $\xi = 5$ mm。

由所判断出的 θ 计算出每个 k 循环下连杆 O_1M_1 的角度为

$$\delta_3(k) = \arccos((L_1^2 + L_2^2 - r_t^2(\theta))/(2L_1L_2)) + \pi \quad (23)$$

式中 $\delta_3(k)$ ——连杆 O_1M_1 与水平方向夹角, rad

所以挖穴拨叉一端点 M_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{M_1}(\varphi) = x_{O_6}(\varphi) + L_2 \cos(\varphi_{O_6}(\varphi)\pi/180 + \delta_3(\varphi)) + \\ \varphi H/180 \\ y_{M_1}(\varphi) = y_{O_6}(\varphi) + L_2 \sin(\varphi_{O_6}(\varphi)\pi/180 + \delta_3(\varphi)) \end{cases} \quad (24)$$

其中 $\delta_3(\varphi) = \delta_3(k)$ (25)

挖穴拨叉一端点 N_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{N_1}(\varphi) = x_{O_6}(\varphi) + L_3 \cos((\varphi_{O_6}(\varphi) - \delta_5)\pi/180 + \\ \delta_3(\varphi)) + \varphi H/180 \\ y_{N_1}(\varphi) = y_{O_6}(\varphi) + L_3 \sin((\varphi_{O_6}(\varphi) - \delta_5)\pi/180 + \\ \delta_3(\varphi)) \end{cases} \quad (26)$$

式中 L_3 —— O_6N_1 长度

δ_5 —— O_6M_1 与 O_6N_1 夹角

(3) 连杆各铰链点以及各拐点坐标计算
设秧针 A_1B_1 旋转过程任意时刻的斜率为

$$k_1(\varphi) = \frac{y_{B_1}(\varphi) - y_{A_1}(\varphi)}{x_{B_1}(\varphi) - x_{A_1}(\varphi)} \quad (27)$$

设未加 P_1Q_1 与 A_1B_1 夹角 δ_{12} , 连杆 P_1Q_1 的斜率和秧针 A_1B_1 的斜率相等, 即 $k_2(\varphi) = k_1(\varphi)$, 且两直线相距 L_{10} , 此时利用挖穴凸轮的初始时刻即可计算出未加 δ_{12} 时连杆 P_1Q_1 的直线方程, 因为连杆 N_1P_1 的长度为 L_4 , 所以可推导出加入 $\delta_3(\varphi)$ 和 δ_{12} 后 P_1 的坐标, 此处省略推导过程, 得出 $(x_{P_1}(\varphi), y_{P_1}(\varphi))$ 。由于所设计的 $\Delta Q_1S_1T_1$ 为等腰三角形, 且腰长为 L_4 , 上述过程中还可求出固定于栽植臂上的 T_1 的坐标。

铰链点 Q_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{Q_1}(\varphi) = L_5 \cos((\varphi_{O_6}(\varphi) - \delta_5)\pi/180 + \gamma_2) + \\ \quad x_{P_1}(\varphi) + \varphi H/180 \\ y_{Q_1}(\varphi) = L_5 \sin((\varphi_{O_6}(\varphi) - \delta_5)\pi/180 + \gamma_2) + y_{P_1}(\varphi) \end{cases} \quad (28)$$

其中 $\gamma_2 = \delta_3(\varphi) - \delta_4(\varphi) - \delta_7(\varphi)$ (29)

$$\delta_4(\varphi) = \arctan \frac{y_{N_1}(\varphi) - y_{O_6}(\varphi)}{x_{N_1}(\varphi) - x_{O_6}(\varphi)} - \arctan \frac{y_{P_1}(\varphi) - y_{N_1}(\varphi)}{x_{P_1}(\varphi) - x_{N_1}(\varphi)} + 2\pi \quad (30)$$

$$\delta_7(\varphi) = \arctan \frac{y_{P_1}(\varphi) - y_{N_1}(\varphi)}{x_{P_1}(\varphi) - x_{N_1}(\varphi)} - \arctan(k_1(\varphi)) + \delta_{12}\pi/180 + 2\pi \quad (31)$$

式中 $\delta_4(\varphi)$ —— O_6N_1 与 N_1P_1 夹角, rad

$\delta_7(\varphi)$ —— P_1Q_1 与水平方向夹角, rad

L_5 —— P_1Q_1 长度, mm

根据 Q_1 点、 T_1 点和 $l_{Q_1S_1} = l_{S_1T_1}$ 3 个已知条件可得铰链点 S_1 坐标 $(x_{S_1}(\varphi), y_{S_1}(\varphi))$, 推导过程省略。

