

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.007

复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验

胡 飞¹ 郭 栋² 陈彩蓉² 颜 华³ 尹文庆² 於海明²

(1. 南京农业大学人工智能学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031;
3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对蔬菜膜上移栽膜口大、栽植频率低等问题,设计了一种复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置。在分析复合曲柄摇杆式栽植机构工作原理的基础上,建立栽植机构的运动学模型。采用 Matlab 软件编写栽植机构仿真分析与优化程序,分析各个参数对栽植轨迹及运动特性的影响,采用逐次逼近的方法,得到一组满足膜上栽植要求的杆件长度: $l_{OA}=48\text{ mm}$, $l_{AB}=125\text{ mm}$, $l_{BC}=160\text{ mm}$, $l_{AD}=200\text{ mm}$;根据优化后的参数组合设计样机并进行虚拟仿真和样机田间试验。结果表明:各组试验栽植合格率均在90%以上,栽植深度合格率在94%以上,株距变异系数最大为6.35%,膜口长度平均值为10.44 cm,破膜程度约为18%,栽植频率达到70株/(min·行),满足蔬菜膜上移栽的要求。

关键词: 蔬菜膜上栽植装置;栽植机构;曲柄摇杆;参数优化

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0062-08 OSID: 

Design and Experiment on Compound Crank Rocker Double-row Planting Device of Vegetable Plug Seedling Up-film Transplanter

HU Fei¹ GUO Dong² CHEN Cairong² YAN Hua³ YIN Wenqing² YU Haiming²

(1. College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China
2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China
3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problems of large opening of vegetable plug seedling up-film transplanting and low planting frequency, a compound crank-rocker type double-row planting device on film was developed. This planting device was designed for pepper pot seeding. And the kinematics model of the planting mechanism was established, its trajectory and motion equation were also calculated. The influences of different parameters on planting trajectory and movement characteristics were explored. By using the simulation analysis and optimization program written by Matlab software, the optimized length of rods were obtained as follows: $l_{OA}=48\text{ mm}$, $l_{AB}=125\text{ mm}$, $l_{BC}=160\text{ mm}$, and $l_{AD}=200\text{ mm}$. According to the optimized length of the rods, the planting mechanism was designed, and the 3D modeling and virtual simulation verification were also completed by using Creo software, after completed the manufacturing of prototype, the field experiment were carried out. The results showed that the qualified rates of planting on film were all more than 90%, and the qualified rates of planting depth were more than 94%, the maximum variation coefficient of plant spacing was 6.35%, and the average length of membrane hole was 10.44 cm, the damage rate of the planting mechanism on the film was about 18%, and the planting frequency reached 70 plants/(min·row), which met the requirements of vegetable up-film transplanting.

Key words: vegetable up-film planting device; planting mechanism; crank rocker; parameter optimization

收稿日期: 2021-03-11 修回日期: 2021-05-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(KYYJ202005)和江苏省现代农机装备与
技术示范推广项目(NJ2020-41)
作者简介: 胡飞(1975—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备技术研究,E-mail: hufei@njau.edu.cn
通信作者: 於海明(1974—),男,高级工程师,主要从事现代农业装备研究,E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

0 引言

膜上育苗移栽有早熟增产、增强光效、提高幼苗成活率、提升蔬菜品质等多种优点,研发蔬菜膜上移栽机具有重要意义^[1]。栽植装置作为移栽机的核心工作部件,其性能直接影响栽植质量和频率^[2-3]。

膜上移栽机采用打穴投苗的作业方式以减小对地膜的破坏,但也极大地限制了栽植频率。目前适用于膜上作业的主要有水轮式移栽机、吊杯式移栽机和行星轮式移栽机。美国 Kennco 公司水轮式膜上移栽机^[4]可以完成单行或多行膜上栽植作业,但栽植频率一般不超过 20 株/(min·行),且容易出现撕膜问题;日本久保田公司全自动膜上移栽机,由吊杯完成破膜、成穴和栽植作业,栽植频率可达到 60 株/(min·行),但对育苗要求高;井关 PVHR2 型移栽机栽植频率可达到 60 株/(min·行),但小株距栽植时穴口株距占比过大,易撕裂地膜^[5]。封俊等^[6]对带偏心机构的吊杯式移栽机进行运动轨迹分析,栽植频率一般不超过 30 株/(min·行),且余摆线运动产生的穴口较大^[7],破膜严重;胡建平^[8]设计了行星轮栽植机构并进行试验研究,该机构可以满足多株距移栽要求,栽植频率达 60 株/(min·行),由于钵苗栽植过程中栽植轨迹环扣较大^[9],容易对地膜形成较大损伤。

针对蔬菜膜上移栽膜口大、栽植频率低等问题,本文设计一种栽植频率可达 70 株/(min·行)的复合曲柄摇杆式膜上双行栽植装置,并以其核心部件复合曲柄摇杆栽植机构为研究对象,建立运动学模型,得出吊杯的位移方程和运动轨迹方程,分析各杆长度对运动特性的影响,采用逐次逼近的方法进行参数优化;通过田间试验验证该装置的作业性能,以期为蔬菜膜上高速自动移栽机的研制提供参考。

