

蔬菜钵苗移栽机开沟式多杆植苗机构优化设计与试验

周海丽^{1,2} 杨伟¹ 俞高红^{1,2} 王斌¹ 叶秉良^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 针对导苗管式蔬菜钵苗植苗机构高速植苗时合格率不稳定的问题,设计了一种具有扶苗和推苗作用的开沟式多杆植苗机构,并分析了该机构的工作原理,建立了运动学模型;以运动学模型为理论基础,利用 Matlab 开发了植苗机构辅助分析软件;结合钵苗栽植农艺要求建立优化目标,应用辅助分析软件及遗传算法工具箱优化得到满足要求的最佳机构参数;以此参数完成了结构设计和三维建模,并进行了虚拟仿真分析,验证了植苗机构设计的正确性;设计植苗机构物理样机并开展了半自动和全自动蔬菜钵苗植苗试验。试验结果表明,栽植速度不高于 90 株/min 时,栽植合格率均达到 95% 以上;栽植速度为 120 株/min 时,栽植合格率超过 89%,表明该机构能较好地完成植苗作业。

关键词: 植苗机构; 蔬菜钵苗移栽机; 运动学模型

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0079-08 **OSID:** 

Optimization Design and Experiments of Ditching Multi-bar Seedling Planting Mechanism

ZHOU Haili^{1,2} YANG Wei¹ YU Gaohong^{1,2} WANG Bin¹ YE Bingliang^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that the qualified rate is not easy to ensure when the seedling guiding tube planting mechanism is planted at high speed, a ditching multi-bar seedling planting mechanism with seedling pushing and supporting function was designed. The working principle of the planting mechanism was analyzed, and then the kinematics model of the mechanism was established. Based on the kinematics model, an aided-analysis and optimization software of the seedling planting mechanism was developed by using Matlab. According to the seedling planting requirements, the optimization objective was established, and the optimal mechanism parameters were obtained by the software and the Matlab genetic algorithm toolbox. With these parameters, the structure design and 3D modeling were completed, and the virtual simulation analysis was carried out to verify the correctness of design of the mechanism. The physical prototype of the seedling planting mechanism was manufactured, and the semi-automatic and automatic vegetable plug seedling planting experiments were carried out. The results showed that when the planting speed was not higher than 90 plants/min, the qualified rates were more than 95%; when the planting speed was 120 plants/min, the qualified rates remained above 89%, which indicated that the mechanism was feasible for the seedling planting operation. The design provided a reference for the study of vegetable plug seedling transplanting machine.

Key words: seedling planting mechanism; vegetable plug seedling transplanting machine; kinematics model

收稿日期: 2022-07-27 修回日期: 2022-10-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(32171899)
作者简介: 周海丽(1989—),女,讲师,博士,主要从事农业机械设计和气固两相流仿真研究,E-mail: zhouhl@zstu.edu.cn
通信作者: 叶秉良(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计和机构数值分析与综合研究,E-mail: zist_ybl@zstu.edu.cn

0 引言

蔬菜钵苗移栽技术具有提高蔬菜苗存活率、缩短生长期和增产增收等优势,在国内外蔬菜种植业中得到了大规模推广和应用。中国作为世界上最大的蔬菜生产国(占世界总产量的60%左右),由于适用的钵苗移栽机械较少,蔬菜钵苗移栽作业的机械化率较低,人工移栽作业仍占很大比重^[1-3]。因此,研发蔬菜钵苗移栽机具有实际意义。

蔬菜钵苗移栽机的核心部件之一是植苗机构^[4-5]。目前常见的植苗机构主要有鸭嘴式和导苗管式两种^[6-13]。其中,导苗管式植苗机构在植苗作业时,喂苗盘中的钵苗在自身重力作用下掉入导苗管,再通过导苗管落入已开设的苗沟中,随后覆土轮进行覆土、填压,完成钵苗植苗作业。但是,由于钵苗下落高度大且钵苗掉入苗沟后具有惯性且无约束,在高速植苗时,导苗管式栽植机构易造成钵苗损伤和在苗沟内倾倒,影响植苗合格率,其植苗速度一般控制在60~70株/min^[4-5]。

针对以上问题,本文在导苗管式植苗机构的基础上,提出一种将开沟器与推苗机构和扶苗机构相结合的开沟式多杆植苗机构,并通过遗传算法进行机构参数优化设计。通过机构运动仿真与样机试验,验证植苗机构设计的正确性及性能。

