

蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验

颜 华^{1,2} 刘 冲^{1,2} 李鹏斌^{2,3} 陈荣文⁴ 周海燕^{1,2} 庄腾飞¹

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083; 3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083; 4. 广西合浦县惠来宝机械制造有限公司, 合浦 536100)

摘要: 蔬菜移栽机在膜上移栽时,只能在较小的范围内调整株距,以保证较小栽植穴口,株距过大会造成栽植器前移撕膜,过小会导致栽植器后移带膜,形成较大穴口,影响幼苗后期生长,为此设计一套栽植静轨迹无级可调的往复式鸭嘴栽植装置。在分析栽植装置结构特点、工作过程及调整构件尺寸参数和安装参数以实现不同株距较小穴口栽植原理的基础上,提出了一套栽植静轨迹无级可调的栽植机构及其栽植方法。通过建立机构的运动学模型,开发了可视化辅助设计软件,分析了各参数对栽植特性的影响,使用逐步逼近法确定了一组满足要求的参数: $L_1 = 35\text{ mm}$ 、 $L_2 = 350\text{ mm}$ 、 $L_3 = 70\text{ mm}$ 、 $L_5 = 280\text{ mm}$ 、 $d_D = 358\text{ mm}$ 、 $\Phi_4 = 15^\circ$ 、 $x_B = 20\text{ mm}$,标定了株距每间隔 50 mm 对应的支点 B 纵坐标 y_B 的位置。根据机构参数组合设计了鸭嘴栽植装置并建立了三维模型,进行了运动学仿真,验证了鸭嘴栽植装置结构设计的可行性。开展了实验室样机试验,试验结果表明:栽植株距在 100 ~ 600 mm 之间,栽植合格率大于 90%,株距变异系数小于 6%,穴口长度均小于 100 mm,其中株距 100 mm 时平均穴口长度为 52.26 mm,栽植效果良好,可以满足不同株距小穴口的栽植要求。

关键词: 蔬菜移栽机;膜上移栽;鸭嘴栽植装置;栽植静轨迹;多杆机构

中图分类号: S223.94; TH112.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0071-11

OSID:



Design and Experiment of Duckbill Planting Device with Adjustable Static Trajectory for Planting Vegetable Transplanters

YAN Hua^{1,2} LIU Chong^{1,2} LI Pengbin^{2,3} CHEN Rongwen⁴ ZHOU Haiyan^{1,2} ZHUANG Tengfei¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

4. Guangxi Hepu County Huilaibao Machinery Manufacturing Co., Ltd., Hepu 536100, China)

Abstract: When transplanting on the film, the vegetable transplanter can only adjust the plant spacing in a small range to ensure a smaller planting hole opening, if the plant spacing is too large, it will cause the planters to move forward and tear the film, if the plant spacing is too small, it will cause the planters to move backward with the film, these will make the planting hole opening too large, and will affect the later growth of seedlings, for this reason a set of reciprocating duckbill planting device with steplessly adjustable planting static trajectory was designed. A set of planting mechanism with steplessly adjustable planting trajectory and its planting method were proposed based on the analysis of the structural characteristics of the planting device, the working process and the principle of adjusting the size parameters of the components and the installation parameters to realize the planting of smaller holes with different plant spacings. By establishing a veridical kinematic model of the mechanism, developing visual aided design software, analyzing the influence of each parameter on the planting characteristics, and using the stepwise approximation method to determine a set of parameters that met the requirements as follows: $L_1 = 35\text{ mm}$, $L_2 = 350\text{ mm}$, $L_3 = 70\text{ mm}$, $L_5 = 280\text{ mm}$, $d_D = 358\text{ mm}$, $\Phi_4 = 15^\circ$, $x_B = 20\text{ mm}$. The position of the longitudinal coordinate y_B of the pivot point B corresponding to every 50 mm interval between the plants was marked. The duckbill planting device was designed and modelled in 3D according to the combination of mechanism parameters, and kinematic simulations were carried out to verify the

收稿日期: 2022-11-15 修回日期: 2022-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)和国有资本金项目(GZ202001)

作者简介: 颜华(1973—),女,研究员,主要从事移栽机械装备研究,E-mail: 939980218@qq.com

feasibility of the duckbill planting device. Laboratory prototype tests were carried out and the results showed that the planting pass rate was greater than 90% at plant spacings between 100 mm and 600 mm, the coefficient of variation of plant spacing was less than 6% and the hole size was less than 100 mm, with an average hole size of 52.26 mm at plant spacing of 100 mm.

Key words: vegetable transplanters; transplanting on film; duckbill planting device; planting static tracks; multi-bar mechanism

0 引言

育苗移栽由于可以有效缩短作物生长周期、弥补季节和气候带来的不利影响,被广泛应用在蔬菜种植环节^[1]。目前,我国蔬菜种植以半自动移栽机为主^[2]。栽植装置作为半自动蔬菜移栽机最核心的工作部件,其结构和性能直接决定栽植质量。现有的蔬菜移栽机栽植装置主要有吊杯式、鸭嘴式、挠性圆盘式、钳夹式、链夹式等^[3-12]。鸭嘴式栽植装置采用打孔的方式进行栽植,栽植适应性强,既可用于露地移栽,也可进行膜上移栽;鸭嘴式栽植装置常采用多连杆机构或行星齿轮机构等,设计空间比较大,结构和尺寸参数的调整可以使栽植装置实现不同的栽植静轨迹,满足不同作物的栽植要求^[13-15]。

国内外学者针对不同种类的蔬菜种植特点设计了多种鸭嘴栽植装置。久保田 IKP-4 型蔬菜移栽机采用行星轮式鸭嘴栽植装置,栽植株距为 400 ~ 950 mm,但随着实际栽植株距增大,膜上栽植穴口尺寸会增大。井关 PVHR2 型移栽机采用双曲柄多连杆鸭嘴栽植装置,栽植株距为 300 ~ 600 mm,栽植株距为 300 mm 时栽植穴口尺寸较小。李鹏斌等^[16]在井关 PVHR2 型移栽机鸭嘴栽植装置基础上优化杆件尺寸,优化后栽植株距为 150 mm 时地膜连接长度由 58.9 mm 增至 83.7 mm。廖庆喜等^[17]提出了一种针对油菜的双五杆鸭嘴栽植装置,栽植株距为 300 mm 时入土轨迹与出土轨迹具有较高垂直度和重合度,接近零速栽植。胡飞等^[18]提出一种复合曲柄摇杆式鸭嘴栽植装置,该装置在设定株距为 260 mm 和 300 mm 时栽植合格率均在 90% 以上,株距变异系数最大为 6.35%,穴口平均长度为 10.44 cm。胡建平^[19-20]提出了一款行星轮转臂式鸭嘴栽植装置,在不改变栽植静轨迹的情况下,使用 Matlab 优化得到一组满足 280、310、345 mm 3 种株距的结构参数。俞高红等^[21]提出了针对大株距的行星轮系鸭嘴栽植装置,栽植装置采用两个鸭嘴栽植器提高栽植效率,栽植株距为 450 mm 左右时,栽植效果最佳。