挖穴铲拐点 U_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{U_1}(\varphi) = x_{T_1}(\varphi) + L_6 \cos(\delta_{10}(\varphi) + \delta_8\pi/180) + \\ \quad \varphi H/180 \\ y_{U_1}(\varphi) = y_{T_1}(\varphi) + L_6 \sin(\delta_{10}(\varphi) + \delta_8\pi/180) \end{cases} \quad (32)$$

其中 $\delta_{10}(\varphi) = \arctan \frac{y_{T_1}(\varphi) - y_{S_1}(\varphi)}{x_{T_1}(\varphi) - x_{S_1}(\varphi)}$ (33)

式中 $\delta_{10}(\varphi)$ —— S_1T_1 与水平方向夹角, rad

δ_8 —— S_1T_1 与 T_1U_1 的拐角, ($^\circ$)

L_6 —— T_1U_1 长度, mm

挖穴铲拐点 V_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{V_1}(\varphi) = L_7 \cos(\delta_{10}(\varphi) + (\delta_8 + \delta_9)\pi/180) + \\ \quad x_{U_1}(\varphi) + \varphi H/180 \\ y_{V_1}(\varphi) = L_7 \sin(\delta_{10}(\varphi) + (\delta_8 + \delta_9)\pi/180) + y_{U_1}(\varphi) \end{cases} \quad (34)$$

式中 δ_9 —— U_1V_1 与 T_1U_1 的拐角, ($^\circ$)

L_7 —— U_1V_1 长度, mm

挖穴铲尖点 W_1 坐标为

$$\begin{cases} x_{W_1}(\varphi) = L_8 \cos(\delta_{10}(\varphi) + (\delta_8 + \delta_9 + \delta_{13})\pi/180) + \\ \quad x_{V_1}(\varphi) + \varphi H/180 \\ y_{W_1}(\varphi) = L_8 \sin(\delta_{10}(\varphi) + (\delta_8 + \delta_9 + \delta_{13})\pi/180) + \\ \quad y_{V_1}(\varphi) \end{cases} \quad (35)$$

式中 δ_{13} —— U_1V_1 与 V_1W_1 的拐角, ($^\circ$)

L_8 —— V_1W_1 长度, mm

各个部件的位移(转角)对时间求一阶导数和二阶导数即可得到其速度(角速度)和加速度(角加速度)。

3 计算机辅助分析与优化软件设计

全自动草莓钵苗移栽机构采用传统优化方法很难解决多参数、多目标、强耦合性优化难题。因此, 本文根据农艺要求、理论分析与目标函数, 设计了全自动草莓钵苗移栽机构优化软件, 简化了设计过程, 缩短了研发周期。

3.1 机构优化目标的确定

本文根据移栽机构数学模型、农艺要求及机构特点提出 23 个优化目标, 建立相应目标函数, 将几何目标数值化, 同时给出了优化目标的最优范围。优化目标是判断优化参数是否满足要求的重要指标^[26], 建立优化目标如下: 两栽植臂作业时互不干涉; 两栽植臂作业时与秧箱不干涉; 取苗角介于 $310^\circ \sim 320^\circ$ 之间; 取苗取出段直线长度大于 45 mm; 推苗角介于 $260^\circ \sim 280^\circ$ 之间; 钵苗移栽角度差介于 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间; 推苗后苗与地面夹角介于 $70^\circ \sim 110^\circ$ 之间; 栽植臂不推倒已栽秧苗; 齿轮箱距地面高度大于 25 mm; 尖嘴的穴口宽度小于 5 mm; 挖穴和移栽轨迹高度都大于 150 mm; 挖穴铲铰链点与秧箱不干涉; 挖穴铲与秧箱不干涉; 挖穴铲与栽植臂后盖不干涉; 绝对运动穴口长度介于 85 ~ 110 mm 之间; 穴深介于 40 ~ 50 mm; 挖穴铲不推秧; 绝对运动穴口中心与秧苗的中心偏移量小于 20 mm; 挖穴铲不与秧针干涉; 铰链点与地面最近的距离大于 25 mm; 传动箱不与秧箱干涉; 秧针取苗摆角小于 5° ; 非圆齿轮模数大于 2.5 mm。