1 开沟式多杆植苗机构工作原理

开沟式多杆植苗机构主要包括五杆推苗机构OAFEB和四杆扶苗机构CDSZ两部分,两个机构间通过链传动传递运动和动力。图1为开沟式多杆植苗机构工作原理图。由人工或取苗机构将钵苗投入接苗管内,钵苗在自身重力作用下经接苗管掉落至开沟器底部,此时扶苗板下降至最低位置,与推苗摆板、推苗块、开沟器共同形成五面封闭箱形空间,起到扶苗作用,如图2a所示。主动曲柄盘组件的杆OA开始逆时针转动,以点A为转动中心的压轮与推苗摆板的杆件段KM接触(接触点为Q),带动推苗摆板向左摆动(拉簧将推苗摆板与机架连接,且始终处于张紧状态),进而带动推苗块从右极限位置向开沟器左侧开口方向运动,进而推动钵苗向左运动,如图2b所示(推苗阶段,推苗块始终与钵苗接触,防止钵苗发生倾倒)。同时,从动曲柄带动扶苗板上移,使蔬菜钵苗可以顺利被推出开沟器,并进入苗沟,如图2c所示。钵苗被推入苗沟后,在覆土轮的作用下,土壤回流至苗沟实现对钵苗的覆土和镇压。此时,推苗块向开沟器右侧方向运动,扶苗板开始下降,植苗机构完成一次钵苗栽植作业。

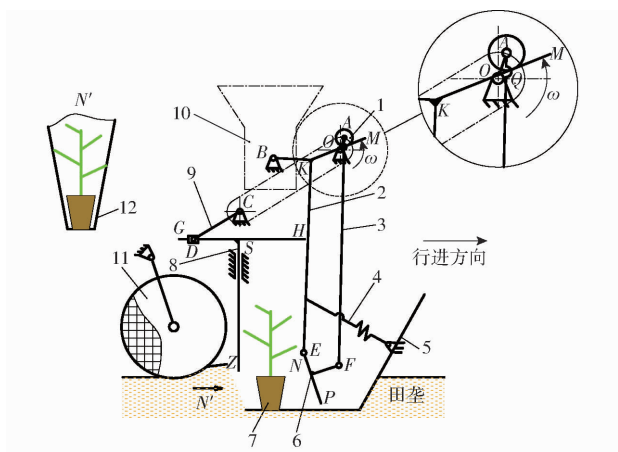


图1 开沟式多杆植苗机构工作原理图

Fig. 1 Working plan diagram of ditching multi-bar seedling planting mechanism

1. 主动曲柄盘组件 2. 推苗摆板 3. 连杆 4. 拉簧 5、12. 开沟器 6. 推苗块 7. 钵苗 8. 扶苗板 9. 从动曲柄 10. 接苗管 11. 覆土轮

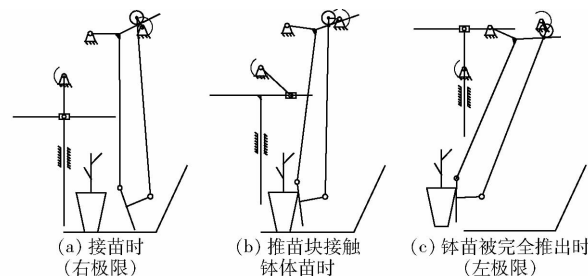


图2 植苗机构不同阶段运动简图

Fig. 2 Diagrams of different movement stages of planting mechanism

2 植苗机构运动学模型

开沟式多杆植苗机构包括推苗机构和扶苗机构两部分,需分别建立两部分机构的运动学模型。如图3所示,以主动曲柄回转中心点O为坐标原点、水平向右为x轴正方向建立直角坐标系。

2.1 推苗机构运动学模型

根据图3所示的平面几何关系,求得推苗机构中各点的位移方程。点A位移方程为

$$\begin{cases} x_A = l_{OA} \cos \theta \\ y_A = l_{OA} \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ ——曲柄OA转角

l_{OA} ——曲柄OA长度

$\angle BKE$ 为直角、点Q为压轮与杆件段KM的切点,由三角函数关系得

$$l_{KQ} = \sqrt{1 - \left(\frac{r - l_{BK} \sin \varphi_1}{l_{AB}} \right)^2} l_{AB} + l_{BK} \cos \varphi_1 \quad (2)$$

其中 $l_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$

式中 r——压轮半径

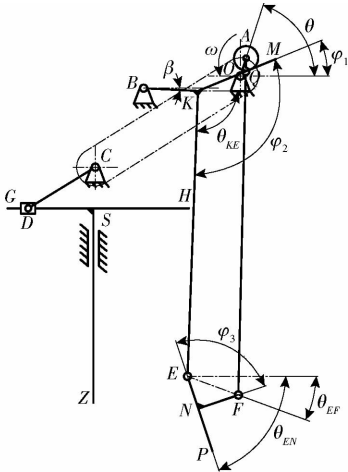


图 3 开沟式多杆植苗机构简图

Fig. 3 Schematic of ditching multi-bar seedling planting mechanism

φ_1 ——杆件段 BK 与 KM 的夹角

l_{KQ} ——推苗摆板上点 K 到切点 Q 的距离

l_{BK} ——推苗摆板上杆件段 BK 长度

l_{AB} ——机架铰链点 B 到压轮转动中心 A 的距离

得点 K 位移方程为

$$\begin{cases} x_K = x_B + l_{BK} \cos \beta \\ y_K = y_B + l_{BK} \sin \beta \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\beta = \arctan \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} - \arccos \frac{l_{AB}^2 + l_{BK}^2 - r^2 - l_{KQ}^2}{2l_{AB}l_{BK}}$