一套鸭嘴栽植装置的栽植静轨迹多为固定不变的,膜上移栽时,只有在栽植装置的设计株距附近才能满足小穴口栽植要求。栽植株距过大会使栽植器

前行撕膜,过小会导致栽植器后移带膜,株距的大范围调整增加了膜上移栽过程中的扰动,在地膜上形成大的穴口,株距为 100 mm 时穴口过大甚至会产生贯通现象,使地膜失去保温、保墒的功效^[22-23]。这就使一台移栽机只能满足一定株距范围内蔬菜的种植。而蔬菜种类繁多,不同作物甚至同一类作物在不同地区的栽植株距要求不同,当目标栽植株距与设定的栽植株距有较大偏差时,会影响栽植质量^[24]。本文通过开展栽植机构研究,设计可以满足不同株距较小栽植穴口要求的鸭嘴栽植装置和调整栽植静轨迹的方法,以保证不同株距时的栽植质量。

1 栽植机构设计

1.1 设计要求

蔬菜移栽机栽植静轨迹无级可调的鸭嘴栽植装置的主要功能是在不同栽植株距时均能顺利接住钵苗,并将其栽植入土。由于现有移栽机在调整实际栽植株距时主要采用调整移栽机行驶速度与栽植频率比值的方法,且鸭嘴式栽植装置的结构和参数在完成设计后就不能改变,因此会加大鸭嘴栽植时水平分速度与移栽机行驶速度的偏差。图 1 为一套鸭嘴栽植装置在栽植频率为 60 株/(行·min) 时只改变移栽机行驶速度的栽植轨迹变化情况,从图中可以看出,该鸭嘴在目标栽植株距为 300 mm 时,垄面线以下轨迹较为垂直,扰动较小,轨迹穴口尺寸最小,但实际株距为 100 mm 和 500 mm 时,栽植轨迹的穴口尺寸均大于 50 mm。这就要求栽植株距改变较大时,需要改变行驶速度和栽植频率比值与栽植静轨迹相结合。

栽植轨迹设计要求:为了在不同栽植株距的情

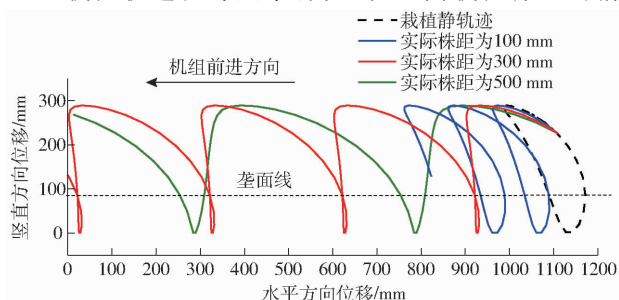


图 1 栽植轨迹随行驶速度变化示意图

Fig. 1 Schematic of planting trajectory variation with driving speed

况下,都能保证幼苗与地面尽可能接近 90° ,栽植穴口尺寸尽可能小;要求栽植静轨迹可调以保证不同株距下形成较小栽植穴口;且调整前后栽植器在进行入土栽植和完成栽植离开时的运动轨迹应尽量重合并垂直于地面,因此,栽植轨迹最下端应有不少于 100 mm 长度且前后偏移量不超过 20 mm,尽可能实现“零速”栽苗;不同栽植株距时栽植轨迹最高点位置尽量保持不变以保证接苗位置相同,且竖直方向速度尽可能小,以保证接苗稳定性。

栽植器状态要求:在整个栽植过程中,栽植器应尽可能保持竖直状态。鸭嘴栽植器尽量在入土最深位置迅速打开,栽植后,鸭嘴应在完全高于栽植钵苗后闭合,防止夹苗,造成缺苗露苗,防止向前带苗,造成前倾。鸭嘴开度能根据不同蔬菜品种的幼苗尺寸要求进行调整。

1.2 机构选型与工作原理

根据鸭嘴栽植机构的设计要求,鸭嘴在平面按照既定的栽植轨迹运动以实现“零速”栽苗,鸭嘴实现“接苗-送苗-栽植-回程”的循环运动可以被分解为鸭嘴在水平方向和竖直方向的运动,栽植的“零速”投苗实质上就是鸭嘴从入土到完成栽植离开土面的过程中,鸭嘴的水平分速度与移栽机的行驶速度大小相等、方向相反。

为保证鸭嘴在栽植过程中始终保持竖直,并且满足固定幅度的竖直方向的运动,鸭嘴往往会安装在平行四边形机构的一端,并可以在工作时随着平行四边形机构的摆动而进行竖直方向的运动,且运动过程中鸭嘴姿态不发生变化。因此,本机构中也选用平行四边形机构与鸭嘴直接相连。

鸭嘴栽植机构往往还需要一个机构带动平行四边形机构上下运动实现竖直方向的运动,需要另一个机构驱动平行四边形机构实现水平方向的运动,两个机构相辅相成,共同驱动平行四边形机构带动栽植器完成栽植。例如,何亚凯等^[25]设计的凸轮摆杆栽植机构采用曲柄连杆机构驱动栽植器实现竖直方向运动,采用凸轮机构驱动栽植器实现水平方向运动。

栽植株距调整后需要使栽植静轨迹进行相应调整,即部分结构参数可以进行快速调整,以满足栽植轨迹小穴口的要求。

改变栽植静轨迹的方法有:改变构件的尺寸参数;改变安装点的位置参数。目的是改变平行四边形机构在水平方向的相对运动速度,使其与行驶速度相同或相近。

通过以上分析,本文选用曲柄导杆机构驱动平行四边形机构实现栽植功能。如图 2 所示,曲柄导

杆机构由曲柄 OA 、导杆 AC 和支点 B 构成,旋转中心点 O 和支点 B 均固定在机架上。导杆 AC 和支点 B 连接处有两个运动副,分别是转动副和滑动副,一方面导杆 AC 可以沿着支点 B 上下滑动,一方面导杆 AC 还可以以支点 B 为圆心旋转。

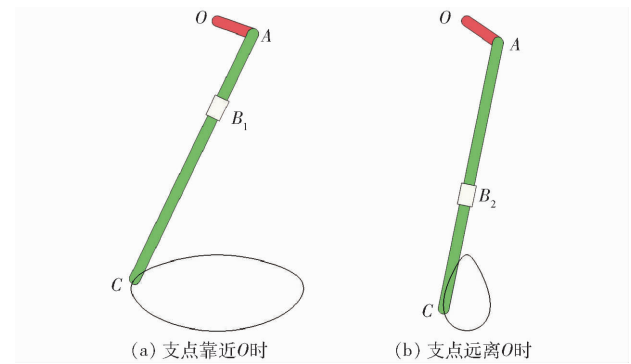


图 2 曲柄导杆机构运动示意图
Fig. 2 Schematic of kinematic of crank-rod mechanism

杆导杆机构的自由度为 1。因此,曲柄导杆机构在运动时,只需要在点 O 设置一个动力源,驱动曲柄 OA 绕点 O 旋转,导杆端点 C 处便会形成唯一的运动轨迹。

在整个运动周期中,曲柄 OA 与导杆 AC 垂直瞬间,导杆 AC 相对于支点 B 只有平移,曲柄 OA 与导杆 AC 共线瞬间,导杆相对于支点 B 只有转动,且此时导杆 AC 对于支点 B 的动力臂为 AB 、阻力臂为 BC 。