3.2 移栽机构优化软件设计

全自动草莓钵苗移栽机构优化设计难点在于实现取苗轨迹和实现挖穴轨迹的两套机构之间的配合。根据所建立的运动学理论模型和数字化优化目标, 基于 Visual Basic 6.0 设计了移栽机构辅助分析

优化设计软件^[27], 软件可对机构的结构尺寸、位置和运动状态进行实时运动模拟, 通过人机交互, 以显示条辨别目标优劣, 通过调节参数对移栽机构目标进行优化。通过辅助分析优化设计软件, 最终获得一组满足全自动草莓钵苗移栽机构要求的结构参数, 如图 6 所示。

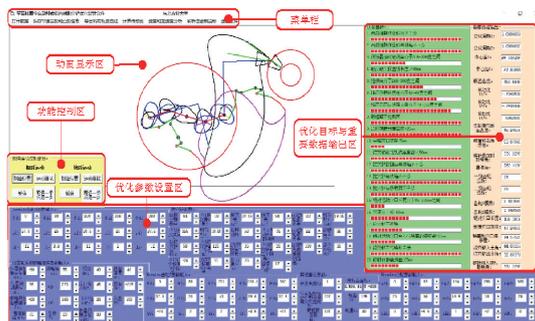


图 6 移栽机构优化软件界面

Fig. 6 Interface of optimization software for transplanting mechanism

3.3 非圆齿轮成型软件

非圆齿轮轮系包括主动轮非圆齿轮和从动轮非圆齿轮(共轭齿轮), 非圆齿轮由每个轮齿的齿形和轮齿的过渡曲线组成, 每一个轮齿的齿形和过渡曲线都不一样^[23]。

由节曲线方程式可推导出非圆齿轮齿形方程式^[28], 确定齿形的解析图见图 7。

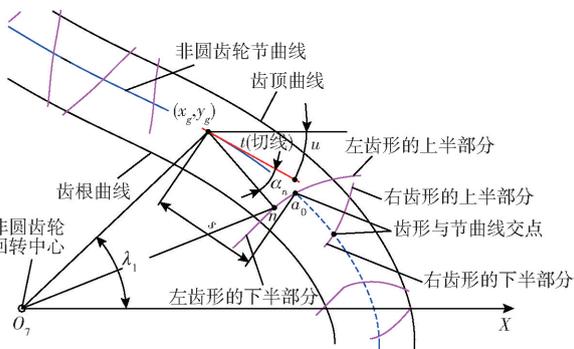


图 7 齿形解析图

Fig. 7 Analytical diagram for gear profile

右齿形方程为

$$x_R = x_g \pm s \cos \alpha_n \cos u \quad (36)$$

$$y_R = y_g \pm s \cos \alpha_n \sin u \quad (37)$$

左齿形方程为

$$x_L = x_g \mp s \cos \alpha_n \cos u \quad (38)$$

$$y_L = y_g \mp s \cos \alpha_n \sin u \quad (39)$$

式中 (x_g, y_g) ——节曲线与齿形法线交点坐标, mm
 u ——节曲线上点 (x_g, y_g) 的切线正方向与 X 轴正方向的夹角, rad
 s ——由节曲线上点 (x_g, y_g) 到节曲线与齿形交点的节曲线弧长, mm
 α_n ——刀具齿形角(一般为 20°), $(^\circ)$