式中 β ——杆件段 BK 与 x 轴正方向夹角

设直线段 KM 的数学表达式为 $y = k_{KM}x + b_{KM}$,

可得

$$\begin{cases} y_K = k_{KM}x_K + b_{KM} \\ |y_A - k_{KM}x_A - b_{KM}| = r \sqrt{k_{KM}^2 + 1} \end{cases} \quad (4)$$

由于 $k_{KM} \geq 0$, 可求出 k_{KM} 和 b_{KM} , 求得点 M 的位移方程为

$$\begin{cases} x_M = x_K + l_{KM} \cos(\arctan k_{KM}) \\ y_M = y_K + l_{KM} \sin(\arctan k_{KM}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 l_{KM} ——杆件段 KM 长度

点 E 位移方程为

$$\begin{cases} x_E = x_K + l_{KE} \cos \theta_{KE} \\ y_E = y_K + l_{KE} \sin \theta_{KE} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\theta_{KE} = \arctan k_{KM} - \varphi_2$$

式中 φ_2 ——杆件段 EK 与 KM 的夹角

θ_{KE} ——杆件段 KE 与水平方向夹角

l_{KE} ——杆件段 KE 长度

l_{EF} ——动铰链点 E、F 之间的距离

点 F 位移方程为

$$\begin{cases} x_F = l_{EF} \cos \theta_{EF} + x_E \\ y_F = l_{EF} \sin \theta_{EF} + y_E \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$l_{EF} = \sqrt{l_{EN}^2 + l_{FN}^2 - 2l_{EN}l_{FN} \cos \varphi_3}$$

$$\theta_{EF} = \arctan \left| \frac{x_A - x_E}{y_A - y_E} \right| - \arctan \frac{l_{AE}^2 + l_{EF}^2 - l_{AF}^2}{2l_{AE}l_{EF}}$$

式中 θ_{EF} ——直线 EF 与水平方向夹角

l_{AE} ——压轮转动中心 A 与铰链点 E 的距离

l_{AF} ——压轮转动中心 A 与铰链点 F 的距离

φ_3 ——杆件段 EN 与 NF 的夹角

l_{EN} ——杆件段 EN 长度

l_{FN} ——杆件段 FN 长度

点 N 位移方程为

$$\begin{cases} x_N = x_E + l_{EN} \cos \theta_{EN} \\ y_N = y_E + l_{EN} \sin \theta_{EN} \end{cases} \quad (8)$$

点 P 位移方程为

$$\begin{cases} x_P = x_N + l_{NP} \cos \theta_{EN} \\ y_P = y_N + l_{NP} \sin \theta_{EN} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\theta_{EN} = \arctan \left(- \left| \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} \right| \right) - \arctan \frac{l_{EF}^2 + l_{EN}^2 - l_{FN}^2}{2l_{EF}l_{EN}}$$

式中 θ_{EN} ——杆件段 EN 与水平方向夹角

l_{NP} ——杆件段 NP 长度

2.2 扶苗机构运动学模型

如图 3 所示, 杆 OA 与杆 CD 的配合运动由传动比为 1 的链传动实现。杆 OA 初始角 θ_0 为 75° 。杆 CD 与 x 轴水平夹角 θ_{CD} 的初始值为 θ_{CD0} , 给定点 C 的坐标值 (x_C, y_C) , 可得到

$$\theta_{CD} = \theta + \theta_{CD0} - \theta_0 \quad (10)$$

点 D 位移方程为

$$\begin{cases} x_D = l_{CD} \cos \theta_{CD} \\ y_D = l_{CD} \sin \theta_{CD} \end{cases} \quad (11)$$

点 D 在杆段 GH 上移动, 通过几何关系可得点 Z 的位移方程为

$$\begin{cases} x_Z = x_C \\ y_Z = y_D - l_{SZ} \end{cases} \quad (12)$$

3 植苗机构优化设计

根据植苗机构的运动学模型, 基于 Matlab 编写开沟式多杆植苗机构辅助分析软件(图 4), 简化设计过程, 缩短植苗机构设计周期^[14-16]。

3.1 优化目标

图 5 为植苗机构接苗(右极限)、开始推苗和完成推苗(左极限)3 个关键时刻的推苗块姿态简图。根据钵苗栽植的农艺要求和植苗机构的设计要求, 确定 4 个优化目标:

(1) 为保证高速植苗时钵苗能顺利下落至开沟器底部, 同时要求在钵苗掉落时推苗块在图 5a 的初

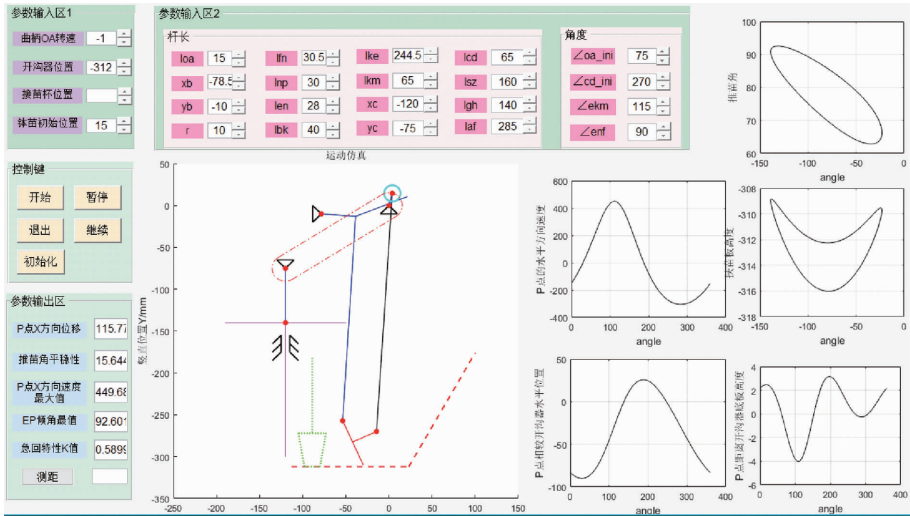


图 4 育苗机构辅助分析软件交互界面

Fig. 4 Interactive interface of planting mechanism aided analysis software

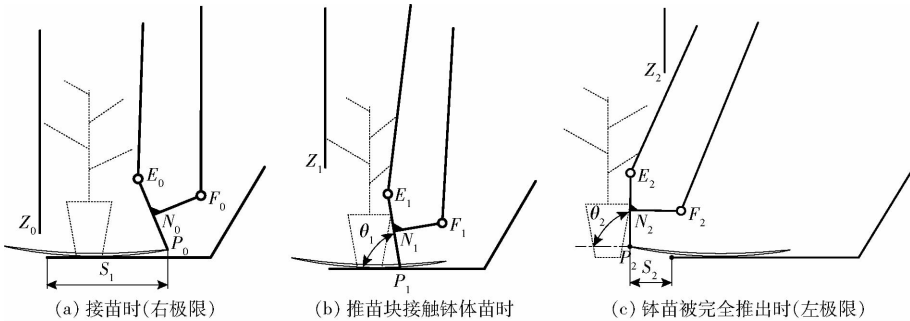


图 5 推苗机构运行时关键时刻的姿态

Fig. 5 Posture of seedling pushing mechanism at key moments during operation

始位置附近,避免钵苗与推苗块发生碰撞,确定 S_1 宜为 87 ~ 93 mm。

(2) 为保证钵苗被平稳地推送,推苗开始时刻推苗角 θ_1 应为 $80^\circ \sim 86^\circ$ 。

(3) 钵苗在被推出开沟器后要尽量处于竖直姿态,推苗结束时刻推苗角 θ_2 应为 $87^\circ \sim 93^\circ$ 。

(4) 为确保钵苗落入苗沟后仍处于直立状态,推苗块的推出距离 S_2 应为 24 ~ 30 mm。

将上述优化目标用函数表达,并进行归一化处理,即

$$f_1 = \frac{|x_{P_{\max}} - x_{GW} - 90|}{93 - 87} \quad (13)$$

$$f_2 = \frac{|\theta_1 - 83|}{86 - 80} \quad (14)$$

$$f_3 = \frac{|\theta_2 - 90|}{93 - 87} \quad (15)$$

$$f_4 = \frac{|x_{GW} - x_{P_{\min}} - 27|}{30 - 24} \quad (16)$$

式中 x_{GW} ——开沟器末端横坐标
 $x_{P_{\max}}$ ——点 P 在右极限位置横坐标
 $x_{P_{\min}}$ ——点 P 在左极限位置横坐标
通过分析各目标对育苗机构性能影响的重要

性,根据经验分别对各优化目标的加权因子赋值为 $\omega_1 = 0.3$ 、 $\omega_2 = 0.25$ 、 $\omega_3 = 0.3$ 、 $\omega_4 = 0.15$ 。得到最终的优化目标为

$$F = 1.8|x_{P_{\max}} - x_{GW} - 90| + 1.5|\theta_2 - 90| + 1.8|\theta_1 - 86| + 0.9|x_{GW} - x_{P_{\min}} - 90| \quad (17)$$

