doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.009

行星轮栽植机构优化设计与试验

胡建平　潘　杰　张晨迪　张思伟　费卫征　潘浩然
(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对不同作物移栽时的不同株距问题,以自制行星轮转臂式栽植机构为研究对象,阐述了栽植机构组成及工作原理,构建了行星轮转臂平动机构及鸭嘴开合机构的运动学模型,在此基础上分析建立了栽植器前、后鸭嘴栽植点的运动轨迹数学模型。利用 Matlab 对该数学模型进行编程,建立其分析程序模型,并基于 Matlab GUI 平台开发计算机辅助优化设计人机交互界面,借助该界面对栽植点轨迹数学模型进行求解,从而模拟得到鸭嘴式栽植器前、后栽植点的运动轨迹曲线。分析栽植机构的行星架旋转半径,开合机构的后鸭嘴摆杆长度、后鸭嘴摆杆初始位置与水平线夹角及后鸭嘴末端点至鸭嘴转轴中心的距离等主要参数对栽植点运动轨迹的影响,以特征系数 λ 大于 1,栽植点轨迹环扣高度大于苗钵体高度,前后鸭嘴不带苗、不挂苗,前后鸭嘴轨迹与垄面交点处形成的穴口尺寸较小等条件为优化目标,通过人机交互优化得到一组能同时满足 3 种栽植株距要求的机构参数组合,并模拟验证该机构参数组合在 3 种栽植株距下的栽植轨迹。选用 72 孔穴盘培育的黄瓜苗为试验对象,以株距变异系数和直立度为评价指标,对优化得到的机构参数进行栽植性能试验。结果表明:在 3 种株距下的栽植直立度优良率高于 81%,总优良合格率达 94.8% 以上,株距变异系数小于 3.2%,证明优化设计的行星轮转臂式栽植机构能够满足多种株距移栽要求。

关键词: 移栽机; 栽植机构; 运动学模型; 优化设计
中图分类号: S223　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0078-09

Optimization Design and Experiment on Planetary Gears Planting Mechanism of Self-propelled Transplanting Machine

HU Jianping　PAN Jie　ZHANG Chendi　ZHANG Siwei　FEI Weizheng　PAN Haoran
(*Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology*, *Ministry of Eduction*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: As one of the core working parts of automatic transplanter, the planting mechanism directly determines the effect of transplanting seedlings. The problem of different plant spacings of different crops was focused on. With the self-made planting mechanism with planetary gears as the research object, the composition and working principle of the planting mechanism were clarified. On this basis, a theoretical model of the planting mechanism was constructed, and the mathematical model of the trajectory about the planting points on front and back duckbills were analyzed and established. The mathematical model was programmed by using Matlab to establish its analysis program. Computer-aided optimization of human-computer interaction interface was developed based on the Matlab GUI platform. With the aid of the optimized design interface, the mathematical model of the trajectory on planting points was solved to simulate the trajectory curve of the planting points on front and back duckbills. The effects of changes in the main parameters of the planting mechanism such as the rotation radius of planet frame, the length of the duckbill, the angle between the initial position of the duckbill and the horizontal line, and the distance from the end point of duckbill to the center of the rotation on the trajectory of the planting site were analyzed. With the value of characteristic parameter λ being greater than 1, the height of the buckle on the planting section being greater than the height of the pot seedling, the front and back duckbills without dragging and hanging seedlings, the size of the hole formed by duckbills on the ridge surface

收稿日期: 2018-07-15　修回日期: 2018-08-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(51475216)、江苏省重点研发项目(BE2017303)和江苏省高校优势学科建设工程项目(苏财教(2014)37 号)
作者简介: 胡建平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: hujp@ujs.edu.cn

being relatively small and other conditions as optimization goals, through simulation analysis on the influence of main parameters of planting mechanism on trajectory of planting points, institutional parameters that can meet the planting requirements of 280 mm, 310 mm and 345 mm at the same time were obtained and the planting trajectory of parameter combination was verified under three planting distances by simulation. The cucumber seedlings cultivated by 72-hole plug trays were selected as the test objects. With the variation coefficient and planting verticality as the evaluation index, prototype performance tests were conducted on the optimized mechanical parameters. The results showed that the excellent rate of planting verticality on three plant distances was higher than 81%, the total passing rate was over 94.8%, and the variation coefficient of spacing distances was less than 3.2%. This proved that the optimized design of the planting mechanism with planetary gears had good transplanting performance, which can meet the requirements for transplanting of multiple planting distances, and verified the correctness and feasibility of theoretical models and optimization methods. The research results provided an effective method for transplanter design.

Key words: transplanter; planting mechanism; kinematic model; optimization design

0　引言

蔬菜生产是一项劳动密集型产业，人工劳动强度大，制约了蔬菜产业的发展。蔬菜育苗移栽是蔬菜生产的主要方式，实现蔬菜自动化移栽已成为农业生产的迫切需求和未来发展的必然趋势[1-2]。栽植机构是自动移栽机的核心工作部件之一，不论是由人工将苗钵投入栽植嘴进行移栽作业的半自动移栽机械，还是能同时自动完成取苗和植苗动作的全自动移栽机械，均需要一套栽植机构来完成最终的植苗动作。作为将穴盘苗植入大田的直接作业机构，栽植机构的性能直接决定着穴盘苗的移栽立苗率和移栽机整机性能[3-4]。

常见的栽植机构有钳夹式、挠性圆盘式、导苗管式、吊篮式、鸭嘴式等。钳夹式、挠性圆盘式、导苗管式需配合开沟器使用，与我国蔬菜起垄种植的农艺要求不符[5]。吊篮式和鸭嘴式可直接进行垄上打穴移栽，但吊篮式栽植机构结构复杂，体积庞大，多用于国外大型农场[6]。