1 栽植装置设计

1.1 设计要求

栽植装置的作用是将钵苗完好地移栽入土,因此所设计的栽植装置要以某一特定的运动轨迹完成入土、打穴、栽植及出土等一系列复杂的周期性作业任务,具体设计要求如下:

(1) 栽植吊杯的轨迹要求

要保证钵苗栽植直立度、减少地膜破损,要求作业轨迹近似余摆线^[10],即实现零速投苗;接苗时,接苗点附近的轨迹要平缓,以方便接苗;吊杯入土时,其轨迹切线与栽植平面形成的角度应尽量接近 90°,保证良好的破土成穴效果及栽植直立度。

(2) 栽植吊杯的姿态要求

在完成栽植的过程中,吊杯的姿态要求始终处于竖直状态,以确保钵苗随着吊杯呈直立状态被移栽入土,从而保证栽植直立度。

(3) 栽植吊杯的开合要求

栽植吊杯主要作用是完成接苗、运苗、打穴和栽植等作业任务。吊杯在运苗及打穴阶段要处于闭合状态,当吊杯完成打穴且处于最低点时,吊杯可立即打开投放钵苗,完成栽植,直至吊杯最低点高于钵苗适当距离,在下次接苗前闭合,以免出现带苗现象。

1.2 栽植装置组成与工作原理

基于以上设计要求,以曲柄摇杆机构为基础,结合平行四边形机构,设计了一种蔬菜膜上双行栽植装置,如图 1 所示,OA 为曲柄,绕点 O 匀速转动,CC' 为机架,CB、C'B' 为摇杆,BD、B'D' 为连杆,BB'、DD' 为连接杆,各杆件铰接在一起,曲柄摇杆机构实现吊杯的轨迹要求,杆件所构成的平行四边形机构 CC'B'B 与 BB'D'D 实现吊杯的姿态要求。吊杯的开合通过凸轮摆杆机构控制拉丝实现,当吊杯最低点 E 运动到接苗点 b 完成接苗,钵苗与吊杯一起运动到栽植点 a,此时,凸轮推动摆杆,摆杆拉动拉丝打开吊杯,投放钵苗,完成栽植,吊杯保持打开状态到点 c 在弹簧作用下闭合。

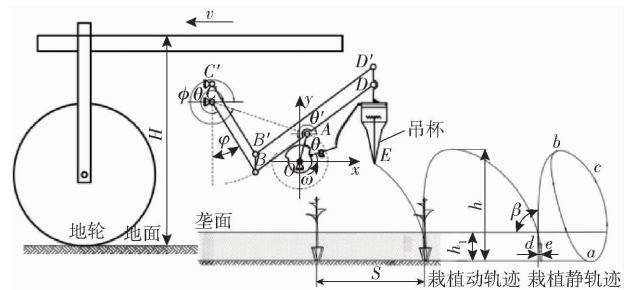


图 1 复合曲柄摇杆式栽植装置原理图

Fig. 1 Principle diagram of compound crank and rocker planting mechanism

复合曲柄摇杆机构与栽植吊杯组成一个栽植单体。两行栽植单体同轴驱动且曲柄相位差 180°,分别安装在机架两侧,随着曲柄轴的转动,两侧吊杯运动惯性力方向相反,互相抵消一部分^[11],有利于提高栽植装置整体运转的稳定性,实现周期性双行栽植。

作业时,在拖拉机的牵引下,地轮通过链传动将动力传递到曲柄轴,轴上的曲柄 OA 逆时针转动,带动曲柄摇杆运动,栽植频率通过控制拖拉机的前进速度调节;株距通过改变链传动的传动比进行调节。

2 栽植机构运动学模型

为了便于对栽植机构进行分析,以曲柄旋转中心 O 为原点建立坐标系(如图 1 所示)。设 x 轴沿

水平方向且 x 轴正方向与机组前进方向相反, y 轴沿竖直方向, 逆时针转动方向为正。在进行运动学分析时, 以曲柄 OA 为原动件, 所有连杆都视为刚性零件, 不发生弹性变形, 不存在转动间隙^[12]。在机构 $OABC$ 中, 由矢量方程 $\boldsymbol{l}_{OA} + \boldsymbol{l}_{AB} = \boldsymbol{l}_{OC} + \boldsymbol{l}_{CB}$ 得

$$\begin{cases} x_A + l_{AB} \cos \theta_1 = x_C + l_{BC} \cos \theta_2 \\ y_A + l_{AB} \sin \theta_1 = y_C + l_{BC} \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\cos(\phi - \theta_2) = \frac{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + l_{BC}^2 - l_{AB}^2}{2l_{BC} \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}} \quad (2)$$

其中 $0 < \phi - \theta_2 < \pi$ $\phi = \arctan \frac{y_A - y_C}{x_A - x_C}$

式中 x_A ——点 A 横坐标
 y_A ——点 A 纵坐标
 x_C ——点 C 横坐标
 y_C ——点 C 纵坐标
 l_{AB} ——连杆 AB 长度
 l_{BC} ——摇杆 BC 长度
 θ_1 ——连杆 AB 角位移
 θ_2 ——摇杆 BC 角位移
 ϕ —— AC 连线角位移