3.2 设计变量及约束条件

通过辅助分析软件交互界面的运动仿真窗口,利用单因素分析方法确定其中较为容易确定的较优参数值^[15-16],并对剩余参数进行分析并确定其取值范围,得到各参数取值如表 1 所示。因此,推苗机构设计变量确定为 x_B 、 l_{AF} 、 l_{BK} 、 l_{FN} 、 l_{KE} 。

表 1 设计参数

Tab. 1 Design parameters

参数	数值	参数	数值
l_{OA}/mm	15	l_{NP}/mm	30
y_B/mm	-10	l_{KM}/mm	65
r/mm	10	l_{EN}/mm	28
$\varphi_2/(\circ)$	115	$\varphi_3/(\circ)$	90
x_B/mm	-90 ~ -70	l_{AF}/mm	270 ~ 290
l_{BK}/mm	40 ~ 50	l_{FN}/mm	30 ~ 40
l_{KE}/mm	225 ~ 245		

3.3 优化结果

利用 Matlab 遗传算法工具箱对推苗机构进行参数优化^[17-18],当算法收敛时获得设计变量值分别为: $x_B = -78.5\text{ mm}$, $l_{AF} = 285\text{ mm}$, $l_{BK} = 40\text{ mm}$, $l_{FN} = 30.5\text{ mm}$, $l_{KE} = 244.5\text{ mm}$ 。将设计参数输入分析软件交互界面,求得各目标值分别为 $S_1 = 89\text{ mm}$, $\theta_1 = 82^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $S_2 = 26\text{ mm}$,满足优化目标要求。

推苗机构完成一次推苗作业,推苗块点 P 的轨迹、水平方向位移曲线如图 6 所示(以开沟器尾部为坐标原点,开沟器前端方向为负)。图 6b 中,点 a 表示推苗板处于右极限位置(图 5a),此时推苗板下端点 P 与开沟器尾部距离 $S_1 = 89\text{ mm}$;点 b 表示推苗块刚接触钵苗位置(图 5b);点 c 表示推苗块到达开沟器外部的左极限位置完成推苗(图 5c),此时推苗板下端点 P 与开沟器尾部距离 $S_2 = 26\text{ mm}$ 。

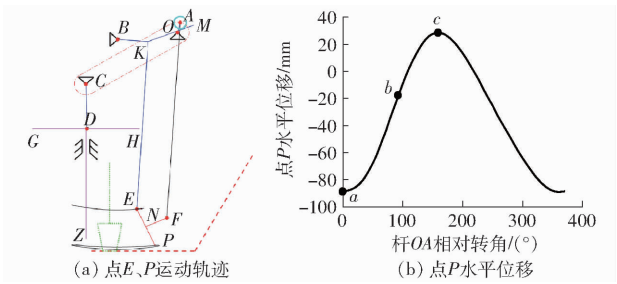


图 6 推苗块运动曲线

Fig. 6 Curves of pushing seedling block movement

利用辅助分析软件,运用人机交互界面对扶苗机构进行参数调试优化^[19-22],调试后各项参数值为: $\theta_{CD0} = 270^\circ$, $l_{CD} = 65\text{ mm}$, $l_{CH} = 140\text{ mm}$, $l_{SZ} = 160\text{ mm}$, $x_c = -120\text{ mm}$, $y_c = -75\text{ mm}$ 。扶苗机构完成一次扶苗作业,其扶苗板位移曲线如图 7 所示,当机构处于接苗状态时,扶苗板下端点 Z 距开沟器底部 20 mm ,当推苗结束时扶苗板距开沟器底部 139 mm 。

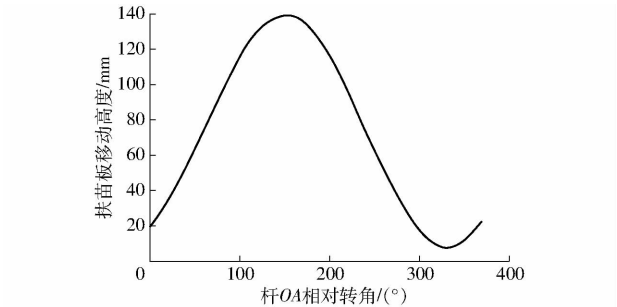


图 7 扶苗板位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of seedling supporting board

根据目前常用的 128 穴育苗盘尺寸(穴口顶部边长 32 mm 、底部边长 18 mm 、深 43 mm),确定植苗机构开沟器内部底端宽度为 32 mm ,保证钵苗不会向开沟器两侧倾倒;而且由于扶苗板下端与开沟器底部最大距离为 139 mm ,因此,该植苗机构适用于移栽采用 128 穴育苗盘育苗且整体高度低于 139 mm