日本的洋马公司最早研制出行星轮-滑道式栽植机构，作业时鸭嘴在行星轮系和滑道的共同作用下，按照设计的轨迹和姿态打穴移栽，将钵苗植入土中。该栽植机构受滑道限制，只能安装一个栽植器，且行星轮的转速不能过快，限制了该栽植机构的作业效率[7]。胡建平等[8-9]提出一种行星轮多转臂式栽植机构，以行星轮单转臂为对象，仿真分析了在不同特征参数 λ 下的前、后鸭嘴末端运动轨迹及钵苗栽植状态，得到了钵苗直立度较好的 λ 值，但未对栽植机构主要参数进行优化。金鑫等[10]以钵苗栽植过程中位于栽植器内的运动阶段为优化目标，对钵苗运动过程动力学模型进行优化，得出了栽植器最佳初始位置及结构参数，但未对栽植轨迹进行优化。俞高红等[11]设计了行星轮系旋转式栽植机构，构建了一种能够满足大株距移栽作业轨迹的非圆齿轮传动比函数，通过人机交互方法优化出一组符合要求的较优机构参数，但其仅针对单一株距。

针对不同作物移栽时的不同株距问题，本文在前期研究基础上，以行星轮转臂式栽植机构为研究对象，建立栽植机构的运动学模型。通过对栽植机构前后栽植点轨迹的理论研究，由计算机辅助分析进行机构参数优化，得出一组能够适用于自走式多行移栽机、满足多株距移栽要求的栽植机构参数。并进行田间植苗验证试验，以改善行星轮转臂式栽植机构栽植性能，提高其适用性及通用性。

1　移栽机栽植机构结构与工作原理

自走式移栽机行星轮转臂式栽植机构的动力传输如图 1 所示。主要由底盘动力输出轴、T 型减速机、链传动机构等组成；作业时，栽植机构随移栽机整体向前运动，底盘发动机动力由动力输出轴经 T 型减速机由链传动机构传递至栽植单体带动栽植机构转动，带动栽植鸭嘴在土里打穴移栽，将穴盘苗植入田中。

每组栽植单体可实现两行蔬菜移栽，通过组合栽植单体可实现多行作业；底盘液压提升装置可以

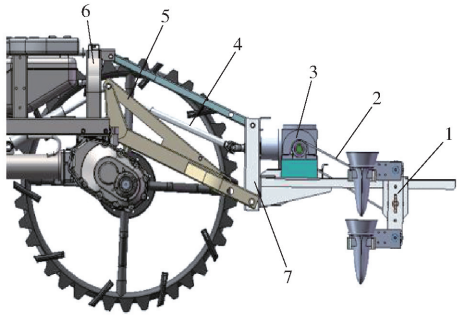


图 1　栽植部件传动方案

Fig. 1　Transmission method of planting device

1. 栽植单体　2. 链传动机构　3. T 型减速机　4. 底盘动力输出轴　5. 液压提升装置　6. 底盘架　7. 栽植支架

实现栽植部件升降,可根据垄高调节栽植部件整体高度以保证移栽深度,使移栽机能够适应不同垄高及平地移栽。

行星轮转臂式栽植机构结构如图 2 所示,主要由行星轮转臂平动机构和鸭嘴开合机构 2 部分组成。行星轮转臂平动机构主要包括行星轮驱动部件、行星架和栽植臂,其中行星轮驱动部件由一个中心轮、两组对称的惰轮和行星轮组成;鸭嘴开合机构主要包括鸭嘴式栽植器、凸轮、顶杆、滑槽、后转板和前转板,其中鸭嘴式栽植器由前鸭嘴、后鸭嘴、前鸭嘴固定板、后鸭嘴固定板、接苗斗和拉簧组成。

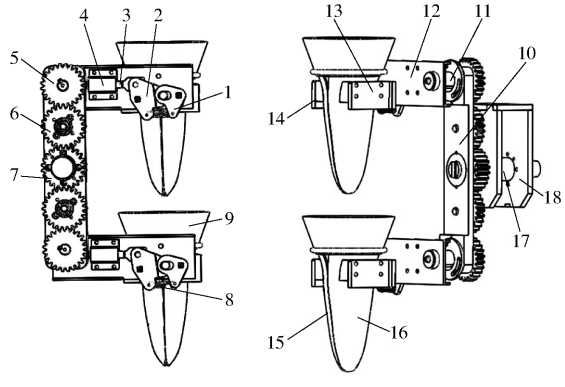


图 2 栽植机构结构图

Fig. 2 Structure diagram of planting mechanism

1. 前转板 2. 后转板 3. 顶杆 4. 滑槽 5. 行星轮 6. 惰轮 7. 中心轮 8. 拉簧 9. 接苗斗 10. 行星架 11. 凸轮 12. 栽植臂 13. 后鸭嘴固定板 14. 前鸭嘴固定板 15. 前鸭嘴 16. 后鸭嘴 17. 中心轮轴 18. 固定架

作业时,栽植机构随移栽机整体向前运动,底盘动力经分动箱由链传动传递至从动链轮的中心轮轴带动行星架转动,带动惰轮和行星轮啮合转动,惰轮与中心轮轴同向转动,行星轮反向转动。作业过程如图 3 所示,由于齿轮啮合作用,行星轮带动安装在其转轴上的栽植臂一起绕中心轮中心转动,且栽植臂始终保持水平;行星架带动凸轮绕其旋转中心转动,与顶杆挤压碰撞推动顶杆按一定运动规律移动,进而推动后转板带动后鸭嘴转动,后转板推动前转板带动前鸭嘴转动,实现鸭嘴的打开动作,且鸭嘴打开时,前后鸭嘴末端应位于同一水平线,拉簧的弹力