由以上分析发现,当曲柄 OA 的长度和旋转角速度不变时,改变支点 B 的位置,动力臂和阻力臂的长度就会改变,此时导杆 AC 的 C 端的水平运动位移和速度均会随之改变。如图 2 所示,当支点处于靠近 O 的 B_1 位置时,端点 C 的运动轨迹为“扁豆型”,此时端点 C 的水平位移较大,水平速度也较大,适合驱动平行四杆机构进行大株距的栽植;当支点处于远离 O 的 B_2 位置时,端点 C 的运动轨迹为“鸭蛋型”,此时端点 C 的水平位移较小,水平速度也较小,适合驱动平行四杆机构进行小株距的栽植,并且端点 C 在以上两个位置的竖直方向位移和接苗位置均相同,便于布置分苗装置的位置。因此,该机构可以通过调节固定支点 B 的位置,驱动平行四杆机构实现无级调整栽植静轨迹,以满足不同株距栽植穴口较小的要求。

由于曲柄导杆机构的端点 C 的自由度为零,所以平行四边形机构的固定端需要被给予水平方向的自由度,综上最终确定的鸭嘴栽植机构结构简图如图 3 所示。鸭嘴栽植机构的自由度为 1。

鸭嘴栽植机构具有唯一的自由度,即在每个支点 B 的位置,曲柄 OA 可以驱动鸭嘴形成唯一的运

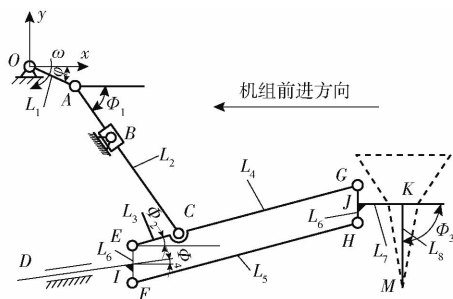


图3 鸭嘴栽植机构结构简图

Fig. 3 Structure diagram of duckbill planting mechanism

动轨迹,满足设计要求。

其中,点 O 为固定在机架上的动力输入点,点 B 为可以调节位置的支点,点 D 为杆 DI 的端点,杆 DI 相对于机架滑动,点 I 和点 J 为焊接点,点 A 、 C 、 E 、 F 、 G 、 H 为栽植机构铰接点,点 K 为栽植器上一点,点 M 为栽植点。

2 数学模型构建

2.1 运动学模型建立

为了便于分析,选择曲柄 OA 旋转中心点 O 为坐标原点建立笛卡尔平面直角坐标系,取向左为机组前进方向,速度为 v ,为了实现“零速栽植”,需要保证栽植器入土作业时,在水平方向的分速度与机组前进方向相反,因此规定 OA 杆顺时针旋转。以机组前进方向为 x 轴负方向,竖直向上为 y 轴正方向,选取 x 轴正方向为杆件角位移的基准,逆时针方向为正。

令时间 $t=0$ 时,曲柄 OA 与 x 轴正方向重合 φ ,为 t 时杆 OA 旋转角度,则

$$\varphi = -\omega t \quad (1)$$

式中 ω ——曲柄 OA 的角速度, rad/s

点 A 位移方程为

$$\begin{cases} x_A = L_1 \cos \varphi \\ y_A = L_1 \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_1 ——曲柄 OA 长度, mm

设点 B 坐标为 (x_B, y_B) , 有

$$\tan \Phi_1 = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (3)$$

式中 Φ_1 ——杆 AC 与 x 轴正方向夹角, $(^\circ)$

联立式(1)~(3)得

$$\Phi_1 = \arctan \frac{y_B + L_1 \sin(\omega t)}{x_B - L_1 \cos(\omega t)} \quad (4)$$

点 C 位移方程为

$$\begin{cases} x_C = x_A + L_2 \cos \Phi_1 \\ y_C = y_A + L_2 \sin \Phi_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 L_2 ——导杆 AC 长度, mm

设点 O 到杆 DI 的距离为 d_D , 杆 DI 与 x 轴正方向夹角为 Φ_4 , 因此可以求得杆 DI 延长线上点 I 满足关系式

$$y_I = x_I \tan \Phi_4 - \frac{d_D}{\cos \Phi_4} \quad (6)$$

由三角函数关系得

$$\sin \Phi_2 = \frac{y_C - y_E}{L_3} \quad (7)$$

$$\cos \Phi_2 = \frac{x_C - x_E}{L_3} \quad (8)$$

式中 Φ_2 ——杆 EG 与 x 轴正方向夹角, $(^\circ)$

L_3 ——摆杆 EC 长度, mm

点 E 坐标为

$$\begin{cases} x_E = x_I \\ y_E = y_I + \frac{L_6}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 L_6 ——连杆 EF 、 GH 长度, mm

联立式(1)、(2)、(5)~(8)得

$$\Phi_2 = \Phi_4 - \arcsin \frac{\xi \sin \Phi_4 + \left(\frac{L_6}{2} - \frac{d_D}{\cos \Phi_4} + \zeta \right) \cos \Phi_4}{L_3} \quad (10)$$

其中 $\xi = L_1 \cos(\omega t) + L_2 \cos \Phi_1$ (11)

$\zeta = L_1 \sin(\omega t) - L_2 \sin \Phi_1$ (12)

根据几何关系得点 G 位移方程为

$$\begin{cases} x_G = x_C + L_4 \cos \Phi_2 \\ y_G = y_C + L_4 \sin \Phi_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中 L_4 ——摆杆 CG 长度, mm

由于 $EFGH$ 为平行四杆机构, 且点 J 为 GH 中点, 因此可得点 J 、 K 、 M 位移方程为

$$\begin{cases} x_J = x_G \\ y_J = y_G - \frac{L_6}{2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_K = x_J + L_7 \\ y_K = y_J \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_M = x_K + L_8 \cos \Phi_3 \\ y_M = y_K + L_8 \sin \Phi_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中 L_7 —— JK 长度, mm

L_8 ——鸭嘴 KM 长度, mm

联立式(1)、(2)、(5)、(9)、(13)~(16)可得机组静止时点 M 位移方程为

$$\begin{cases} x_M = \xi + L_4 \cos \Phi_2 + L_7 + L_8 \cos \Phi_3 \\ y_M = -\zeta + L_4 \sin \Phi_2 - \frac{L_6}{2} + L_8 \sin \Phi_3 \end{cases} \quad (17)$$

设定机组行驶速度为 v 时,鸭嘴下端栽植点 M 位移方程为

$$\begin{cases} x_M = \xi + L_4 \cos \Phi_2 + L_7 + L_8 \cos \Phi_3 - vt \\ y_M = -\zeta + L_4 \sin \Phi_2 - \frac{L_6}{2} + L_8 \sin \Phi_3 \end{cases} \quad (18)$$

式(18)等号两边对时间 t 求导,得机组行驶速度为 v 时鸭嘴下端栽植点 M 速度方程为

$$\begin{cases} v_{x_M} = -L_1 \omega \sin(\omega t) + \rho + v \\ v_{y_M} = -L_1 \omega \cos(\omega t) + \sigma + v \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\rho = \frac{d\Phi_1}{dt} L_2 \sin \Phi_1 + \frac{d\Phi_2}{dt} L_4 \sin \Phi_2 \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{d\Phi_1}{dt} L_2 \cos \Phi_1 + \frac{d\Phi_2}{dt} L_4 \cos \Phi_2 \quad (21)$$