点 E 是吊杯栽植轨迹的发生点, 其运动特性决定着栽植机构的作业性能。栽植作业中机具以速度 v 前进, 可得点 E 的位移方程为

$$\begin{cases} x_E = l_{OA} \cos(\omega t + \theta_0) + l_{AD} \cos \theta_1 - vt \\ y_E = l_{OA} \sin(\omega t + \theta_0) - l_{AD} \sin \theta_1 - l_{ED} \end{cases} \quad (3)$$

式中 l_{OA} ——曲柄 OA 长度
 l_{AD} ——杆件 AD 长度
 l_{ED} ——点 D 到点 E 的距离
 t ——曲柄转动时间
 ω ——曲柄 OA 角速度
 θ_0 ——曲柄 OA 初始角度

点 E x 方向与 y 方向速度为

$$\begin{cases} \dot{x}_E = -\omega l_{OA} \sin(\omega t + \theta_0) - \dot{\theta}_1 l_{AD} \sin \theta_1 - v \\ \dot{y}_E = \omega l_{OA} \cos(\omega t + \theta_0) - \dot{\theta}_1 l_{AD} \cos \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

点 E x 方向与 y 方向加速度为

$$\begin{cases} \ddot{x}_E = -\omega^2 l_{OA} \cos(\omega t + \theta_0) - \ddot{\theta}_1 l_{AD} \sin \theta_1 - \dot{\theta}_1^2 l_{AD} \cos \theta_1 \\ \ddot{y}_E = -\omega^2 l_{OA} \sin(\omega t + \theta_0) - \ddot{\theta}_1 l_{AD} \cos \theta_1 + \dot{\theta}_1^2 l_{AD} \sin \theta_1 \end{cases} \quad (5)$$

3 主要参数对栽植机构运动特性影响分析与优化设计

3.1 主要参数对栽植机构运动特性的影响

吊杯的栽植轨迹及运动特性直接影响栽植机构

的栽植性能, 基于上述运动学模型及推导方程, 采用 Matlab 软件, 通过控制变量的方法, 分析各设计参数对栽植轨迹与运动特性的影响, 为下一步的参数优化设计提供依据。以辣椒钵苗尺寸作为设计依据, 根据轨迹要求及运动学仿真分析程序初步得到一组符合要求的杆长: $l_{OA} = 50$ mm、 $l_{AB} = 120$ mm、 $l_{BC} = 170$ mm、 $l_{AD} = 190$ mm。设机组前进速度为 0.27 m/s, 栽植频率为 70 株/(min·行), 分别改变各杆长度, 栽植轨迹变化如图 2 所示。

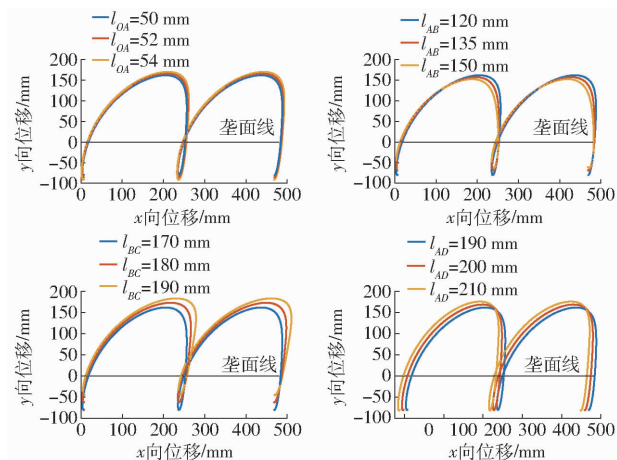


图2 栽植轨迹随杆长的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of planting trajectory with rod length

由图2可以看出, 随着曲柄长度 l_{OA} 的增加, 吊杯的运动轨迹曲线高度由 242 mm 逐渐增加到 261 mm, 入土后轨迹环扣水平方向最大距离由 19 mm 逐渐增加到 25 mm, 入土深度(垄面到轨迹最低点的距离)由 71 mm 逐渐增加到 80 mm, 入土时的轨迹切线与垄面的夹角由 86.2° 逐渐增加到 88.3° , 所以曲柄长度 l_{OA} 影响栽植深度、栽植直立度及破土成穴的效果, 同时也与移栽后膜口尺寸(环扣越小尺寸越小)有关; 随着连杆长度 l_{AB} 的增加, 吊杯的运动轨迹曲线高度由 242 mm 逐渐减小到 216 mm, 入土后轨迹环扣水平方向最大距离由 19 mm 逐渐增加到 25 mm, 入土深度由 71 mm 逐渐减小到 53 mm, 入土时的轨迹切线与垄面的夹角变化不大, 投苗点(上止点附近)轨迹趋向凸起, 所以连杆长度 l_{AB} 与投苗(轨迹平缓则有利于投苗)的要求及膜口尺寸有关; 随着摇杆长度 l_{BC} 的增加, 吊杯的运动轨迹曲线高度由 242 mm 逐渐减小到 229 mm, 入土后轨迹环扣水平方向最大距离由 19 mm 逐渐增加到 26 mm, 入土深度由 71 mm 逐渐减小到 35 mm, 入土时的轨迹切线与垄面的夹角由 86.2° 逐渐增加到 102° , 轨迹出现前倾现象, 所以摇杆长度 l_{BC} 不仅影响栽植深度, 还对直立度、破土效果及膜口尺寸有一定的影响。随着杆件长度 l_{AD} 的增加, 吊杯的运动轨迹曲线整体向后平移, 杆件长度 l_{AD} 对栽植轨迹影响较小。