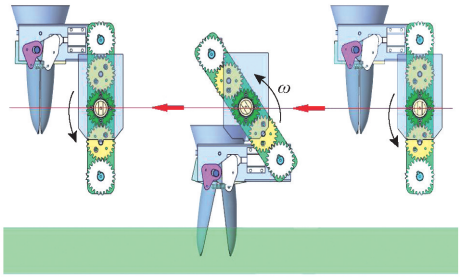


图 3 栽植机构作业过程

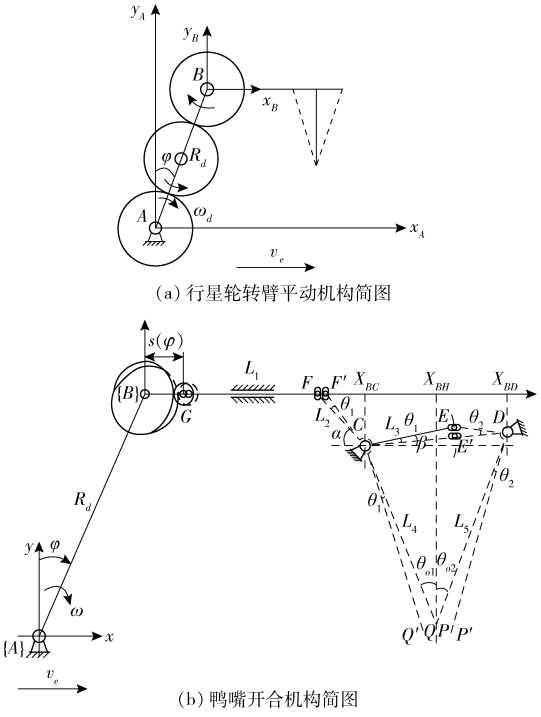
Fig. 3 Working process of planting mechanism

保证顶杆和凸轮始终接触,实现鸭嘴的闭合回位。如此循环动作,实现鸭嘴的循环开合,完成鸭嘴栽植器打穴、移栽作业。

2 行星轮转臂式栽植机构运动学模型

2.1 理论模型

由于栽植机构两组转臂的结构及运动规律相同,因此取其中一组转臂进行建模分析。由栽植机构结构原理可知,其由行星轮转臂平动机构和鸭嘴开合机构两部分组成,其机构简图如图 4 所示。



(a) 行星轮转臂平动机构简图

(b) 鸭嘴开合机构简图

图 4 栽植机构简图

Fig. 4 Schematics of planting mechanism

图 4a 为行星轮转臂平动机构简图,A 为以中心轮中心为原点的坐标系,其固连在固定架上,随底盘向前运动;B 为以行星轮中心为原点的坐标系,其整体绕 A 旋转,行星架 AB 为原动件。图 4b 为鸭嘴开合机构简图,即 B 坐标系图,凸轮固接于行星架上随其转动;C 点为后鸭嘴转轴中心,D 点为前鸭嘴转轴中心;E、F 为前、后两转板铰接点位置,将其与后鸭嘴转轴 C 点间关系简化为杆 CE、CF,P、Q 为前后鸭嘴栽植点[12-13]。

当移栽机向前行驶时,底盘动力由链传动带动行星架 AB 顺时针转动,带动鸭嘴开合机构即 B 坐标系整体绕 A 坐标系转动;凸轮随行星架 AB 转动角度 φ 后产生推程推动顶杆 FG 平动,从而推动后鸭嘴部件 $ECFQ$ 绕 C 点转动,进而在 E 点滑槽作用下带动前鸭嘴部件 EDP 绕 D 点转动,使前后鸭嘴两栽植点 P、Q 作开合运动,完成栽植动作。

2.2　运动数学模型

如图 4，以中心轮中心为原点建立 A 坐标系，以行星轮中心为原点建立 B 坐标系，移栽机前进方向与 x 轴正向相同。令 x_B 表示参数在 B 坐标系中的 x 方向分量表达式，y_B 表示参数在 B 坐标系中的 y 方向分量表达式，通过建立栽植器前后鸭嘴栽植点 P、Q 运动数学模型，来优化栽植机构结构参数。在 B 坐标系中，当前后鸭嘴 CQ、DP 位于初始位置时，Q、P 重合，可求得

$$\begin{cases}\sin\theta_{o1}=\dfrac{x_{BH}-x_{BC}}{L_4}\\ \sin\theta_{o2}=\dfrac{x_{BD}-x_{BH}}{L_5}\end{cases}\tag{1}$$

式中　θ_{o1}——初始位置后鸭嘴 CQ 与竖直线夹角，(°)

θ_{o2}——初始位置前鸭嘴 DP 与竖直线夹角，(°)

x_{BH}——前后鸭嘴闭合时的重合点 H 位于 x_B 轴上的坐标值

x_{BC}——C 点位于 x_B 轴上的坐标值

x_{BD}——D 点位于 x_B 轴上的坐标值

L_4——后鸭嘴末端点至后鸭嘴转轴中心的距离，mm

L_5——前鸭嘴末端点至前鸭嘴转轴中心的距离，mm

为使栽植点位于栽植器中间，则 X_{BH} 为 $X_{BC}X_{BD}$ 中点，可求得

$$\begin{cases}\sin\theta_{o1}=\dfrac{x_{BD}-x_{BC}}{2L_4}\\ \sin\theta_{o2}=\dfrac{x_{BD}-x_{BC}}{2L_5}\end{cases}\tag{2}$$