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{\omega L_1 (\tau - L_1)}{x_B^2 + y_B^2 - 2L_1 \tau + L_1^2} \quad (22)$$

$$\tau = x_B \cos(\omega t) - y_B \sin(\omega t) \quad (23)$$

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = \frac{\psi}{\sqrt{L_3^2 - \zeta^2}} \quad (24)$$

$$\psi = - \left(-L_1 \omega \sin(\omega t) - \frac{d\Phi_1}{dt} L_2 \sin \Phi_1 \right) \sin \Phi_4 - \left(L_1 \omega \cos(\omega t) - \frac{d\Phi_1}{dt} L_2 \cos \Phi_1 \right) \cos \Phi_4 \quad (25)$$

$$\zeta = (L_1 \cos(\omega t) + L_2 \cos \Phi_1) \sin \Phi_4 + \left(\frac{L_6}{2} - \frac{d_D}{\cos \Phi_4} + L_1 \sin(\omega t) - L_2 \sin \Phi_1 \right) \cos \Phi_4 \quad (26)$$

2.2 栽植机构可视化辅助设计软件开发

为了便于对鸭嘴栽植机构进行优化设计,根据建立的运动学模型,基于 NI LabVIEW 2017 开发了鸭嘴式栽植机构可视化辅助设计软件,软件界面如图4所示,界面共包括4个区域,分别为机组参数设置区域、运行时间设置区域、机构参数设置区域、图像显示区域。通过输入不同的机组运动参数和机构

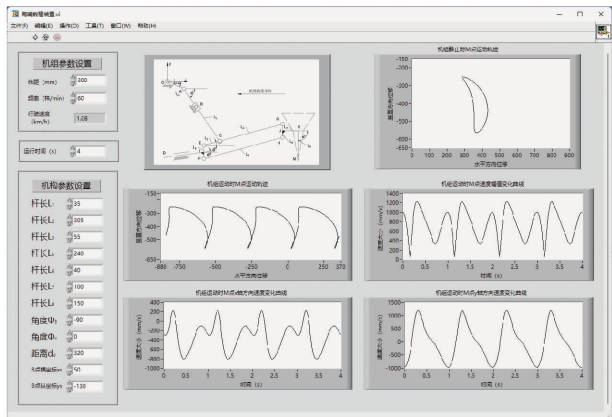


图4 栽植机构可视化辅助设计软件界面

Fig.4 Visual aid design software interface for planting mechanism

结构参数,可以得到栽植点 M 对应的栽植轨迹和水平方向、竖直方向分速度。

3 参数分析与优化

3.1 约束条件定义

为了便于探索机构参数对栽植机构运动特性的影响,缩小参数优化范围,首先根据机构自身特点和设计要求对机构各参数提出以下约束:

首先 L_7 和 L_8 为鸭嘴的结构尺寸和安装尺寸, L_6 为平行四边形固定为竖直方向的杆件长度,由于这3个参数均不影响栽植轨迹,结合常用鸭嘴尺寸和杆件尺寸,预选 $L_6 = 60 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 110 \text{ mm}$ 、 $L_8 = 150 \text{ mm}$ 。

由于支点 B 是可以调节的,且杆 AC 与支点 B 存在滑动副,因此,杆 AC 长度除了要长于2倍 L_1 外,还需要预留点 B 运动范围 H_B ,点 A 、 B 、 C 的安装尺寸 L_a ,安装防尘设备的尺寸 L_f ,即

$$L_2 \geq 2L_1 + L_a + L_f + H_B \quad (27)$$

依据杆件存在条件

$$\begin{cases} L_2 - L_1 + \frac{L_6}{2} \leq d_D \leq L_2 + L_1 + \frac{L_6}{2} \\ L_5 = L_3 + L_4 \\ L_3 > L_1 \end{cases} \quad (28)$$

为了防止鸭嘴栽后带苗和机构振动过大,栽植轨迹的高度应在一定范围内,即

$$\begin{cases} 250 \text{ mm} \leq y_M \leq 300 \text{ mm} \\ 3L_3 \leq L_5 \leq 6L_3 \end{cases} \quad (29)$$

3.2 主要参数对栽植机构运动特性的影响

分析鸭嘴栽植机构的主要尺寸参数对运动学特性的影响可为参数优化提供依据。设置机组前进速度为 1.08 km/h ,频率为 $60 \text{ 株}/(\text{行} \cdot \text{min})$,即设计栽植株距为 300 mm 。根据栽植机构设计要求和约束条件,选取初始值: $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 350 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 60 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 300 \text{ mm}$ 、 $x_B = 15 \text{ mm}$ 、 $y_B = -150 \text{ mm}$ 、 $d_D = 350 \text{ mm}$ 、 $\Phi_4 = 0^\circ$ 。基于开发的可视化辅助设计软件,使用控制变量法进行单因素分析,对每一个参数选择3个等差数,可以得到相应的栽植轨迹和点 M 竖直方向分速度-时间曲线,如图5、6所示。

3.2.1 各参数对栽植轨迹的影响

从图5中可以看出,随着 L_1 的增大栽植轨迹被上下拉长,栽植器上下运动幅度变大,栽植入土部分偏移量增大,但是栽植时曲线重合部分变长,栽植深度变大。当 $L_1 = 25 \text{ mm}$ 时轨迹没有重合, L_1 的变化对栽苗的直立度几乎没有影响。