吊杯 y 向速度、加速度变化曲线如图 3、4 所示。

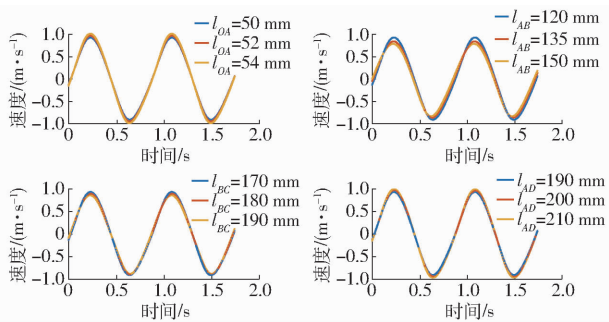


图3 吊杯 y 向速度随杆长的变化曲线

Fig.3 Changing curves of velocity of dibble-type planting devices in y -direction with rod length

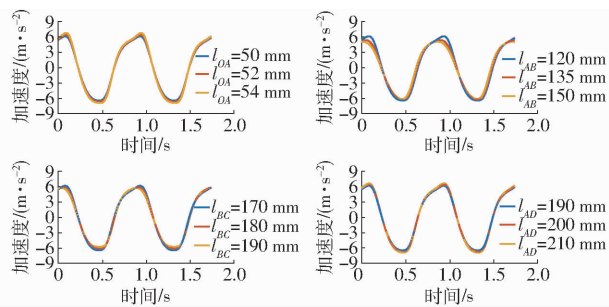


图4 吊杯 y 向加速度随杆长的变化曲线

Fig.4 Changing curves of acceleration of dibble-type planting devices in y -direction with rod length

从图3可以看出,吊杯 y 方向速度随着曲柄长度 l_{OA} 、杆件长度 l_{AD} 的增加而变大;随着连杆长度 l_{AB} 、摇杆长度 l_{BC} 的增加而减小,各杆长度变化对吊杯 y 方向速度影响并不显著。

从图4可以看出,吊杯在 y 方向加速度随着曲柄长度 l_{OA} 的增加有微小的增加,即曲柄长度 l_{OA} 对加速度无显著影响;吊杯在 y 方向加速度随着连杆长度 l_{AB} 、摇杆长度 l_{BC} 的增加而减小,在峰值处变化显著,此时是吊杯完成栽植的时刻,加速度越大,钵苗与吊杯脱离更迅速;杆件长度 l_{AD} 对加速度无明显影响。

吊杯 x 向速度、加速度变化曲线如图 5、6 所示。

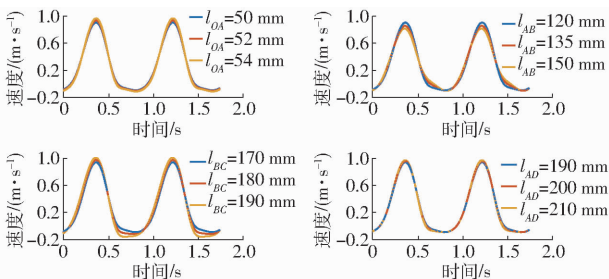


图5 吊杯 x 向速度随杆长的变化曲线

Fig.5 Changing curves of velocity of dibble-type planting devices in x -direction with rod length

从图5可以看出,吊杯在 x 方向速度随着曲柄长度 l_{OA} 、摇杆长度 l_{BC} 的增加而变大;随着连杆长度

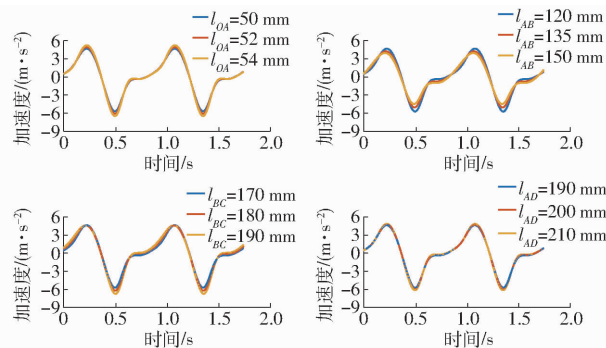


图6 吊杯 x 向加速度随杆长的变化曲线

Fig.6 Changing curves of acceleration of dibble-type planting devices in x -direction with rod length

l_{AB} 的增加而减小;杆件长度 l_{AD} 的变化对吊杯在 x 方向速度影响不明显。

从图6可以看出,吊杯在 x 方向加速度随着曲柄长度 l_{OA} 、连杆长度 l_{AB} 的增加而增大,在峰值处变化显著,此时是吊杯完成接苗后运苗的时刻,加速度越大运苗效率越高;摇杆长度 l_{BC} 、杆件长度 l_{AD} 对吊杯在 x 方向加速度无明显影响。

3.2 参数优化设计

在明确各设计参数对栽植机构栽植轨迹和运动特性的影响后,为进一步提高栽植机构的作业性能,对机构参数进行优化设计^[13-14]。

3.2.1 优化目标分析

根据辣椒钵苗膜上移栽的农艺要求,需要确定栽植机构在栽植过程中所需满足的目标要求,具体目标如下:

在满足农艺要求条件下,为提高栽植频率,栽植轨迹在 y 方向的行程不可过大,故得目标函数1为

$$f_1 = \min(y_{E\max} - y_{E\min}) \quad (6)$$

由分析可知, l_{AB} 越小则投苗点处的轨迹越平缓,利于投苗,得目标函数2为

$$f_2 = \min(l_{AB}) \quad (7)$$

为实现稳定栽植,其最大惯性力应尽可能的小,得目标函数3为

$$f_3 = \min(\sqrt{\max(\ddot{x}_E^2 + \ddot{y}_E^2)}) \quad (8)$$

为减小膜口尺寸,即保证环扣 x 向距离 l_{de} 尽可能小。 d 、 e 为吊杯在 x 向的零速点,即 $\dot{x}_E = 0$,得目标函数4为

$$f_4 = \min(|x_d - x_e|) \quad (9)$$

为保证良好的破土效果,栽植轨迹入土处的切线与垄面的夹角 β 应尽可能为 90° ,得目标函数5为

$$f_5 = \min(|90^\circ - \beta|) \quad (10)$$

栽植机构的优化受到4个方面的约束:曲柄摇杆存在条件;机构 y 方向行程大于等于 230 mm 以满

足栽植农艺要求;轨迹环扣存在条件;摇杆 $B'C'$ 在
在垂直方向的角度 $\varphi > 0$, 保证杆件所构成的平行四边
形机构的稳定性。根据以上约束得约束函数为

$$\begin{cases} g_1 = l_{OA} - l_{AB} \leq 0 \\ g_2 = l_{OA} - l_{BC} \leq 0 \\ g_3 = l_{OA} + 215 - (l_{AB} + l_{BC}) \leq 0 \\ g_4 = l_{OA} + l_{AB} - (215 + l_{BC}) \leq 0 \\ g_5 = l_{OA} + l_B - (215 + l_{AB}) \leq 0 \\ g_6 = 230 - (\max(y_E) - \min(y_E)) \leq 0 \\ g_7 = |x_d - x_e| > 0 \\ g_8 = \varphi > 0 \end{cases} \quad (11)$$

3.2.2 栽植机构仿真分析与优化

复合曲柄摇杆栽植机构的优化属于多目标、多
参数的复杂优化问题。基于建立的栽植机构数学模
型及计算机图形学有关方法^[15-16], 采用 Matlab 软
件编写了栽植机构运动学仿真分析与优化程序,
人机交互界面如图 7 所示, 包括参数输入区、程序
控制区、优化结果及图像显示区。该程序通过对
栽植机构的运动特性和运动状态的模拟, 通过参
数的调节以达到所设定的目标, 实现对栽植机构
的优化。

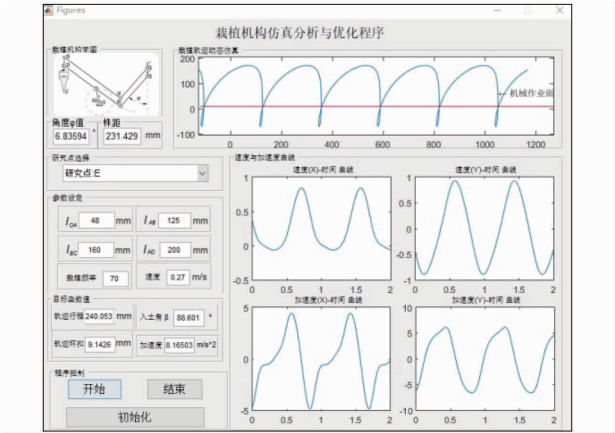
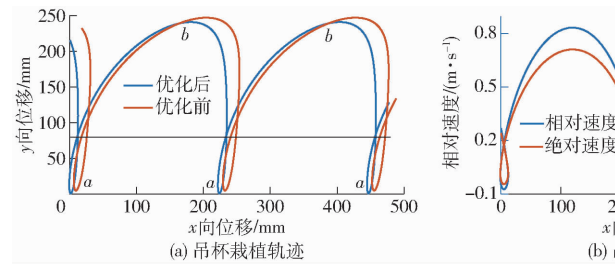


图 7 栽植机构仿真分析与优化程序界面
Fig.7 Simulation analysis and optimization program
interface of planting mechanism

在综合分析不同参数对目标影响规律的基础
上, 借助人机交互界面, 采用逐次逼近的方法获得
了一组满足栽植目标的较优栽植机构参数^[17-18]:



(a) 吊杯栽植轨迹

$l_{OA} = 48 \text{ mm}, l_{AB} = 125 \text{ mm}, l_{BC} = 160 \text{ mm}, l_{AD} = 200 \text{ mm}.$
表 1 为优化前后各优化目标及设计目标参数对比。

表 1 优化前后参数对比
Tab.1 Comparison of parameters before and after
optimization

参数	初始值	优化值
f_1/mm	242.18	240.05
f_2/mm	120	125
$f_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	8.57	8.17
f_4/mm	19.00	9.14
$f_5/(\text{^\circ})$	3.80	1.40