可求得

$$\begin{cases}\theta_{o1}=\arcsin\dfrac{x_{BD}-x_{BC}}{2L_4}\\ \theta_{o2}=\arcsin\dfrac{x_{BD}-x_{BC}}{2L_5}\end{cases}\tag{3}$$

当行星架 AB 转动使凸轮顶杆推动 $ECFQ$ 转动 θ_1 角至 $E'CF'Q'$ 位置、EDP 转动 θ_2 角至 $E'DP'$ 位置时，由

$$\cos(\alpha+\theta_1)=\frac{x_{BC}-s(\varphi)-L_1}{L_2}\tag{4}$$

式中　α——初始位置 CF 与水平线夹角，(°)

$s(\varphi)$——滚子 G 的运动规律与某时刻行星架转过的角位移 φ 的关系函数

L_1——FG 的长度，mm

L_2——CF 的长度，mm

可求得

$$\theta_1=\arccos\frac{x_{BC}-s(\varphi)-L_1}{L_2}-\alpha\tag{5}$$

由 $L_{CE}=L_{CE'}=L_3$（L_{CE}、$L_{CE'}$ 表示 CE、CE' 的长度），可求得

$$L_{EE'}=2L_3\sin\frac{\theta_1}{2}\tag{6}$$

式中　$L_{EE'}$——EE' 的长度，mm

E 点的位移坐标方程为

$$\begin{cases}x_{BE}=x_{BC}+L_3\cos\beta\\ y_{BE}=y_{BC}+L_3\sin\beta\end{cases}\tag{7}$$

式中　x_{BE}——E 点位于 x_B 轴上的坐标值

y_{BE}——E 点位于 y_B 轴上的坐标值

β——初始位置 CE 与水平线夹角，(°)

E' 点的位移坐标方程为

$$\begin{cases}x_{BE'}=x_{BC}+L_3\cos(\beta-\theta_1)\\ y_{BE'}=y_{BC}+L_3\sin(\beta-\theta_1)\end{cases}\tag{8}$$

式中　$x_{BE'}$——E' 点位于 x_B 轴上的坐标值

$y_{BE'}$——E' 点位于 y_B 轴上的坐标值

由式(7)、(8)可求得 EE' 的长度，由 D 点坐标 (x_{BD},y_{BD}) 可求得 DE、DE' 的长度 L_{DE}、$L_{DE'}$。

由公式

$$\cos\theta_2=\frac{L_{DE}^2+L_{DE'}^2-L_{EE'}^2}{2L_{DE}L_{DE'}}\tag{9}$$

可求得

$$\theta_2=\arccos\frac{L_{DE}^2+L_{DE'}^2-L_{EE'}^2}{2L_{DE}L_{DE'}}\tag{10}$$

则 P 点在 B 坐标系中的位移坐标方程为

$$\begin{cases}x_{BP}=x_{BD}-L_5\sin(\theta_{o2}-\theta_2)\\ y_{BP}=y_{BD}-L_5\cos(\theta_{o2}-\theta_2)\end{cases}\tag{11}$$

式中　x_{BP}——P 点位于 x_B 轴上的坐标值

y_{BP}——P 点位于 y_B 轴上的坐标值

Q 点在 B 坐标系中的位移坐标方程为

$$\begin{cases}x_{BQ}=x_{BC}+L_4\sin(\theta_{o1}-\theta_1)\\ y_{BQ}=y_{BC}-L_4\cos(\theta_{o1}-\theta_1)\end{cases}\tag{12}$$

式中　x_{BQ}——Q 点位于 x_B 轴上的坐标值

y_{BQ}——Q 点位于 y_B 轴上的坐标值

若移栽机前进速度为 v_e，行星架旋转角速度为 ω_d，则 B 点的绝对运动轨迹方程为

$$\begin{cases}x_B=R_d\cos(\omega_d t)+v_e t\\ y_B=R_d\sin(\omega_d t)\end{cases}\tag{13}$$

式中　x_B——B 点位于 x 轴上的坐标值

y_B——B 点位于 y 轴上的坐标值

R_d——行星架旋转半径，即行星轮与中心轮旋转中心的距离，mm

则前后鸭嘴栽植点 P、Q 的绝对运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_P = x_{BP} + x_B = x_D - L_5\sin(\theta_{o2} - \theta_2) + \\ \qquad R_d\cos(\omega_d t) + v_e t \\ y_P = y_{BP} + y_B = y_D - L_5\cos(\theta_{o2} - \theta_2) + \\ \qquad R_d\sin(\omega_d t) \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} x_Q = x_{BQ} + x_B = x_C + L_4\sin(\theta_{o1} - \theta_1) + \\ \qquad R_d\cos(\omega_d t) + v_e t \\ y_Q = y_{BQ} + y_B = y_C - L_4\cos(\theta_{o1} - \theta_1) + \\ \qquad R_d\sin(\omega_d t) \end{cases} \tag{15}$$

根据以上几何关系及 P、Q 点轨迹方程，利用 Matlab 对该数学模型进行编程，建立其分析程序模型，将一个运动周期分解为若干个时刻点，求解出前后鸭嘴栽植点（P、Q）在每个时刻点的坐标值，拟合为运动轨迹曲线输出，并用图形表示出来。