随着 L_2 的增大,栽植轨迹整体向下移动,且栽植轨迹后倾增大。当 $L_2 = 370 \text{ mm}$ 时,鸭嘴竖直方向

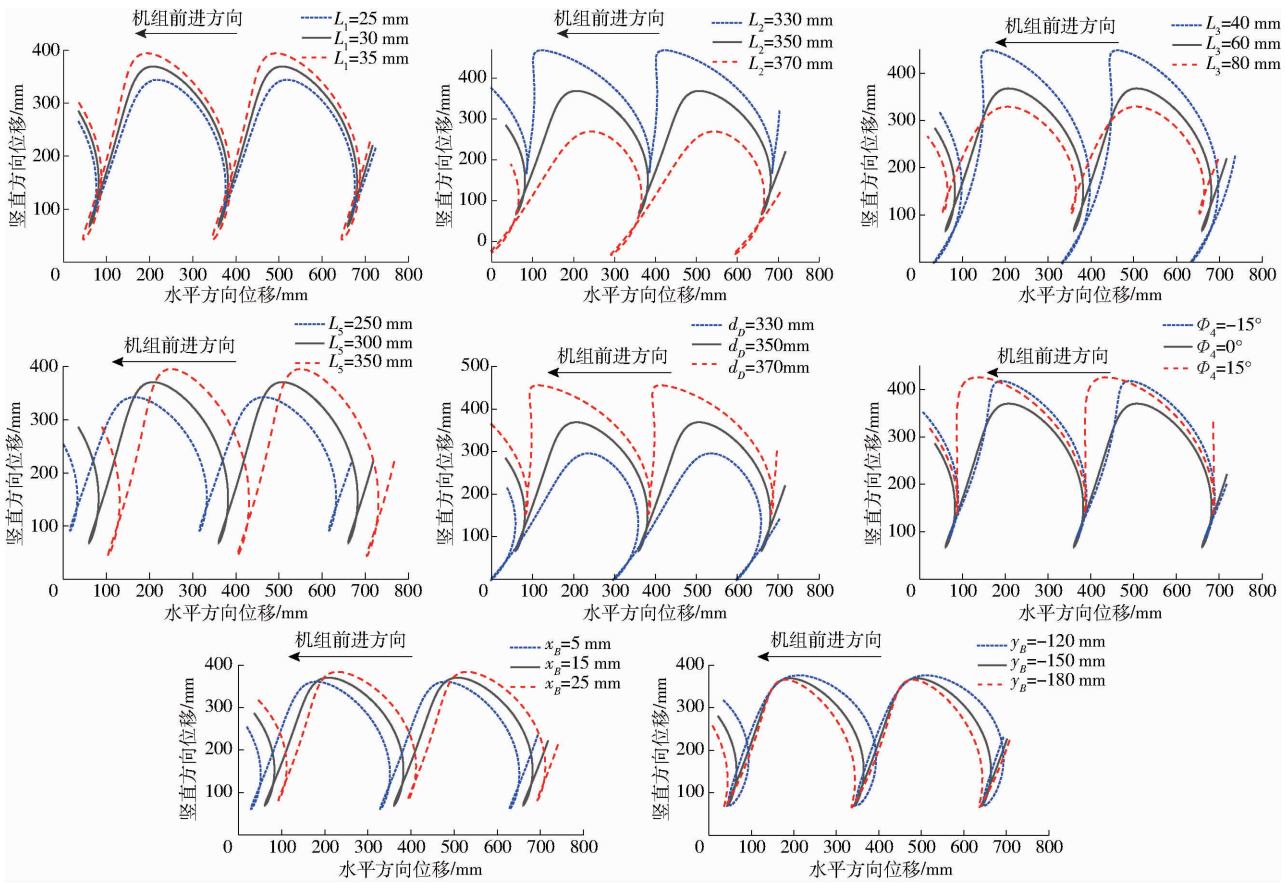


图 5 栽植轨迹变化曲线
Fig. 5 Variation curves of planting trajectory

栽植幅度为 295 mm,栽植深度为 95.5 mm,满足要求,但栽植角度为 50.6°,不能保证栽植直立,且可能会产生撕膜;当 $L_2 = 330$ mm 时,鸭嘴竖直方向栽植幅度为 300 mm,栽植角度为 83.5°,但栽植深度仅为 44 mm。

随着 L_3 的增大,栽植轨迹竖直方向的幅度迅速减小,栽植轨迹被“压缩”,栽植深度减小,栽植直立度变化不明显。当 $L_3 = 40$ mm 时栽植幅度为 447 mm,送苗过程曲线内凹;当 $L_3 = 80$ mm 时栽植幅度为 225 mm,送苗过程曲线为外凸。

随着 L_5 的增大,栽植轨迹竖直方向的幅度增大,栽植轨迹被“拉长”,栽植深度增大,栽植直立度变化显著,栽植轨迹初始相位向后移动,总之随着 L_5 的增大,栽植轨迹被明显放大。

随着 d_b 的增加,栽植轨迹整体上移,栽植直立度显著提高,栽植幅度和栽植深度变化不明显。

当 Φ_4 由 0°改为 -15°时,栽植轨迹送苗段略有内凹,轨迹最低处向上移动 8 mm,轨迹最高处向上移动 49 mm,栽植幅度增大 41 mm,直立度没有发生变化。当 Φ_4 由 0°改为 15°时,栽植轨迹送苗段为直线,且竖直向下,直立度为 90°,栽植最低点向上移动 72 mm,栽植最高点向上移动 56 mm,栽植幅度减少 16 mm。

随着 x_B 的增加,栽植轨迹整体略向右上方移动,栽植穴口尺寸略有减小, x_B 对栽植轨迹形状影响不显著。

随着 y_B 增加,栽植轨迹的幅度、位置和栽植直立度变化均不显著,但对栽植穴口尺寸影响较大。当 y_B 由 -150 mm 改为 -120 mm 时,栽植轨迹曲线由于重合较多而增大了穴口尺寸 s ,可以减小栽植株距以缩小穴口尺寸;当 y_B 由 -150 mm 改为 -180 mm 时,栽植轨迹曲线由于入土段偏差较大而增大了穴口尺寸,可以增大栽植株距以缩小穴口尺寸。

3.2.2 各参数对点 M 竖直方向分速度的影响

速度方向取向上为正,当栽植轨迹处于最高和最低点(接苗点和栽植点)时点 M 竖直方向分速度为零,加速度最大。

从图 6 中可以看出,点 M 竖直方向分速度随着 L_1 和 L_5 的增大而增大,随着 L_3 和 Φ_4 的增大而减小,且随着 L_1 和 L_5 的增大在回程过程中速度的增大更快,送苗过程中速度减小更快,鸭嘴在栽植点提升速度增大更快,提升更迅速,鸭嘴在接苗点向下栽植速度增加也更快,栽植也更加迅速, L_3 与之相反,随着 L_3 的减小,点 M 竖直方向分速度增大效果更为显著,随着 Φ_4 的增大,鸭嘴在栽植点的速度变化不显著,在接苗点的速度变化略有减小,接苗更加平缓,

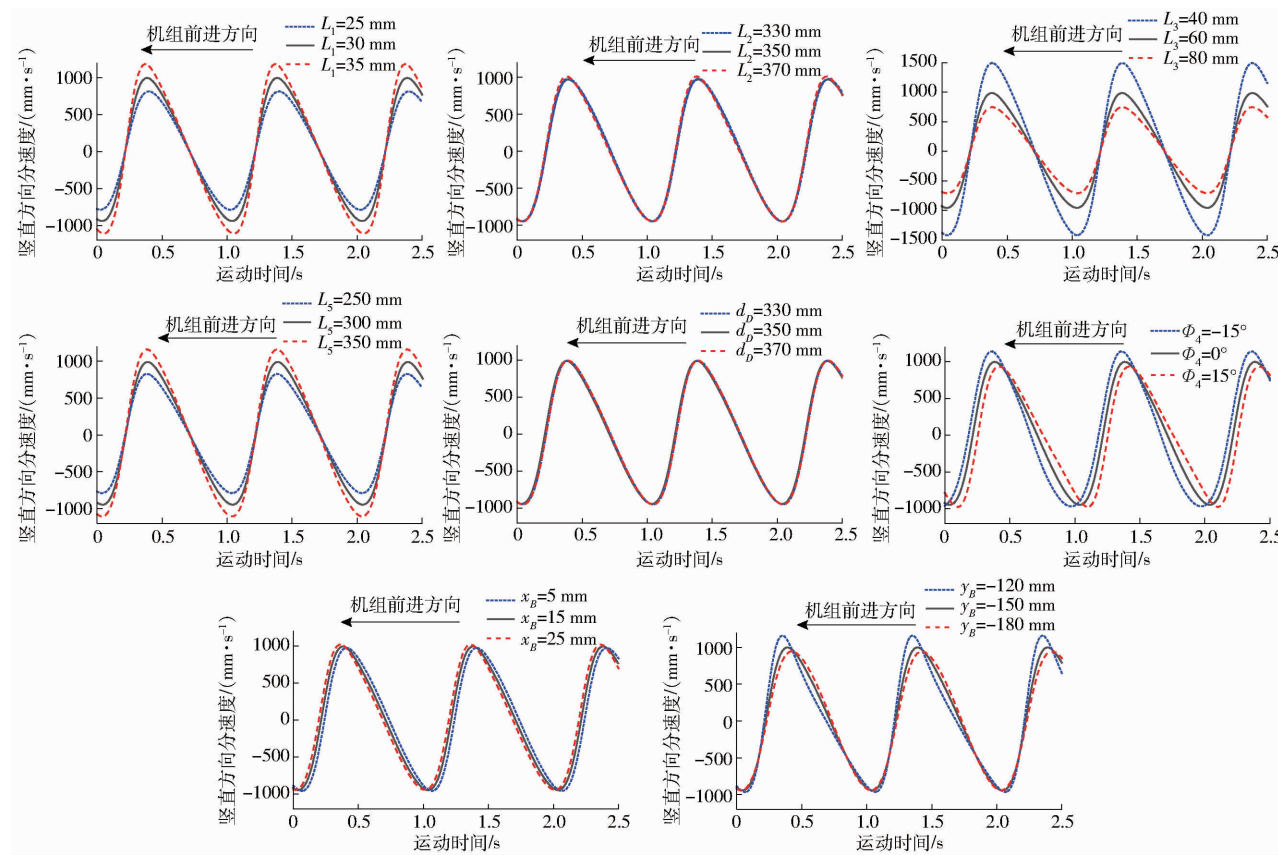


图 6 点 M 竖直方向分速度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of vertical partial velocity of M