式中正负号取决于 u 所在象限; 上面的符号适用于节曲线上齿形线上的点; 下面的符号适用于节曲线下齿形线上的点。

非圆齿轮的过渡曲线形成原理是: 插齿刀和被切非圆齿轮在 P 点开始啮合时, 刀尖 E 点轨迹的连线形成过渡曲线^[28], 插齿刀切齿时过渡曲线的原理如图 8。

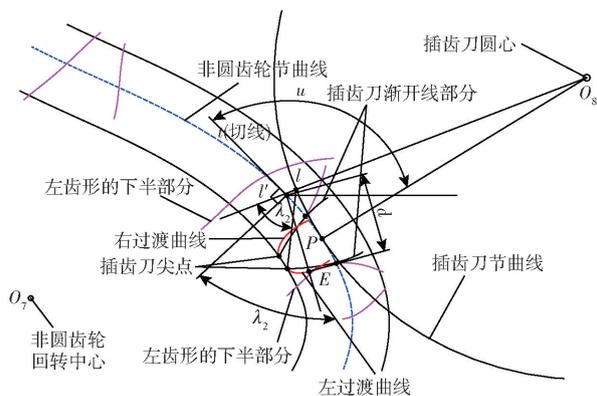


图 8 过渡曲线解析图

Fig. 8 Analytical diagram of transition curve

右过渡曲线方程为

$$x'_R = x_g + d \cos(u + \lambda_2 + \pi/2) \quad (40)$$

$$y'_R = y_g + d \sin(u + \lambda_2 + \pi/2) \quad (41)$$

左过渡曲线方程为

$$x'_L = x_g + d \cos(u - \lambda_2 + \pi/2) \quad (42)$$

$$y'_L = y_g + d \sin(u - \lambda_2 + \pi/2) \quad (43)$$

式中 d ——插齿刀节曲线上 l 点到插齿刀尖点 E 的距离, mm

λ_2 ——插齿刀节曲线上 l 点和插齿刀圆心 O_8 的连线与插齿刀节曲线上 l 点和插齿刀尖点连线的夹角, rad

插齿刀节曲线上点 l 和非圆节曲线上点 l' 到啮合点 P 点的曲线距离相等。由以上理论可在 Visual Basic 6.0 软件中编写齿形成型程序和过渡曲线成型程序。利用程序导出所需的齿形 CAD 文件和过渡曲线 CAD 文件。将所有的齿形线和过渡曲线合并和修剪, 从而得到最终的非圆齿轮齿廓线, 如图 9 所示。



图 9 主动轮齿廓形成过程

Fig. 9 Formation process of tooth profile for driving gear

用相同原理成型共轭非圆齿轮, 在 NX 10.0 三维软件中拉伸出实体。将非圆齿轮导入 ADAMS 动

力学仿真软件中,进行运动仿真,验证非圆齿轮成型软件编写的正确性。

4 虚拟样机仿真与物理样机试验

4.1 虚拟样机仿真验证与物理样机加工

根据优化的参数对移栽机构进行结构设计,利用 NX 10.0 软件完成三维建模与装配,并将装配体导入 ADAMS 2010 软件中,进行虚拟样机仿真,得出全自动草莓钵苗移栽机构的秧针尖点和挖穴铲尖点的运动轨迹,如图 10 所示。仿真轨迹与理论轨迹基本一致,初步验证了移栽机构理论设计的正确性。

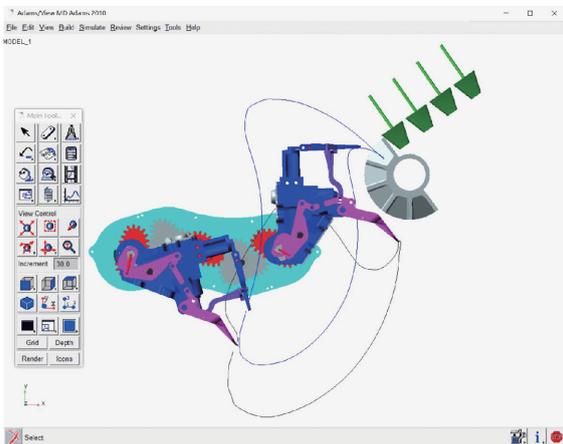


图 10 虚拟样机仿真轨迹

Fig. 10 Simulation trajectory of virtual prototype

为缩短物理样机的研制时间、降低复杂零件的加工成本、加快样机研制速度,应用工业级 3D 打印技术完成主要零部件的实体成型,为后期模具开发奠定了良好的基础。为了保证机构的可靠性,部分零部件采用金属材料加工。

4.2 高速摄像试验验证

将装配好的物理样机安装在试验台架上^[29],利用高速摄像试验验证其性能及轨迹和姿态。设定机构转速为 40 r/min,利用 Phantom V5.1 高速摄像机完成移栽机构运动轨迹的拍摄。通过高速摄像机及分析软件获得了全自动草莓钵苗移栽机构在开始进入土钵、完全夹紧土钵、土钵完全离开钵盘、开始挖穴、栽植推秧瞬间和栽植完成等实际工作关键位置与时刻的轨迹与姿态图像,如图 11 所示。通过分析图像可知,取苗、挖穴和栽植均满足设计要求,且效果良好;同时通过后后期数据处理,得到物理样机秧针尖点与挖穴铲尖点运转过程中的相对运动轨迹,如图 12 所示。

将物理样机所得实际轨迹与优化设计软件所得理论轨迹和虚拟仿真轨迹对比可知,结果基本保持一致,验证了移栽机构设计的可行性与合理性。由于物理样机试验中的机器振动原因,轨迹会受到影