3 主要参数对栽植机构运动特性影响分析

根据所建立数学模型，基于 Matlab GUI 设计了计算机辅助优化设计人机交互界面，如图 5 所示。该界面主要包括凸轮滚子运动规律调入区、参数初值输入区、轨迹分析区、运动轨迹区、轨迹对比区、实时参数返回区和参数组合寄存区等。该优化设计界面通过可视化设计，将行星轮转臂式栽植机构前后鸭嘴栽植点的运动轨迹实时展现在设计者面前[14-16]，综合考虑几何关系及布置空间，以栽植机构 R_d、L_3、β、L_4 为变量参数。结合钵苗叶冠直径及实际作业工况，初选一组结构参数 $L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_3 = 38$ mm，$L_4 = 145$ mm，$R_d = 120$ mm，$\alpha = 82°$，$\beta = 8°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$，分别在 3 个适应于大多数蔬菜的株距下，分析变量参数对栽植轨迹的影响趋势，由此通过人机交互逐步调节设计参数，使栽植轨迹达到作业要求[17-18]。

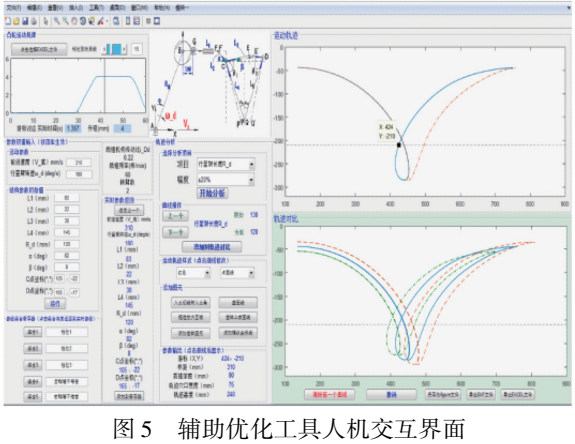


图 5 辅助优化工具人机交互界面

Fig. 5 Human-computer interaction interface

3.1 行星架旋转半径 R_d 对栽植轨迹的影响

引入特征参数 $\lambda = \dfrac{R_d\omega_d}{v_e}$，则 $R_d = \dfrac{\lambda v_e}{\omega_d}$，行星架旋转半径 R_d 决定着传动齿轮的大小，也决定着栽植机构整体的大小和质量，为保证其他参数不变，通过改变底盘速度 v_e 与行星架转速 ω_d 比值保证特征参数 λ 不变，进而将行星架旋转半径 R_d 作为变量参数。如图 5 所示，其他结构及位置参数选定为：$L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_3 = 38$ mm，$L_4 = 145$ mm，$\alpha = 82°$，$\beta = 8°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$。

对比图 6 中的栽植轨迹可以看出，特征参数 λ 一定时，随着行星架旋转半径 R_d 的增大，后鸭嘴形成的环扣形状变大，后鸭嘴避苗空间变大，且前鸭嘴轨迹向环扣靠拢，前鸭嘴的避苗空间减小；前后鸭嘴轨迹与垄面交点尺寸变化不大，对轨迹形成的穴口影响不大；随着 R_d 的增大，栽植轨迹逐渐向下向右偏移，栽植深度逐渐增大。在保证栽植深度一定时，R_d 越小则轨迹轮廓高度越小，且实际作业时支架距垄面过低会在垄面上推土。综上分析，行星架旋转半径 R_d 尺寸的选取需要充分考虑栽植鸭嘴尺寸、前后避苗空间和实际作业安装位置的需求。

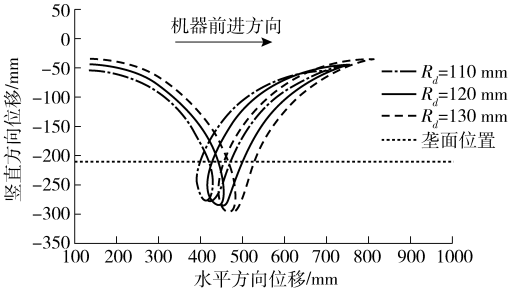


图 6 行星架旋转半径与栽植轨迹的关系

Fig. 6 Relationship between radius of rotation of planet frame (R_d) and planting trajectory

3.2 后鸭嘴摆杆 CE 长度 L_3 对栽植轨迹的影响

在中间株距 310 mm 下分析 CE 长度 L_3 对栽植轨迹的影响，如图 7 所示。移栽频率 f 为 60 株/min（即 $\omega_d = \pi$ rad/s）时，行走速度 $v_e = 310$ mm/s，其他结构及位置参数选定为：$L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_4 = 145$ mm，$R_d = 120$ mm，$\alpha = 82°$，$\beta = 8°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$。

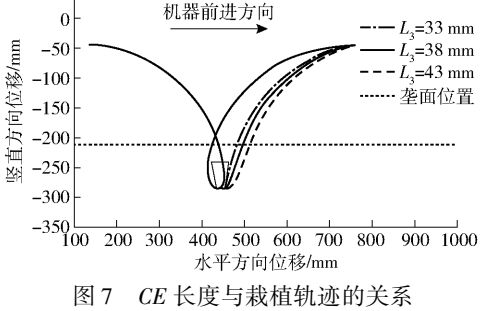


图 7 CE 长度与栽植轨迹的关系

Fig. 7 Relationship between length of CE (L_3) and planting trajectory

对比图 7 中的栽植轨迹可以看出，随着 L_3 的增大，前鸭嘴的运动开合幅度增大，即前鸭嘴的避苗空间增大，可通过适当增大 L_3 来消除由前鸭嘴避苗空间不足导致前鸭嘴对苗钵的挂带现象；但随着 L_3 的增大，前后鸭嘴轨迹在垄面处形成的穴口尺寸增大，因此在满足前鸭嘴避苗空间的前提下，L_3 的取值应尽量小。综上分析，L_3 的变化主要影响前鸭嘴的运动轨迹，对后鸭嘴运动所形成的环扣形状没有影响，L_3 的选取应充分考虑前鸭嘴避苗空间和穴口尺寸的大小。