速度的相位略有延迟。随着 L_2 和 d_d 的变化,点 M 竖直方向分速度波动较小,对栽植点和接苗点的速度变化影响也较小。随着 x_B 的增大,点 M 竖直方向分速度的相位略微有所提前。随着 y_B 的增大回程速度先增大后减小,对送苗速度影响较小。

3.3 参数优化

栽植机构参数优化是多参数、多目标的复杂优化问题,每个参数的改变均会影响机构栽植性能,研究中通过使用逐次逼近的方法找到最满足当下设计要求的一组解。

通过分析各参数对栽植轨迹的影响发现, x_B 的变化对栽植轨迹的形状影响不显著。为了便于进行结构设计,选用调整支点 B 在竖直方向的移动作为改变设计株距的方法。

综上所述,栽植装置的参数优化过程为:
(1) 设置栽植频率为 60 株/(行·min),机组行驶速度为 300 mm/s,即设计栽植株距为 300 mm 时,在初始值的基础上,优化得到满足设计要求的一组参数,并确定此时的 y_B 值为株距 300 mm 时的参考值。

(2) 根据步骤(1)中优化的参数值,将机组行驶速度从 100 mm/s 以等差 50 mm/s 依次增加至 600 mm/s,每个行驶速度对应相应的设计株距,在每个设计株距找到对应较优的 y_B 值。

(3) 由于在调整 y_B 值后,栽植点 M 竖直方向的速度和轨迹均会产生变化,且此时栽植性能较优的一组参数值必然与步骤(1)中所选的值有所不同,所以需要依次选择不同的 y_B 值,观察栽植轨迹和栽植速度曲线,基于各参数对机构栽植轨迹和栽植速度曲线的影响规律,进一步微小调整机构各参数值,使在株距 100 ~ 600 mm 之间均满足设计要求,进一步优化各株距的栽植性能。

优化过程中应综合考虑栽植轨迹、接苗和栽苗过程中栽植速度的影响。栽植轨迹在栽植时直立度应在 80° ~ 100° 之间,栽植时的曲线应尽量重合,重合段长度应大于 100 mm;整体栽植速度应尽量小,在接苗时速度变化尽量缓慢,在栽植时速度变化尽量快。

优化后获得一组参数组合为: $L_1 = 35$ mm、 $L_2 = 350$ mm、 $L_3 = 70$ mm、 $L_5 = 280$ mm、 $d_d = 358$ mm、 $\Phi_4 = 15^\circ$ 、 $x_B = 20$ mm。各栽植株距对应的 y_B 如表 2 所

表 2 栽植株距调整对照

Tab. 2 Comparison of planting spacing adjustment

株距/mm	100	150	200	250	300	350
y_B /mm	-220	-220	-185	-170	-157	-147
株距/mm	400	450	500	550	600	
y_B /mm	-137	-130	-124	-118	-113	

示,由于株距为 100 mm 的轨迹最优时 $y_B = -260$ mm,超出结构允许的 安装尺寸,且 $y_B = -220$ mm 时 穴口尺寸较 $y_B = -260$ mm 时仅增大 6 mm,因此

株距 100 mm 时 y_B 仍采用 -220 mm。从图 7 中可以看出,株距 100 ~ 600 mm,栽植轨迹均符合设计 要求。

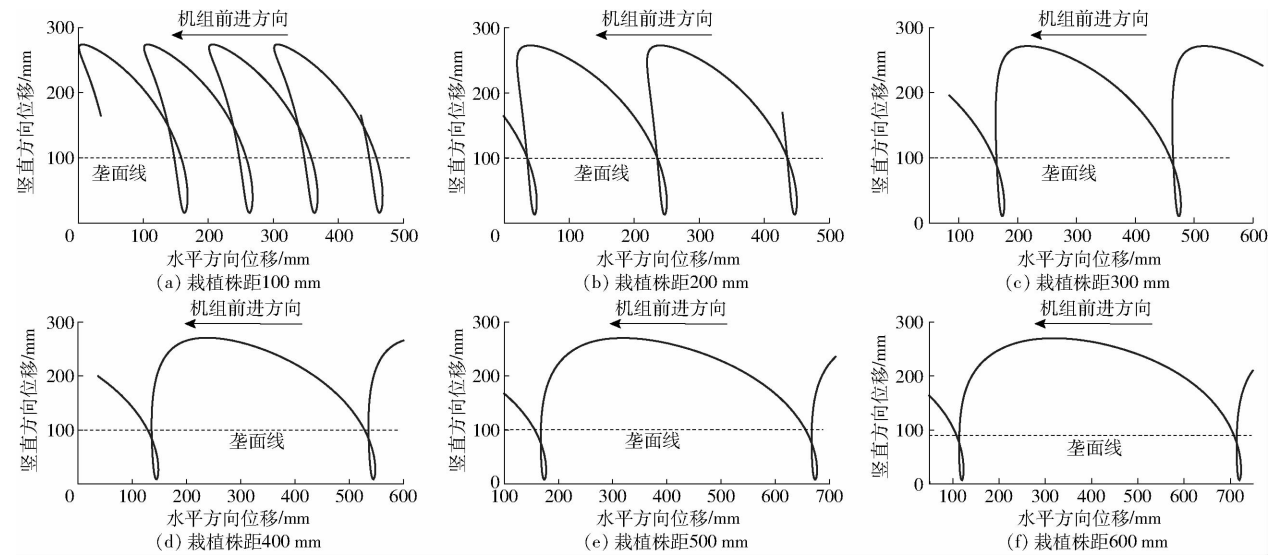


图 7 优化后不同栽植株距的栽植轨迹

Fig. 7 Planting trajectories with different planting spacings after optimization

4 结构设计及仿真

4.1 鸭嘴开合机构设计

鸭嘴开合控制采用多连杆式鸭嘴栽植装置常用的 凸轮摆杆拉线机构^[26]。该机构工作时主要使用 凸轮驱动摆杆摆动进而拉动拉线控制鸭嘴的开合。 由于曲柄 OA 为匀速转动一周,栽植器的 接苗位置和栽植位置对应的曲柄 OA 位置固定,且为了便于 进行结构设计,将曲柄 OA 设计为凸轮结构。

如图 8 所示,凸轮中的点 A 即为杆 OA 与杆 AC 铰接点,由于不同株距时,支点 B 的 竖直位置不同,所以鸭嘴处于最低点时,杆 OA 与 竖直方向的夹角不同,当 $y_B = -220$ mm 时,夹角 为 5.19° ;当 $y_B = -113$ mm 时,夹角为 10.04° 。因此选取杆 OA 与 竖直方向的夹角为 7° 时为鸭嘴打开位置,结合设计 要求确定凸轮轮廓如图 8 所示。

