

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.009

移栽机小株距栽植机构杆件优化与试验

李鹏斌¹ 颜华^{1,2} 王品隆¹ 李凝³ 吴海华¹ 韩绿化⁴

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;
3. 贵州省山地农业机械研究所, 贵阳 550002; 4. 江苏省现代农业装备与技术协同创新中心, 镇江 212013)

摘要: 针对贵州地区辣椒种植宜机收簇生品种小株距膜上移栽农艺要求,对井关 PVHR2 型移栽机进行改造。在将机具最小株距由 300 mm 减小为 150 mm 后,分析株距减小前后栽植轨迹变化,以减小穴口宽度为目标,综合考虑栽植装置与整机空间位置关系、鸭嘴开合时间、入土及接苗时的姿态等,对栽植机构的杆件进行优化。仿真优化后,栽植穴口宽度由 91.1 mm 减小为 66.3 mm,按照优化后的尺寸进行了膜上移栽试验,试验结果表明,因地膜自身弹性,穴口宽度较理论分析尺寸都略小,优化后的栽植装置在株距 150 mm 时,穴口宽度约为 60 mm,满足使用要求。

关键词: 移栽机; 膜上移栽; 轨迹优化; 试验

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0072-07

Optimization and Test of Small Plant Spacing Planting Mechanism Rod for Transplanter

LI Pengbin¹ YAN Hua^{1,2} WANG Pinlong¹ LI Ning³ WU Haihua¹ HAN Lühua⁴

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

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China

3. Guizhou Mountain Agricultural Machinery Research Institute, Guiyang 550002, China

4. Jiangsu Modern Agricultural Equipment and Technology Collaborative Innovation Center, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: According to the agronomic requirements of small plant spacing for transplanting of clustered varieties of Guizhou pepper planting suitable for machine harvesting, the ISEKI PVHR2 transplanter was modified. After reducing the minimum plant spacing of the machine from 300 mm to 150 mm, the trajectory changes before and after plant spacing reduction were analyzed. With the goal of reducing the size of the hole and taking into account of the spatial position relationship between the planting device and the whole machine, the opening and closing time of the duckbill and the posture when entering the soil and receiving the seedlings, etcetera, the rods of the planting device were optimized. The optimized simulation results showed that the size of the hole was reduced from 91.1 mm to 66.3 mm. The transplanting experiment on the film was carried out according to the optimized size, and the test results showed that the width of the hole was slightly smaller than the theoretical analysis due to the elasticity of the mulch. The optimized planting device had a hole size of about 60 mm when the planting distance was 150 mm, which met the requirements of use.

Key words: transplanting machine; transplanting on film; trajectory optimization; test

0 引言

辣椒种植在贵州省农业生产中占有相当重要的地位,目前,栽培面积在 30 万公顷以上,鲜椒产量 578 万吨,产值达 578 亿元,均居全国第一^[1]。近年

来,贵州省辣椒产业规模逐渐扩大,已成为带动贵州省农民脱贫致富的大产业,得到政府和业界的认同与高度重视,作为当前贵州省重点发展的产业之一^[2]。

传统的辣椒品种,种植株距 400 mm 左右,成熟

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5708)、江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(4091600005)和江苏省重点研发计划项目(SBE2020310271)

作者简介: 李鹏斌(1996—),男,硕士生,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: 2579498308@qq.com

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

期不一致,不利于机械采摘,一般需要多次人工采摘,导致采收周期长、人工成本高,制约了辣椒产业的整体发展。从 2017 年开始,贵州省农业科学院辣椒研究所整合相关科研资源,初步鉴定出适于机械采收的簇生型辣椒新品种—“机收 08-1”和“辣研 102”,该新品种辣椒集中朝天生长,成熟期一致,青椒或红椒均可一次性机械化采收。但是,簇生辣椒单株产量低于传统辣椒品种,当簇生辣椒和传统辣椒的栽植株距相等时,辣椒产量降低,导致经济收益降低^[3]。针对这一问题,需将传统大株距种植模式转变为小株距密植模式,株距减小为 150 mm 左右,以提高簇生辣椒的产量^[4]。