的西兰花、番茄和辣椒等蔬菜钵苗。

4 植苗机构仿真分析

根据优化参数对植苗机构进行结构设计,利用 SolidWorks 建立三维模型,并导入 ADAMS 添加各零件间的相应约束,进行虚拟样机运动学仿真,获得推苗板的运动轨迹,如图 8 所示^[23-25]。从推苗板点 E 、 P 的运动轨迹可以得出推苗板 EP 在推苗过程中运行平稳,满足钵苗被平稳推入苗沟的工作要求;通过 ADAMS 运动学求解器获得推苗机构点 P 水平位移曲线和扶苗机构点 Z 位移曲线。

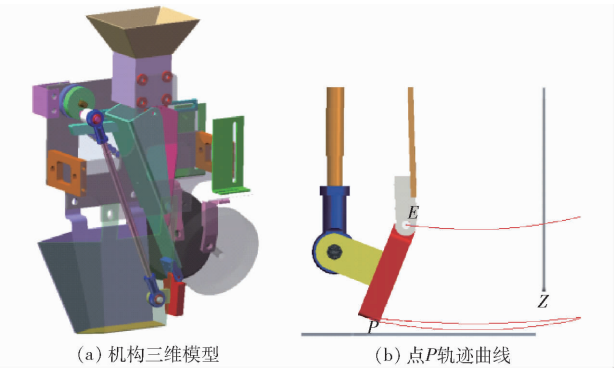


图 8 植苗机构仿真

Fig. 8 Simulation of seedling push mechanism

图 9 为仿真曲线与理论曲线,当推苗板处于开沟器内部右极限位置时,与开沟器尾部距离 S_1 为 87 mm ,与理论计算相差 2 mm ,扶苗板下端距开沟器底部 20 mm ;当推苗板完成推苗,处于开沟器外部左极限位置时,与开沟器尾部距离 S_2 为 27 mm ,与理论计算相差 1 mm ,扶苗板距开沟器底部为 139 mm 。综上,仿真与理论计算结果误差均小于 3% ,且仿真求得的点 P 水平位移、扶苗板移动高度与辅助分析软件交互界面中得到的曲线基本一致,验证了开沟式多杆植苗机构运动学模型和优化设计结果的正确性。

5 植苗机构样机试验

在完成开沟式多杆植苗机构虚拟仿真验证后,加工出植苗机构物理样机,如图 10 所示。在课题组前期研制的旋转土槽试验台上,搭建了植苗机构的半自动和全自动钵苗移栽试验台(半自动移栽由人工供苗;全自动移栽由配套取苗机构供苗),如图 11 所示,开展植苗试验。

试验时设定旋转土槽线速度为 100 mm/s 、开沟器开沟深度为 40 mm ,采用 128 穴育苗盘所育苗龄 30 d 的西兰花钵苗,苗高为 $100 \sim 130\text{ mm}$ (与多数移栽期的蔬菜钵苗尺寸近似^[22-23])。针对植苗机构在栽植速度 60 、 90 、 120 株/min 时,开展 3 组试验。

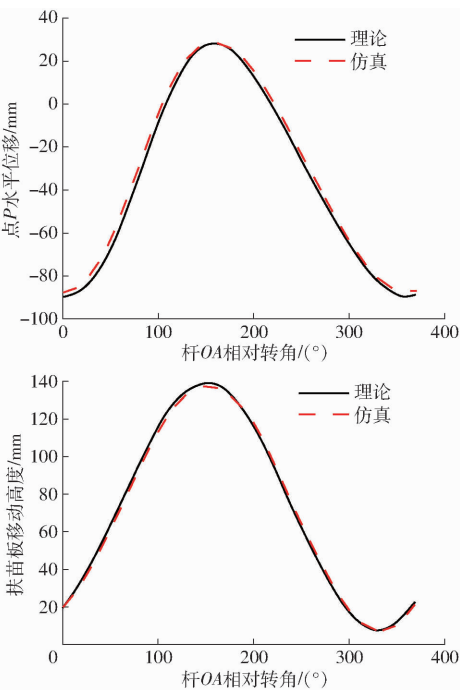


图9 理论与仿真曲线对比

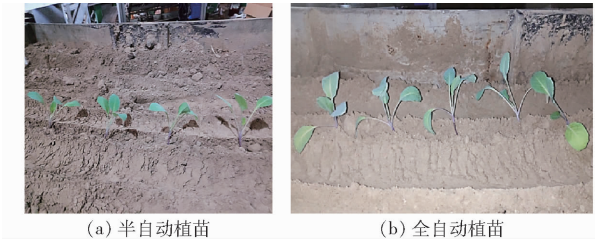


图12 育苗效果

Fig. 12 Seedling planting effect

表2 育苗试验结果

Tab. 2 Planting experiment results					
栽植速度/ (株·min ⁻¹)	育苗 方式	试验量/ 株	成功投 入钵苗 数/株	育苗合 格数/ 株	栽植合 格率/ %
60	半自动	50	50	50	100
	全自动	50	48	47	97.9
90	半自动	50	50	48	96.0
	全自动	50	45	43	95.6
120	半自动	50	50	46	92.0
	全自动	50	37	33	89.1