4.2 栽植装置结构设计与仿真

基于优化后的参数,对各构件进行结构配置,使用 SolidWorks 软件建立往复式鸭嘴栽植装置的 三维模型,如图 9 所示。

其中支点 B 竖直方向的调整采用丝杠滑块装 置,在滑块上安装有指针,在指针对应位置粘贴有推 荐标尺,推荐标尺的刻度上标注有株距,即当支点 B 指向对应株距的刻度位置时,栽植装置在此株距栽 植时栽植穴口尺寸较小。在每次需要调整栽植株距 时,只需旋转丝杠使滑块上的指针指在对应位置即 可。两组栽植机构对称分布、交替栽植,以减小机器

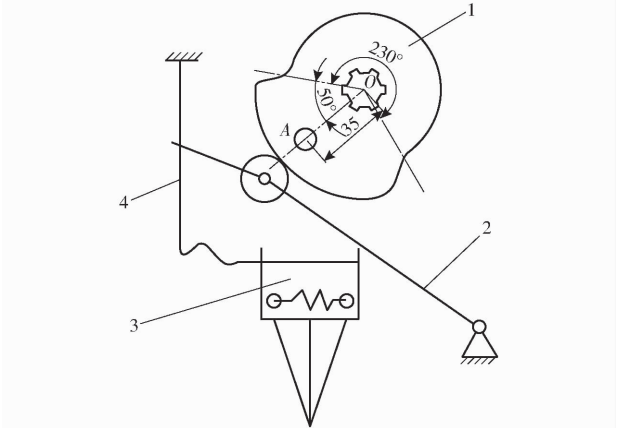


图 8 开合机构简图

Fig. 8 Sketch of opening and closing mechanism

1. 凸轮 2. 摆杆 3. 栽植器 4. 拉线

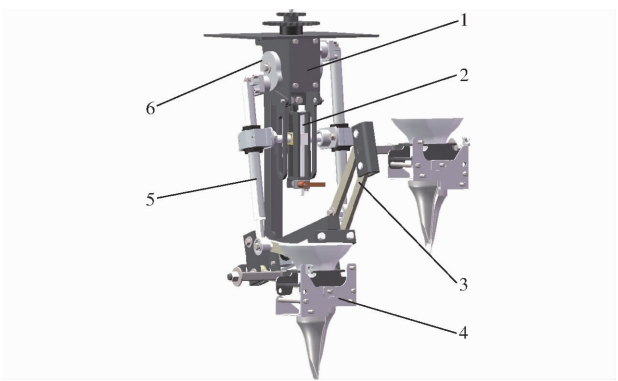


图 9 往复式鸭嘴栽植装置结构图

Fig. 9 Structure of reciprocating duckbill planting device

1. 主变速箱 2. 丝杠滑块机构 3. 平行四边形机构 4. 栽植器
5. 曲柄导杆机构 6. 鸭嘴开合装置

振动,提高土壤利用率。

为验证机构设计的可行性,使用 SolidWorks Motion 软件进行仿真分析,得到鸭嘴栽植装置栽植

器的栽植轨迹,如图 10 所示,仿真轨迹与设计轨迹基本一致。

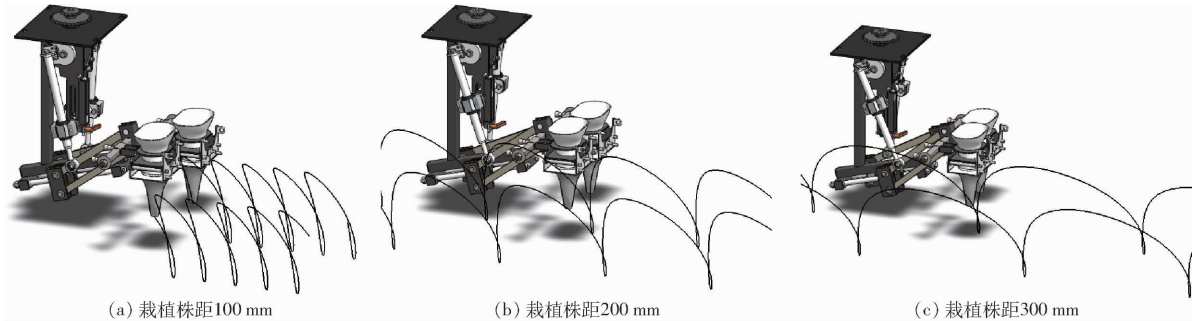


图 10 往复式鸭嘴栽植装置仿真轨迹

Fig. 10 Simulation trajectories of reciprocating duckbill planting device

5 样机试验

为验证鸭嘴栽植装置的作业效果,在农业生产机械装备国家工程实验室进行了样机试验,如图 11 所示。试验平台选用便携式土槽,土槽长 12.6 m,宽 0.64 m,深 150 mm,栽植装置搭载在自走电动底盘上。试验采用北方沙壤土,试验前进行浇水、翻土、碎土和起垄覆膜,土壤含水率不大于 20%,土面平整、无大土块。试验选用自制的仿真苗,苗高约 10 cm。试验时,以设计株距作为试验因素,设计株距选取 100 ~ 600 mm 之间,每间隔 100 mm 选一个水平,共 6 个水平,栽植频率选取 40 株/(min·行),机组行驶速度与设计株距、栽植频率相匹配,栽植深度选 80 mm。



图 11 台架试验装置

Fig. 11 Laboratory test environment

本次试验采用倒伏率、埋苗率和露苗率评价栽植质量,从株距变异系数和穴口平均长度评价栽植精度。试验数据统计和分析方法参照行业标准 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》。

从表 3 可以看出,通用型往复式鸭嘴栽植装置在 100 ~ 600 mm 6 个栽植株距水平上作业时,倒伏率、埋苗率和露苗率均小于 5%,栽植合格率均大于 90%,平均合格率达到 97.48%,栽植性能稳定,栽植质量优良,不同株距栽植效果如图 12 所示。

表 3 栽植试验结果

Tab. 3 Planting test results

设计株距/mm	倒伏率/%	埋苗率/%	露苗率/%	栽植合格率/%	株距变异系数/%	穴口平均长度/mm
100	1.79	0	1.79	96.43	4.64	52.26
200	0	0	0	100	2.08	56.31
300	2.86	0	0	97.14	2.06	66.03
400	0	0	0	100	5.56	73.13
500	4.35	4.35	0	91.30	1.32	87.00
600	0	0	0	100	0.85	86.96

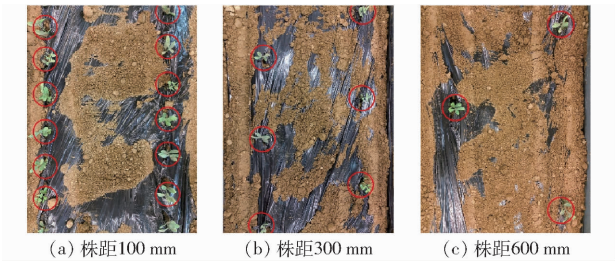


图 12 不同株距栽植效果

Fig. 12 Planting effect at different spacings

6 组试验的栽植株距变异系数均小于 6%,栽植株距变异系数随着设计株距的增大而减小,株距为 600 mm 时,栽植株距变异系数只有 0.85%,这是由于栽植株距的偏差量均在 10 mm 之内,当设计株距较小,对应的平均株距较小,栽植株距变异系数就相对偏大。