图 11 移栽机构关键位置

Fig. 11 Key positions of transplanting mechanism

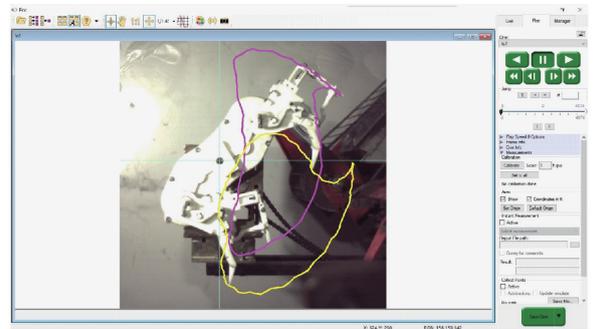


图 12 高速摄影验证试验

Fig. 12 High-speed photography verification test

响,但这些因素造成的误差均在合理范围内。

4.3 物理样机台架试验

为了进一步验证所研制的全自动草莓钵苗移栽机构的实际工作情况,对其进行物理样机台架性能试验研究^[30-31],如图 13 所示。在东北农业大学工程学院兼光型植物工厂实验室进行育苗,钵苗满足移栽要求后,在东北农业大学农业机械化实验中心进行性能验证试验。



图 13 取苗、挖穴和栽植试验

Fig. 13 Test of picking seedling, digging holes and planting

试验穴盘尺寸需满足草莓育苗期间的空间要求,故采用 5×10 穴的塑料软质穴盘,钵盘长480 mm、宽255 mm,穴口上口径45 mm \times 45 mm、下口径20 mm \times 20 mm、钵深40 mm,每穴间距50 mm,穴钵底部的圆孔直径为10 mm。试验选用草莓品种为“牛奶”草莓,栽植株距150~200 mm(本文株距取175 mm),行距为200~300 mm,苗龄为33 d,平均苗高120 mm,每穴一株。将育秧基质与黑土按质量比1:1混合^[32]。

考虑3D打印材料的强度,试验时移栽机构顺时针旋转,转速为40 r/min,土槽向左直线运动,速度为0.23 m/s,共对2盘钵苗共100穴进行取苗、挖穴和栽植试验。试验过程中,机构运转平稳。成功将钵苗完全从钵盘中取出的秧苗共有92株,取苗成功率为92%;对挖穴试验中穴口的深度、长度、宽度和栽植株距进行测量记录,选取5组每组5次试验数据的平均值,如表1所示,形成穴口的平均深度、长度和宽度分别为46.4、106.8、55.8 mm,平均栽植株距为172.9 mm;成功栽入穴中的钵苗共85株,栽入成功率为85%;以上试验数据均符合草莓移栽机构设计要求^[33],进行的相关性能试验验证了移栽机构的可行性与实用性。

分析未取出秧苗的主要原因包括:取苗过程连带出相互连根的邻苗从而导致的空穴、穴盘内钵苗未出苗和生长不佳导致秧苗幼小盘根不理想等;而未栽入穴口的原因主要是移栽过程机器的振动使土钵基质松散,或钵苗本身盘根不佳,导致移栽过程中滑落或推秧不准确等。以上问题可通过后期对育秧

表1 试验结果

评价指标	试验组号					平均值	理论值
	1	2	3	4	5		
穴口深度	46.3	48.2	45.6	42.5	49.4	46.4	47.24
穴口长度	102.4	115.2	106.6	99.7	110.3	106.8	105.4
穴口宽度	54.5	55.2	50.6	61.3	57.4	55.8	52.0
株距	185.6	166.3	158.9	178.2	175.5	172.9	175.0

或机构等完善来提升整体性能。

5 结论

(1)提出了一种全自动草莓钵苗移栽机构,结构简单、成本低,可一次性完成取苗、输送、挖穴和移栽一系列移栽工序。

(2)建立了机构运动学理论模型,并基于Visual Basic 6.0设计了针对全自动草莓钵苗移栽机构的辅助分析优化设计软件和非圆齿轮成型软件,最终得到一组满足草莓钵苗移栽要求的结构参数。

(3)进行了虚拟仿真验证与物理样机的研制,开展了高速摄像台架验证试验,得出了理论轨迹、虚拟仿真轨迹和台架实际轨迹基本一致的结论,验证了机构设计的正确性。

(4)完成了试验所需草莓钵苗的培育工作,在试验台架上进行了取苗、挖穴和移栽试验,结果表明取苗成功率为92%,栽植成功率为85%,平均栽植株距为172.9 mm,所挖穴口深度、长度和宽度效果良好,均满足农艺要求,试验结果证明了所设计移栽机构性能的实用性。