3.3　*CE* 初始位置与水平线夹角 β 对栽植轨迹的影响

在中间株距 310 mm 下分析 *CE* 初始位置与水平线夹角 β 对栽植轨迹的影响，如图 8 所示。移栽频率 f 为 60 株/min（即 $\omega_d = \pi$ rad/s）时，行走速度 $v_e = 310$ mm/s，其他结构及位置参数选定为：$L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_3 = 38$ mm，$L_4 = 145$ mm，$R_d = 120$ mm，$\alpha = 82°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$。

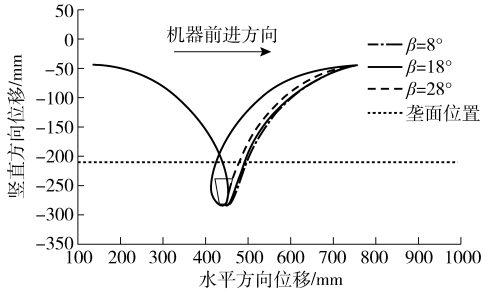


图 8　β 与栽植轨迹的关系

Fig. 8　Relationship between value of β and planting trajectory

对比图 8 中的栽植轨迹可以看出，β 对栽植轨迹的影响与 L_3 相反；随着 β 的增大，前鸭嘴的运动开合幅度减小，即前鸭嘴的避苗空间减小，可通过适当减小 β 来消除由前鸭嘴避苗空间不足导致前鸭嘴对苗钵的挂带现象；但随着 β 的减小，前后鸭嘴轨迹在垄面处形成的穴口尺寸增大，因此在满足前鸭嘴避苗空间的前提下，β 的取值应尽量大。综上分析，β 的变化主要影响前鸭嘴的运动轨迹，对后鸭嘴运动所形成的环扣形状没有影响，β 的选取应充分考虑前鸭嘴避苗空间和穴口尺寸的大小。

3.4　后鸭嘴末端点至鸭嘴转轴中心距离 L_4 对栽植轨迹的影响

在中间株距 310 mm 下分析后鸭嘴末端点至鸭嘴转轴中心距离 L_4 对栽植轨迹的影响，如图 9 所示。移栽频率 f 为 60 株/min（即 $\omega_d = \pi$ rad/s）时，行走速度 $v_e = 310$ mm/s，其他结构及位置参数选定为：$L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_3 = 38$ mm，$R_d = 120$ mm，$\alpha = 82°$，$\beta = 8°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$，对比图 9 中的栽植轨迹可以看出，随着 L_4 的增大，栽植轨迹相对旋转中心安装位置逐渐向下；前后鸭嘴的开合距离均变大，总的开合变大，且前后鸭嘴轨迹在垄面处形成的穴口尺寸增大；在行星架旋转半径 R_d 一定时，L_4 过大会使两栽植鸭嘴干涉，L_4 过小会使鸭嘴末端点与旋转中心安装架距离较小，作业时栽植支架与垄面距离过近会影响作业效果。L_4 尺寸的选取决定着栽植鸭嘴的尺寸，鸭嘴尺寸需满足栽植深度要求，其取值应充分考虑穴盘苗的尺寸、开合距离、栽植深度和实际作业安装位置的需求。

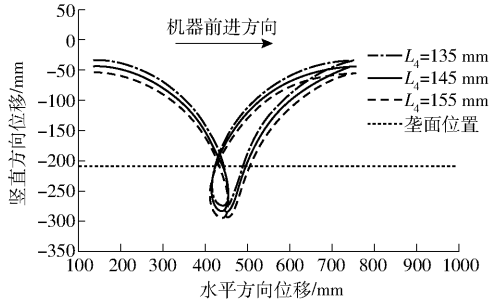


图 9　L_4 与栽植轨迹的关系

Fig. 9　Relationship between length of L_4 and planting trajectory

4　参数优选

通过以上分析，得到各变量参数对前后栽植点轨迹曲线的影响趋势。为使栽植机构能满足 3 种株距下的较高直立度要求，保证穴盘苗的栽植质量，在确定栽植机构参数时应满足以下优化目标：

（1）后鸭嘴轨迹在最低处应形成环扣，且环扣高度应大于苗钵高度。

（2）后鸭嘴轨迹回程要有向上趋势，避免太过向前与苗钵干涉使苗钵前倾。

（3）前鸭嘴轨迹回程要有向前趋势，避免向后推苗。

（4）前后鸭嘴轨迹与垄面交点处形成的穴口尺寸较小。

（5）轨迹整体高度要远大于穴盘苗高度，以防鸭嘴拖苗、压苗，轨迹高度应大于 200 mm。

（6）鸭嘴长度应适当大于穴盘苗的高度且两转臂鸭嘴间不能干涉[19]。

通过以上分析，得到各参数对前后栽植点轨迹曲线的影响趋势，并结合优化目标，对栽植机构参数进行优化。首先由经验初步设定各个参数的初始值，然后根据得到的各参数对栽植点轨迹的影响趋势，不断调整各参数数值，寻找符合优化目标要求的运动轨迹。综合考虑各组轨迹的优劣，最终通过人机交互优选出一组较优参数组合为：$L_1 = 83$ mm，$L_2 = 22$ mm，$L_3 = 38$ mm，$L_4 = 145$ mm，$R_d = 120$ mm，$\alpha = 82°$，$\beta = 8°$，$C(105, -22)$，$D(165, -17)$。