随着设计株距的增大,栽植穴口尺寸有所增大,在株距为 100 mm 时栽植平均穴口长度为 52.26 mm,株距为 500 mm 时栽植平均穴口长度为 87 mm,满足栽植要求。

本次试验采用的电动平台行驶系统和栽植部分分别驱动,可以实现栽植株距的无极调节。在实际应用中,设计的栽植装置搭载的移栽机推荐使用两套动力源分别驱动移栽机的行驶和栽植,以便进行栽植株距的调整。

6 结论

(1)提出了一种栽植静轨迹无级可调的鸭嘴栽植机构,机构由曲柄导杆机构和平行四边形机构两部分组成。采用调整行驶速比与支点 B 位置相结合的方法大范围调节设计栽植株距以实现不同株距小穴口栽植。

(2)建立了栽植机构的运动学模型,开发了可视化辅助设计软件,分析了栽植机构各参数对栽植轨迹和栽植器竖直方向分速度的影响,选定调节支点 B 竖直方向位置调整栽植轨迹,使用逐步逼近法得到一组在栽植株距范围100~600 mm之间均可以形成满足轨迹要求的结构参数: $L_1 = 35\text{ mm}$ 、 $L_2 = 350\text{ mm}$ 、 $L_3 = 70\text{ mm}$ 、 $L_5 = 280\text{ mm}$ 、 $d_D = 358\text{ mm}$ 、 $\Phi_4 = 15^\circ$ 、 $x_B = 20\text{ mm}$,

标定了每间隔50 mm株距对应的支点 B 纵坐标 y_B ,为不同株距小穴口栽植轨迹的调整提供依据。

(3)鸭嘴的开合控制使用凸轮拉线结构,实现鸭嘴在接苗位置及栽苗位置的准确开合;采用丝杠滑块机构实现支点 B 竖直方向位置的调整;建立了鸭嘴栽植装置的三维模型,进行了多刚体运动学仿真,仿真结果验证了机构设计的合理性。

(4)实验室栽植试验结果表明,该装置在栽植株距100~600 mm之间时,栽植合格率均在90%以上,平均合格率达到97.48%,株距变异系数在6%以下,平均穴口长度均小于100 mm,株距100 mm和200 mm时平均穴口长度均小于60 mm,株距600 mm时平均穴口长度小于90 mm,栽植效果良好,满足不同栽植株距较小穴口的要求。

参 考 文 献

- [1] 崔志超,管春松,杨雅婷,等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020,41(3):85-92.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, YANG Yating, et al. Design and experiment of vertically feeding-seedling device for rice pot seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(3):85-92. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 金丽宇,张伟,付晓明,等. 鸭嘴式蔬菜移栽机栽植机构设计与试验[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021,33(5):100-105.
JIN Liyu, ZHANG Wei, FU Xiaoming, et al. Design and experiment of planting mechanism of duckbill type vegetable transplanter[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021,33(5):100-105. (in Chinese)
- [4] 毛灿,罗海峰,朱毅,等. 钵苗移栽机械研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020,41(1):215-222.
MAO Can, LUO Haifeng, ZHU Yi, et al. Research status and development trend of seedling transplanting machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(1):215-222. (in Chinese)
- [5] 陈盛. 链夹式辣椒钵苗移栽机设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020.
CHEN Sheng. Design and experimental research of chain clip type pepper pot seedling transplanter[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [6] 王品隆. 挠性圆盘栽植装置的设计与试验[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2020.
WANG Pinlong. Design and experiment of flexible disk planting device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2020. (in Chinese)
- [7] 燕亚民,王双. 导苗管式烟草移栽机的设计[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2017,34(2):147-151.
YAN Yamin, WANG Shuang. Design of the tobacco seedling transplanting machine[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition), 2017,34(2):147-151. (in Chinese)
- [8] 赵景文,李凯,李治国,等. 链夹式甘蓝移栽机优化设计与试验[J]. 农业工程, 2017,7(增刊1):16-18.
ZHAO Jingwen, LI Kai, LI Zhiguo, et al. Optimization design and experiments of chain clip kale transplanter[J]. Agricultural Engineering, 2017,7(Sup. 1):16-18. (in Chinese)
- [9] 赵旭志,张伟,姜春霞. 2ZS-3型挠性圆盘式甘蓝补水移栽机设计及试验[J]. 农业工程, 2019,9(8):10-14.
ZHAO Xuzhi, ZHANG Wei, JIANG Chunxia. Design and test of 2ZS-3 flexible disc cabbage water supplement transplanter[J]. Agricultural Engineering, 2019,9(8):10-14. (in Chinese)
- [10] DONG Wanglin, YU Hang, ZHANG Lizhan. Asymmetric ridge-furrow and film cover improves plant morphological traits and light utilization in rain-fed maize[J]. Journal of Meteorological Research, 2018(5):829-838.
- [11] LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang. Kinematic analysis and experiment of planetary five-bar planting mechanism for zero-speed transplanting on mulch film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(4):84-91.
- [12] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022,53(9):1-20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Progress in research on mechanised transplanting technology and equipment for large fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):1-20. (in Chinese)
- [13] SRI M, HWANG S J, NAM J S. Experimental safety analysis for transplanting device of the 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter[J]. Agronomy, 2022,12(8):1890.

[14] BIAN Jinlong, XU Fangfu, HAN Chao. Effects of planting methods on yield and quality of different types of japonica rice in northern Jiangsu plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018,17(12):2624–2635.

[15] 肖名涛, 肖仕雄, 孙松林, 等. 油菜钵体苗移栽机构研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2019,41(12):1–6.
XIAO Mingtao, XIAO Shixiong, SUN Songlin, et al. Research status and development trend of rape pot transplanting mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(12):1–6. (in Chinese)

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

[17] 廖庆喜, 刘明峰, 张照, 等. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2015,46(11):49–56.
LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double 5-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(11):49–56. (in Chinese)

[18] 胡飞, 郭栋, 陈彩蓉, 等. 复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(9):62–69.
HU Fei, GUO Dong, CHEN Cairong, et al. Design and experiment on compound crank rocker double-row planting device of vegetable plug seedling up-film transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):62–69. (in Chinese)

[19] 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]. 农业机械学报, 2013,44(10):57–61.
HU Jianping, ZHANG Jianbing, HE Junyi, et al. Motion analysis and experiment for planting mechanism with planetary gears of transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(10):57–61. (in Chinese)

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

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

[22] 郑章荣, 张佳敏, 徐强辉, 等. 广州地区蔬菜机械化移栽技术推广实践与思考[J]. 现代农业装备, 2021,42(4):81–85.
ZHENG Zhangrong, ZHANG Jiamin, XU Qianghui, et al. Popularize practice and thinking of vegetable mechanicaiton transplanting technology in Guangzhou[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021,42(4):81–85. (in Chinese)

[23] 徐高伟, 邱绪云, 朱梦霞, 等. 膜上移栽机械研究进展及与分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021,59(2):23–26.
XU Gaowei, QIU Xuyun, ZHU Mengxia, et al. Research progress and analysis of transplanting machine on film[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021,59(2):23–26. (in Chinese)

[24] 李斯更, 王娟娟. 我国蔬菜产业发展现状及对策措施[J]. 中国蔬菜, 2018(6):1–4.
LI Sigeng, WANG Juanjuan. Present situation and countermeasures of vegetable industry in China[J]. China Vegetables, 2018(6):1–4. (in Chinese)

[25] 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)

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