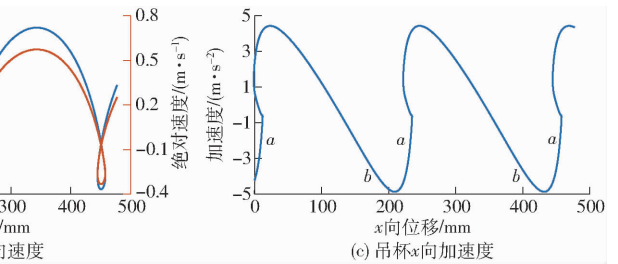
经参数优化后,栽植轨迹如图 8a 所示,在 x 方
向的速度与加速度曲线如图 8b、8c 所示。

从表 1 可以得出,优化后 f_1 比优化前小,说明优
化后机构的轨迹行程变短,利于高速栽植的实现;
 f_3 减小,说明优化后机构的惯性力减小,机具的振
动减小,栽植更加稳定; f_4 减小,说明优化后机构
的栽植轨迹环扣更小,减小破膜程度; f_5 减小,说
明优化后机构的栽植轨迹入土处切线与垄面的夹
角更接近 90° , 利于破土。除 f_2 稍有增加,各目
标函数值均小于优化前,说明本次优化可靠。图 8
对应标出了栽植点 a 与接苗点 b 。由于栽植时钵
苗相对于地面运动而接苗时钵苗相对于机具运
动,所以分析栽植点 a 应考虑动轨迹对应的运
动,接苗点 b 应考虑静轨迹对应的运动。栽植点
 a 位于环扣内,由图 8b 可知,此时水平方向速度
接近于零,有利于实现零速栽植,保证钵苗栽植
直立度,并且由图 8c 可知,该点 x 方向加速度
较小,利于稳定栽植。接苗点 b 处轨迹平缓,吊
杯水平方向速度较小,利于吊杯平稳接苗,加速
度较大,提高运苗效率。

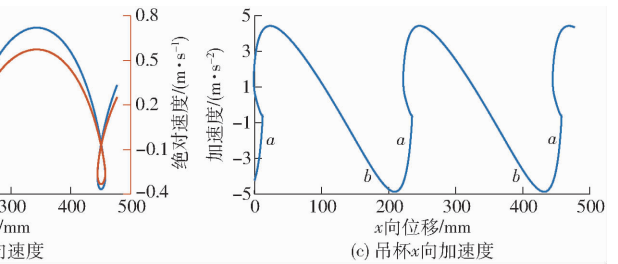
4 栽植装置仿真与试验

4.1 蔬菜膜上双行栽植装置运动仿真

根据优化后的参数,综合考虑结构配置,利用
Creo 软件建立蔬菜膜上双行栽植装置三维模型,
如图 9 所示。该装置由机架、复合曲柄摇杆栽
植机构、吊杯和吊杯开合控制机构等组成。整
机左右对称布置,复合曲柄摇杆机构驱动吊杯
往复运动完成接苗



(b) 吊杯x向速度



(c) 吊杯x向加速度

图 8 参数优化下的栽植机构运动分析结果
Fig.8 Kinematic analysis results of planting mechanism under parameter optimization

和栽植；吊杯作为末端执行装置,负责将钵苗植入土壤；吊杯开合控制机构保证吊杯在规定位置及时、准确的开合。为验证设计的正确性,在 Creo 中进行运动学仿真分析,得到吊杯栽植轨迹、速度与加速度曲线分别如图 9、10 所示。

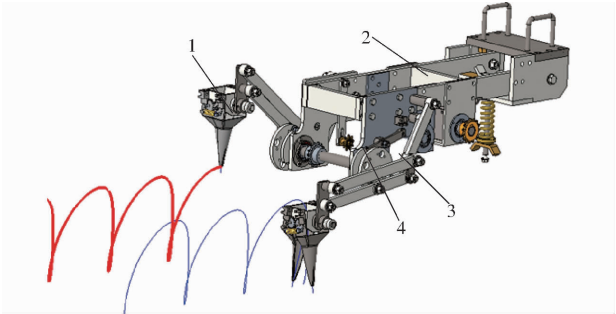


图 9 虚拟样机及栽植轨迹

Fig. 9 Virtual prototype and planting trajectory

1. 吊杯 2. 机架 3. 复合曲柄摇杆驱动机构 4. 吊杯开合控制机构

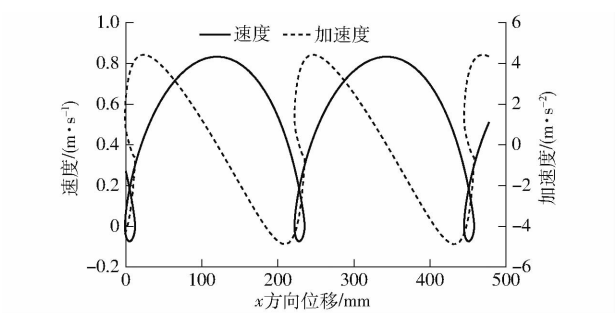


图 10 吊杯速度与加速度曲线

Fig. 10 Velocity and accelerate curves of dibble-type planting devices

图 9 所示的栽植轨迹与图 8a 轨迹基本一致,轨迹高度相差 1.3% (仿真轨迹高度为 243 mm,理论分析的轨迹高度为 240 mm)。两侧的栽植轨迹相差半个周期,吊杯在接苗点处闭合,在到达栽植深度时打开,说明复合曲柄摇杆机构和吊杯开合控制机构设计合理。由图 10 和图 8b、8c 比较可知,仿真得到的速度、加速度曲线与理论分析所得基本一致,在环扣内存在零速栽植点,接苗点的速度与加速度值相差较小,分别为 0.04 m/s 和 0.16 m/s² (仿真的速度与加速度分别 0.36 m/s、4.31 m/s²,理论分析值为 0.4 m/s、4.47 m/s²),综上可以验证该装置设计的合理性。