注:栽植合格率是以试验中的投入钵苗数为计算基数。

同等情况下,全自动钵苗移栽合格率略低于半自动钵苗移栽。

影响栽植合格率原因主要有:①试验时由于人工投苗频率不均匀性,会造成投苗频率与植苗机构接苗作业不匹配,进而导致漏苗或多株苗待推出的问题,降低了栽植合格率。②与取苗机构配合进行自动移栽试验时,取苗机构秧针夹钵取出的钵苗通过接苗管掉入开沟器底部,其钵体变得较原来松散,在高速推苗时推苗块与钵体相互作用造成少量钵体发生严重破损,导致钵苗的推苗姿态不理想,进而影响钵苗推入苗沟后的直立度和栽植合格率。

6 结论

(1)建立了植苗机构的运动学模型和优化设计模型,基于 Matlab 开发了植苗机构的计算机辅助分析软件,通过人机交互界面及 Matlab 遗传算法工具箱,优化得到满足植苗要求的机构参数。

(2)根据植苗机构优化参数完成了机构设计,并进行虚拟样机运动仿真试验,将推苗块仿真轨迹与理论轨迹进行对比,轨迹形状基本一致,且推苗板和扶苗板位移仿真结果与理论结果误差小于3%,验证了植苗机构运动学模型和优化设计结果的正确性。

(3)开展机构植苗试验,在半自动和全自动植苗试验中,当栽植速度为 60、90 株/min 时,栽植合格率均达到 95% 以上;当栽植速度达到 120 株/min 时,栽植合格率超过 89%,验证了该植苗机构对于半自动和全自动蔬菜钵苗移栽作业的适用性。

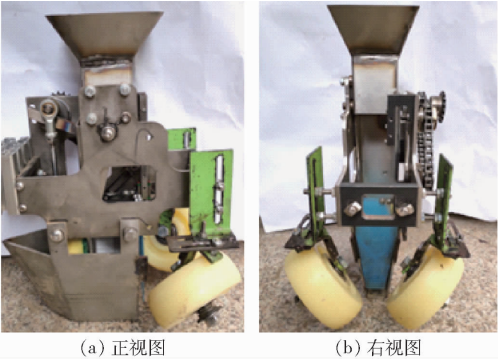


图10 植苗机构物理样机

Fig. 10 Physical prototype of planting mechanism

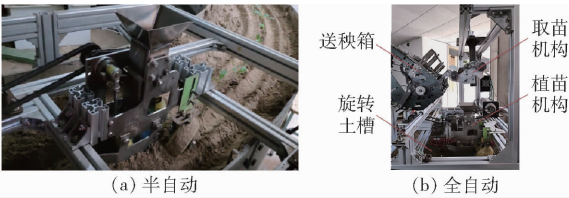


图11 钵苗移栽试验台

Fig. 11 Plug seedling transplanting test bench

每组半自动和全自动植苗试验各为 50 株。钵苗直立度用钵苗主茎与地面的所夹锐角进行衡量,当该角度大于 45°时为植苗合格,通过测量、统计并计算得到栽植合格率^[26-29],育苗效果如图 12 所示,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,栽植速度为 120 株/min 时,全自动栽植合格率最低,为 89.1%,半自动栽植合格率为 92%;当栽植速度为 60、90 株/min 时,栽植合格率均达到 95% 以上,验证了植苗机构设计的可靠性。随着栽植速度的提高,栽植合格率略有下降;在