参 考 文 献

- [1] 杨雷, 杨莉. 草莓高效栽培[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [2] 雷家军. 有机草莓栽培实用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- [3] 杨莉, 杨雷, 李莉. 图说草莓栽培关键技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.
- [4] 刘继展, 李茂, 李男, 等. 草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 49-58.
LIU Jizhan, LI Mao, LI Nan, et al. Design and test of end-effector for automatic transplanting of strawberry plug seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 49-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.007. (in Chinese)
- [5] 徐丽明, 张铁中. 我国草莓生产作业机械的设计特点探讨[J]. 中国农机化, 2006, 27(5): 102-105.
XU Liming, ZHANG Tiezhong. Regional development and machine characteristic in China strawberry production [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006, 27(5): 102-105. (in Chinese)
- [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. Current situation and prospect of transplanter [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?file_no=20140808&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [7] 何亚凯, 颜华, 崔巍, 等. 蔬菜自动移栽技术研究现状与分析[J]. 农业工程, 2018, 8(3): 1-7.
HE Yakai, YAN Hua, CUI Wei, et al. Research situation and analysis on automatic transplanting technology for vegetable seedling [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(3): 1-7. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 袁文胜, 金诚谦, 吴崇友, 等. 链夹式移栽机立苗机理分析与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 277-281.

- YUAN Wensheng, JIN Chengqian, WU Chongyou, et al. Theoretical analysis and experiments of transplanting mechanism of chain-clamp transplanter for rapeseed seedlings [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 277-281. (in Chinese)
- [10] 王石, 王笑岩, 李成华. 挠性圆盘式蔬菜移栽机运动仿真分析[J]. 农机化研究, 2013, 35(10): 42-45.
WANG Shi, WANG Xiaoyan, LI Chenghua. Analysis of kinematic simulation of soft disc-type vegetable seedling transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 42-45. (in Chinese)
- [11] 吴彦强, 王文莉, 侯加林. 2ZBX-4型吊杯式蔬菜移栽机的研究与设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 107-111.
WU Yanqiang, WANG Wenli, HOU Jialin. Design and research of the 2ZBX-4 cup vegetable transplanting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 107-111. (in Chinese)
- [12] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131144&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044. (in Chinese)
- [13] 刘继展, 刘炜, 毛罕平, 等. 面向立柱栽培的移栽机器人设计与协调运动仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 48-53, 72.
LIU Jizhan, LIU Wei, MAO Hanping, et al. Design and coordinated motion simulation of transplanting robot for column cultivation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 48-53, 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140708&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.008. (in Chinese)
- [14] 俞高红, 俞腾飞, 叶秉良, 等. 一种旋转式穴盘苗取苗机构的设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 67-76.
YU Gaohong, YU Tengfei, YE Bingliang, et al. Design of a rotary plug seedling pick-up mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 67-76. (in Chinese)
- [15] 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?file_no=20150706&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.006. (in Chinese)
- [16] 于兰芳. $2n+1$ 次 Hermite 插值基函数探析[J]. 承德民族师专学报, 2001, 21(2): 10-11.
- [17] STOER J, BULIRSCH R. Introduction to numerical analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [18] 欧阳洁, 聂玉峰, 车刚明, 等. 数值分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [19] 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.
- [20] 陈跃军, 严成其, 黄坚, 等. 草莓穴盘扦插育苗方法: 2013106772824 [P]. 2013-12-13.
- [21] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [22] 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)
- [23] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [24] 辛亮. 斜置回转式水稻宽窄行钵苗移栽机构机理分析与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
XIN Liang. Mechanism analysis and performance research of the inclined rotary rice wide-and-narrow row potted seedling transplanting mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] 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)
- [27] 瞿彬, 王凤林. Visual Basic 程序设计全程指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [28] 李福生, 尹种芳, 张遵连, 等. 非圆齿轮与特种齿轮传动设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [29] 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 transplant machine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [30] 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)
- [31] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 113-121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190112&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.012. (in Chinese)
- [32] 赵立军, 陈海涛, 蔡晓华, 等. 密闭式立体秧系统水稻育苗基质配方研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 204-210.
ZHAO Lijun, CHEN Haitao, CAI Xiaohua, et al. Research on matrix formula of substrate for seedling in rice closed stereo seedling system [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 204-210. (in Chinese)
- [33] JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S]. 2013.