4.2 田间试验

4.2.1 试验条件与方法

为验证栽植装置的作业性能,于 2020 年 10 月 9 日在江苏省南京市江宁区谷里农业科技园进行了田间试验。试验前对试验田进行耕整,起垄覆膜。垄宽 700 mm、垄高 150 mm、垄面平整、含水率 18.2%、土壤硬度 1.08 kPa、无硬土块。试验采用苗期 20 d,高约为 15 cm 的辣椒苗。检测设备包括钢

卷尺 (得力 8203 型)、数显倾角仪 (VICTOR5005 型)、土壤硬度计 (TYD-3 型)、土壤水分仪 (HT-41C 型)、秒表等。试验效果如图 11 所示。

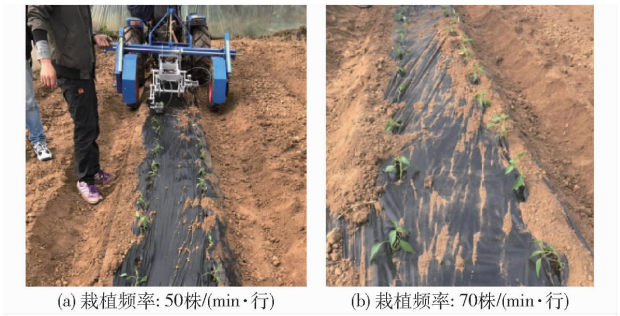


图 11 田间试验及钵苗移栽结果

Fig. 11 Field test and results of pot seedling transplanting

试验时,以栽植频率、栽植株距作为试验因素,栽植频率选取 50 株/(min·行)和 70 株/(min·行)两个水平,栽植株距选取 26 cm 和 30cm 两个水平。共进行 4 组试验,每组栽植 60 株钵苗,栽植后,进行参数测量、数据记录并按照试验指标统计分析。本次试验以人工方式进行投苗,故不统计漏栽、重栽的情况。

4.2.2 试验结果与分析

根据机械行业标准 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》及农艺要求,栽植性能指标主要包括栽植质量指标和栽植精度指标。栽植质量指标中要求:倒伏率小于等于 7%、埋苗率小于等于 5%、伤苗率小于等于 5%、露苗率小于等于 5%,栽植合格率大于等于 90%。栽植精度指标中要求:株距变异系数小于等于 15%、栽植深度合格率大于等于 75%。

破膜程度以钵苗栽植后所留膜口大小表征。为了更好发挥地膜早熟增产、增强光效的作用,移栽时吊杯对地膜的破坏越小越好。为了避免吊杯本身尺寸对破膜程度描述的影响,采用破膜程度评价方法^[9]。图 12a l 为吊杯入土后最长弦线长度, h 为入土深度;图 12b 中 s 是栽植后所留膜口纵向最长距离。规定膜口纵向最长距离 s 和栽植器入土部分最长弦线长度 l 的长度差与最长弦线长度 l 的百分比作为地膜破损程度评价指标,记为

$$p = \frac{s - l}{l} \times 100\%$$
 (12)

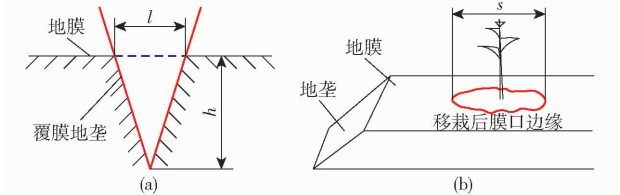


图 12 薄膜破损程度检测示意图

Fig. 12 Schematic diagram of damage rate of film

p 越接近于零,说明地膜破损程度越小,反之,地膜破损程度越大。

试验数据统计结果如表 2、3 所示。

表 2 田间移栽试验栽植质量试验结果
Tab.2 Result of transplanting quality experiment

试验 编号	栽植频率/ (株· (min·行) ⁻¹)	株距/ cm	倒伏 率/ %	埋苗 率/ %	伤苗 率/ %	露苗 率/ %	栽植 合格 率/%
1	50	26	0	2.3	2.3	0	93.4
2	50	30	0	1.8	3.6	1.8	92.8
3	70	26	3.7	0	3.7	0	92.6
4	70	30	5.5	0	1.9	1.9	90.7

表 3 田间移栽试验栽植精度试验结果
Tab.3 Result of transplanting accuracy experiment

参数	试验编号			
	1	2	3	4
平均值/cm	26.92	29.95	26.90	30.38
株距 标准差/cm	1.02	1.89	1.32	1.93
变异系数/%	3.79	6.31	4.91	6.35
栽植深度合格率/%	94.10	96.40	98.10	98.10
膜口	长度平均值/cm	10.64	10.02	10.91
	破损程度/%	19.17	14.17	21.17