在 3 种株距下由该组参数得到的栽植轨迹如图 10 所示。图中虚线为穴盘苗投苗时在竖直方向的位置,实线为植苗后穴盘苗定植的位置。由图中可测出穴盘苗的栽植倾角。由图可以看出,在 3 个栽植挡位下,前鸭嘴均不带苗,在株距 280 mm 和株距 310 mm 下,后鸭嘴的运动轨迹在植苗段形成环扣,且环扣高度大于苗钵高度。前后鸭嘴避苗空间充足,穴盘苗的栽植倾角为 0°,满足直立度要求。在株距 345 mm 时,后鸭嘴轨迹形成的环扣形状减小,后鸭嘴轨迹回程与穴盘苗竖直位置发生轻微干涉,产生回带苗现象使穴盘苗前倾。当穴盘苗完全脱离后鸭嘴被定植时,由图可测得穴盘苗栽植倾角为 3°,可知该组结构参数能够满足 3 种株距下移栽作业的直立度要求。

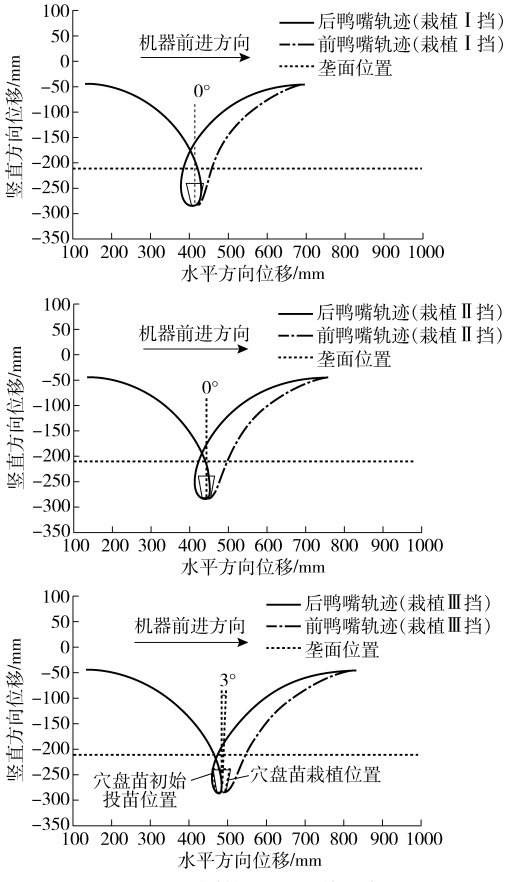


图 10 不同株距下的栽植轨迹

Fig. 10 Trajectory under different planting distances

5 试验结果与分析

试制样机实物及试验效果如图 11 所示,对栽植机构进行田间试验,以进一步验证其实际栽植情况。田间试验选择沙壤土进行,事先用拖拉机带动旋耕装置进行松耕,松耕后土壤平均碎土率不小于 60%,含水率不大于 20%,松耕深度不低于 200 mm。随后用起垄机进行开沟起垄,垄宽为 1 100 mm,垄高为 200 mm,沟宽为 300 mm,起垄后垄面平整,无杂草及碎石等障碍物;田垄 0 ~ 200 mm 土层平均含水率为 16.2%,平均紧实度为 12.7 N/cm^2。选用 72 孔穴盘培育的黄瓜苗为试验对象,苗龄为 35 d 左右,穴盘苗平均高度 126.42 mm,平均质量 20.58 g,苗钵含水率 60% 左右,育苗基质配比为草炭、蛭石、珍珠岩体积比为 3∶1∶1。



图 11 试验样机

Fig. 11 Prototypes for testing

整机田间试验时,自走式移栽机的行走轮在沟底行走,栽植机构在垄面上作业,控制栽植鸭嘴的栽植深度为 80 mm;根据实际垄长,每组移栽 2 盘共 144 株蔬菜苗。测试不同栽植频率时 3 个挡位株距下的栽植性能,统计田间数据时将前后 24 株蔬菜苗去除,测量中间 120 株区域的栽植状态,结果如表 2 所示。

试验时测量穴盘苗间的株距,计算其标准差和平均值

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}$$

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

得株距变异系数

$$C_X = \frac{S_X}{\overline{X}} \times 100\%$$

式中 $\overline{X}$——株距平均值,mm

S_X——株距标准差,mm

C_X——株距变异系数,%

试验时测量穴盘苗与地面夹角 A,将植株与地面夹角 $A \leqslant 30°$ 判定为倒伏,$30° < A \leqslant 70°$ 判定为合格,$A > 70°$ 视为优良[20]。

结果分析:

(1)栽植机构在 3 个挡位株距下作业时,蔬菜苗栽植直立度优良率均能达到 81% 以上,总的优良合格率达 94.8% 以上,能够较好地满足栽植要求;由表 2 中趋势可看出,直立度优良率随着栽植频率的增加而减小,主要原因是随着栽植频率增加,栽植时投苗时间过短,蔬菜苗与鸭嘴脱离时间过短有被鸭嘴往上带的趋势,从而影响栽植状态,导致栽植优