参 考 文 献

- [1] 陈永生,刘先才,韩柏和,等.2020年中国蔬菜生产机械化发展报告[J].中国农机化学报,2021,42(6):1-9,34.
CHEN Yongsheng, LIU Xiancai, HAN Baihe, et al. Development report of China vegetable production mechanization in 2020 [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6):1-9,34. (in Chinese)
- [2] 陈大军,侯加林,施国英,等.国内旱地移栽机技术现状分析[J].中国农机化学报,2018,39(7):98-102.
CHEN Dajun, HOU Jialin, SHI Guoying, et al. Analysis on the current situation of technology of domestic dryland transplanter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7):98-102. (in Chinese)
- [3] 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. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):1-20. (in Chinese)
- [4] 金鑫,姬江涛,杨传华,等.凸轮-六杆式导苗机构设计及仿真[J].农机化研究,2016,38(11):137-144.
JIN Xin, JI Jiangtao, YANG Chuanhua, et al. Design and simulation of cam-six-bar guiding seedling mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):137-144. (in Chinese)
- [5] 孙裕晶,马成林,左春桢.组合振动式导苗机构试验研究[J].农业机械学报,2001,32(6):30-33.
SUN Yujing, MA Chenglin, ZUO Chunheng. Experimental investigation on combined guiding device with vibration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6):30-33. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 那明君,滕乐,周振响,等.全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):54-61.
NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Zhenxiang, et al. Design and experiment of fully automatic slide-track type dryland pot seedling transplanting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9):54-61. (in Chinese)
- [9] 陈建能,王伯鸿,任根勇,等.蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析[J].农业机械学报,2010,41(12):48-53.
CHEN Jianneng, WANG Bohong, REN Genyong, et al. Kinematics modeling and parameters analysis of seven-linkage vegetable seedling transplanting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):48-53. (in Chinese)
- [10] 何小晶,孙新城,陈建能,等.双曲柄五杆栽植机构运动学分析[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2016,35(2):198-204.
HE Xiaojing, SUN Xincheng, CHEN Jianneng, et al. Kinematics analysis of double-crank five-bar planting mechanism [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science), 2016, 35(2):198-204. (in Chinese)
- [11] 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. Test on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3):19-25. (in Chinese)
- [12] 毛鹏军,李晶,张松鸽,等.七杆式移栽机栽植机构运动学分析-基于 MATLAB [J].农机化研究,2013,35(12):59-62.
MAO Pengjun, LI Jing, ZHANG Songge, et al. Kinematic analysis of seven-rod planting mechanism of seedling transplanter-base on MATLAB [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12):59-62. (in Chinese)
- [13] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):113-121. (in Chinese)
- [14] 叶秉良,唐涛,俞高红,等.组合式非圆齿轮行星轮系取苗机构动力学分析与试验[J].农业机械学报,2018,49(12):74-82.
YE Bingliang, TANG Tao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests on seedling pick-up mechanism of planetary gear train of combined gear transmission with non-circular gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):74-82. (in Chinese)
- [15] 申屠留芳,吴旋,孙星钊,等.基于遗传算法的红薯栽植机构设计[J].中国农机化学报,2019,40(12):6-11.
SHENTU Liufang, WU Xuan, SUN Xingzhao, et al. Design of sweet potato planting mechanism based on genetic algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12):6-11. (in Chinese)
- [16] 叶秉良,李丽,俞高红,等.蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J].农业机械学报,2014,45(6):70-78.
YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetabl pot-seedling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):70-78. (in Chinese)
- [17] 王磊,孙良,徐亚丹,等.基于遗传算法的三臂轮式栽植机构多位姿运动综合[J].农业机械学报,2022,53(6):70-77.

WANG Lei,SUN Liang,XU Yadan,et al. Multi-pose motion synthesis of three-arm gear train planting mechanism based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):70-77. (in Chinese)

[18] 刘姣娣,曹卫彬,田东洋,等. 钵苗有效零速移栽栽植机构运动学分析与试验[J]. 机械工程学报,2017,53(7):76-84. LIU Jiaodi,CAO Weibin,TIAN Dongyang,et al. Kinematic analysis and test on transplanting mechanism with effective zero-speed transplanting on mulch film[J]. Journal of Mechanical Engineering,2017,53(7):76-84. (in Chinese)

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

[20] POPOV V L. Contact mechanics and friction: physical principles and applications[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[21] 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.

[22] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):65-72. YIN Daqing,ZHANG Nuoyi,ZHOU Maile,et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):65-72. (in Chinese)

[23] 任玲,赵斌栋,曹卫彬,等. 穴苗移栽机双旋转式分苗装置设计[J]. 农业工程学报,2021,37(8):10-18. REN Ling,ZHAO Bindong,CAO Weibin,et al. Design of double-rotation seedlings separating device for transplanters[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(8):10-18. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 吴国环,俞高红,周海丽,等. 三臂回转式水稻钵苗移栽机构反求设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):84-91,149. WU Guohuan,YU Gaohong,ZHOU Haili,et al. Reverse design and tests of three-arms rotary rice seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):84-91,149. (in Chinese)

[26] 任永飞,李杰,林蜀云,等. 一种新型曲柄五连杆移栽机栽植机构平衡分析[J]. 农机化研究,2017,39(4):47-50. REN Yongfei,LI Jie,LIN Shuyun,et al. Balance analysis of planting mechanism of a new type of crank five-bar linkages transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(4):47-50. (in Chinese)

[27] 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲,等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):49-57. WANG Mengmeng,SONG Jiannong,LIU Cailing,et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(14):49-57. (in Chinese)

[28] 张开兴,宋超,王洪波,等. 钵苗移栽机五杆式栽植机构的设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(2):62-66. ZHANG Kaixing,SONG Chao,WANG Hongbo,et al. Design and experiment of five bar planting mechanism for bowl seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(2):62-66. (in Chinese)

[29] 薛向磊,王磊,许春林,等. 旱田钵苗移栽机纵向送苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):76-84. XUE Xianglei,WANG Lei,XU Chunlin,et al. Optimal design and experiment of longitudinal feeding-seedling device of potted seedling transplanter for upland field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):76-84. (in Chinese)