由表 2 可知,栽植频率由 50 株/(min·行)增至 70 株/(min·行),倒伏率随之增加,这是由于栽植频率高,钵苗入土时间短,垄面凹处无充足时间回足量的土导致,这要求移栽前要保证垄面平整。各组的试验指标均小于旱地栽植机械行业标准,说明蔬菜膜上双行栽植装置设计合理、性能稳定。在试验状态下,栽植频率达到 70 株/(min·行),栽植频率优于国内市场上其他种类的膜上栽植机构,提高了作业效率。由表 3 可知,该装置在不同的株距与栽植

频率组合下,平均株距与设计株距基本接近,株距变异系数最大为 6.35%,远小于旱地栽植机械作业标准值(15%);随着栽植频率由 50 株/(min·行)增至 70 株/(min·行),导致株距变异系数与膜口纵向长度均有小幅度增加,这是由于随栽植频率的增加,地表不平导致的机具振动增大,吊杯振动也随之加剧;栽植深度合格率在 94% 以上,且各组变化不大,高于旱地栽植机械作业标准值(75%),栽植合格率均在 90 % 以上。膜口长度平均值约为 10.44 cm,破膜程度约为 18%,考虑到栽植器入土部分最长舷线约为 8.6 cm,膜口长度较小,尺寸稳定,适合膜上高速栽植作业。

5 结论

(1)针对蔬菜膜上移栽膜口大、栽植频率低等问题,设计了一种双行栽植单体同轴驱动且曲柄相位差 180°的复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置,并对其结构特点和工作原理进行了阐述。

(2)建立了栽植机构的运动学模型,采用 Matlab 软件编写仿真分析与优化程序,借助人机交互界面,采用逐次逼近的方法进行参数优化,得到一组较优机构结构参数: $l_{OA} = 48\text{ mm}$, $l_{AB} = 125\text{ mm}$, $l_{BC} = 160\text{ mm}$, $l_{AD} = 200\text{ mm}$ 。

(3)以辣椒钵苗为对象进行田间试验。该装置在不同的栽植频率与株距的组合下,栽植合格率均在 90 % 以上,栽植深度合格率在 94% 以上,株距变异系数最大为 6.35%,膜口长度平均值约为 10.44 cm,破膜程度约为 18%,栽植频率可达到 70 株/(min·行)。试验结果表明:该栽植装置栽植性能良好,能够满足蔬菜膜上栽植的要求。

参 考 文 献

[1] PRASANNA K G V, RAHEMAN H. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 189–197.

[2] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of a seeding pick-up device for vegetable transplanters [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13–19.

[3] 李旭英, 王玉伟, 鲁国成, 等. 吊杯式栽植器的优化设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 58–64.

LI Xuying, WANG Yuwei, LU Guocheng, et al. Optimization design and test of dibble-type transplanting device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 58–64. (in Chinese)

[4] 周脉乐. 回转式膜上辣椒钵苗移栽机构的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.

ZHOU Maile. Optimized design and experimental study of the rotary pepper pot seeding transplanting mechanism on agricultural plastic film[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[5] 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)

[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] 金鑫, 李树君, 杨学军, 等. 膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 29–34.

- JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization for pot seedling planting mechanism based on up-film transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):29-34. (in Chinese)
- [8] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮栽植机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78-85.
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimization design and experiment on planetary gears planting mechanism of self-propelled transplanting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78-85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.009. (in Chinese)
- [9] 金鑫, 杜新武, 杨传华, 等. 移栽机构曲柄滑槽式栽植机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 83-90.
JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on crank-chute planting mechanism of transplanting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.012. (in Chinese)
- [10] 陈建能, 王英, 黄前泽, 等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52-56.
CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):52-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.009. (in Chinese)
- [11] 冯庆庚. “对称反对称原理”和机构惯性力平衡[J]. 纺织机械, 2014(1): 28-30.
FENG Qinggeng. ‘Symmetry antisymmetry principle’ and inertia force balance of mechanism[J]. Textile Machinery, 2014(1): 28-30. (in Chinese)
- [12] 徐高伟, 刘宏新, 荐世春, 等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 55-65.
XU Gaowei, LIU Hongxin, JIAN Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 55-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.006. (in Chinese)
- [13] 李莹莹, 游敏, 徐建军. 基于 MATLAB 的曲柄摇杆机构优化设计[J]. 制造业自动化, 2016, 38(1): 102-105.
LI Yingying, YOU Min, XU Jianjun. Optimization design of crank rocker structure under the given output angle constraint[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(1): 102-105. (in Chinese)
- [14] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201007&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.007. (in Chinese)
- [15] 张威. MATLAB 基础编程与入门[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.
- [16] 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)
- [17] 吴国环, 俞高红, 项筱洁, 等. 三移栽臂水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 15-22.
WU Guohuan, YU Gaohong, XIANG Xiaojie, et al. Design and test of rice potted-seedling transplanting mechanism with three transplanting arms [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 15-22. (in Chinese)
- [18] ZHOU Maile, SUN Liang, DU Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of rice pot seedling transplanting mechanism with planetary bezier gears [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6): 1537-1548.