表 2　栽植效果统计

Tab. 2　Statistics of planting result

工作挡位	理论株距/mm	栽植频率/(株·min^{-1})	前进速度/(mm·s^{-1})	实测株距均值/mm	株距变异系数/%	有效测定株数	倒伏株数	合格株数	优良株数	合格率/%	优良率/%	总优良合格率/%
栽植Ⅰ挡	280	50	233	276.2	3.12	118	1	15	102	12.71	86.44	99.15
		55	257	277.1	2.76	120	1	17	102	14.17	85.00	99.17
		60	280	275.9	2.94	119	2	16	101	13.45	84.87	98.32
栽植Ⅱ挡	310	50	258	307.4	2.55	117	1	12	104	10.26	88.89	99.15
		55	284	308.7	2.23	119	2	14	103	11.76	86.55	98.31
		60	310	305.8	3.01	118	1	15	102	12.71	86.44	99.15
栽植Ⅲ挡	345	50	283	341.3	3.04	117	3	14	100	11.97	85.47	97.44
		55	312	343.6	2.77	118	5	16	97	13.56	82.20	95.76
		60	345	342.7	2.79	116	6	15	95	12.93	81.89	94.82

良率有所下降。

(2)每组株距变异系数均较小,且不同株距及栽植频率下变化差异不大,原因是栽植机构由底盘动力以一定传动比输入,栽植机构的转速随底盘前进速度的变化而相应改变,因此株距不受栽植频率的影响,具有较好的株距稳定性。

(3)表 2 中有效测定株数指实测有效株数,小于理论测定值的情况是因为存在一定的漏栽数,这是由于作业时机器震动较大,苗钵由导苗筒落入鸭嘴时状态不稳定导致苗钵落至鸭嘴外侧。

6　结论

(1)针对不同作物有不同株距栽植要求,以自制行星轮转臂式栽植机构为研究对象,构建栽植机构理论模型,分析建立了栽植机构前、后鸭嘴栽植点的运动轨迹数学模型,并基于该模型建立 Matlab 仿真分析辅助程序。

(2)基于 Matlab GUI 设计了计算机辅助优化设计人机交互界面,分析各主要参数对前后栽植点运动轨迹的影响规律,对该机构进行参数优化,由人机交互优化得出一组满足优化要求的机构参数组合:$L_1=83$ mm,$L_2=22$ mm,$L_3=38$ mm,$L_4=145$ mm,$R_d=120$ mm,$\alpha=82°$,$\beta=8°$,$C(105,-22)$,$D(165,-17)$。

(3)以 72 孔黄瓜穴盘苗为试验对象,直立度和株距变异系数为评价指标,对研制的移栽机栽植机构进行田间植苗试验。结果表明:在 3 个株距下作业时,蔬菜苗栽植直立度优良率均能达到 81% 以上,总优良合格率 94.8% 以上,能够较好满足直立度和多株距移栽要求,验证了理论建模和优化方法的正确性和可行性。

参　考　文　献

1　郭孟报,杨明金,刘斌,等. 我国蔬菜育苗产业现状及发展动态[J]. 农机化研究,2015,37(1):250 - 253.

2　周海燕,杨炳南,颜华,等. 旱作移栽机械产业发展现状及展望[J]. 农业工程,2015,5(1):12 - 13.
ZHOU Haiyan, YANG Bingnan, YAN Hua, et al. Status quo and development prospects of dry land transplanting machine industry [J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(1): 12 - 13. (in Chinese)

3　THOMAS E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4): 395 - 410.

4　TING K C, GIACOMELLI G A, LING P P. Workability and productivity of robotic plug transplanting workcell[J]. Vitro Cellular & Developmental Biology Plant, 1992, 28P(1):5 - 10.

5　金城谦,吴崇友,袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报,2008,39(9):196 - 198.

6　封俊,秦贵,宋卫堂,等. 移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报,2002,33(5):48 - 50.
FENG Jun, QIN Gui, SONG Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48 - 50. (in Chinese)

7　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 & Latin America, 2008, 39(2):47 - 51.

8　胡建平. 行星轮悬臂式植苗机构:201110342234.0[P]. 2011 - 11 - 03.

9　胡建平,张建兵,何俊艺,等. 移栽机行星轮转臂式栽植器运动分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):57 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131010&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.010.
HU Jianping, ZHANG Jianbing, HE Junyi, et al. Motion analysis and experiment for planting mechanism with planetary gears of transplanting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 57 - 61. (in Chinese)

10 金鑫, 姬江涛, 刘卫想,等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9):58 -67.
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 58 -67. (in Chinese)

11 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. 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)

12 陈建能,章鹏华,王英,等. 旋转式钵苗栽植机构多目标参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):46 -53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.008.
CHEN Jianneng, ZHANG Penghua, WANG Ying, et al. Multi-objective parameter optimization and experiment of rotary seedling planting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 46 -53. (in Chinese)

13 何亚凯,李树君,杨学军,等. 凸轮摆杆式栽植机构运动分析及性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):34 -41.
HE Yakai, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cam-swing link planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 34 -41. (in Chinese)

14 龚纯. 精通 Matlab 最优化计算[M]. 北京:电子工业出版社,2014.

15 张德丰,丁伟雄,雷晓平. Matlab 程序设计与综合应用[M]. 北京:清华大学出版社,2012.

16 余胜威,吴婷,罗建桥. Matlab GUI 设计入门与实战[M]. 北京:清华大学出版社,2016.

17 应孔月. 基于秧针轨迹的非圆齿轮旋转式分插机构的优化[D]. 杭州:浙江理工大学,2015.
YING Kongyue. Optimization of non-circular near rotary transplanting mechanism based on the trajectory of seeding needle[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University, 2015. (in Chinese)

18 SOKOS E N, ZAHRADNIK J. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(8): 967 -977.

19 叶秉良,刘安,俞高红,等. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):57 -62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.012.
YE Bingliang, LIU An, YU Gaohong, et al. Parameters optimization with human-computer interaction method and experiment of vegetable seedling pick-up mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 57 -62. (in Chinese)

20 JB/T 1029—2001 旱地栽植机械标准[S]. 2001.