目前,应用于辣椒移栽的机器多为半自动移栽机,综合考虑贵州地区多山地丘陵,地块较小,土壤黏重、透水性差,需进行垄作膜上移栽等因素,经过对现有的国内外半自动移栽机机型筛选,选择并关 PVHR2 型移栽机作为目标机型。该机型小巧,操控方便,适于小地块;具有栽深仿形功能,地形适应性强,适用于垄作;采用鸭嘴栽植器可实现膜上移栽,且栽植合格率高;该机型不足之一是株距范围为 300~600 mm,不满足簇生辣椒密植要求,需对该机型进行小株距改造;同时由于株距减小后会造穴口株距占比过大,使得两相邻穴口之间的地膜过窄,撕裂地膜^[5-6],本文对原机栽植机构进行杆件优化,以解决上述问题,并进行性能试验。

1 栽植机构数学建模

原机具栽植机构如图 1 所示,发动机动力经主变速箱后,其中一路由万向传动轴传至栽植传动箱,带动栽植机构运动;另一路经链轮箱传至轮毂,驱动机器行走。栽植机构平面图如图 2 所示,杆 L1 和 L3 为主动杆件,逆时针旋转带动 L2、L4、L9 等从动杆件运动,结合导苗装置,完成接苗、开合、栽植等动作^[7]。

为分析栽植穴口,栽植器姿态,需对栽植器点 K



图 1 原机栽植机构结构图

Fig. 1 Structure drawing of original planting mechanism

1. 栽植传动箱 2. 栽植杆件 3. 鸭嘴栽植器

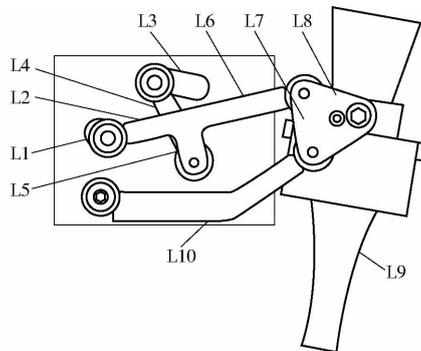


图 2 栽植机构平面图

Fig. 2 2D diagram of planting mechanism

轨迹进行分析,栽植机构的结构示意图如图 3 所示,以点 A 为坐标原点建立平面直角坐标系^[8-14]。各杆角位移以 x 轴正方向为基准,逆时针为正,机组前进方向为 x 轴负方向。 $L_1 \sim L_{10}$ 分别表示杆 AB、BE、CD、DF、EF、EG、GI、HJ、JK、IL 的长度(mm), $\phi_1 \sim \phi_8$ 分别表示杆 AB 的初始相位角、杆 BG 的角位移、杆 CD 的初始相位角、杆 DF 的角位移、杆 GI 的角位移、杆 HJ 的角位移、杆 GI 的角位移、杆 IL 的角位移, α 表示杆 JK 与竖直方向夹角, β 表示杆 HI 与杆 HJ 夹角, γ 表示杆 HJ 与杆 JK 夹角。

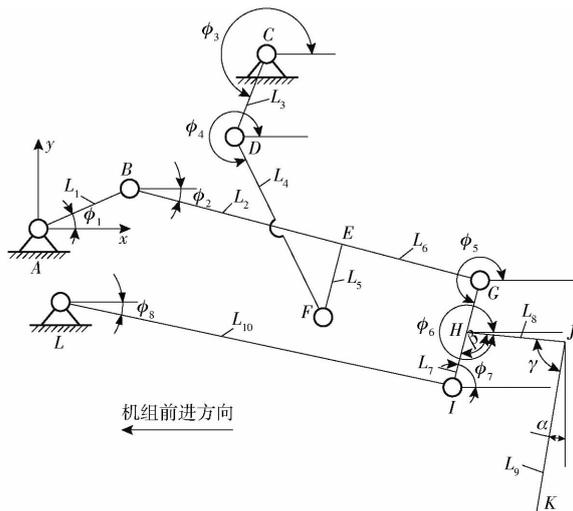


图 3 栽植机构结构示意图

Fig. 3 Schematic of planting mechanism

首先求各点的相对位移坐标。

点 B 的位移方程为

$$\begin{cases} x_B = L_1 \cos(\phi_1 + \phi) \\ y_B = L_1 \sin(\phi_1 + \phi) \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϕ ——杆 AB 的角位移

点 F 的位移方程为

$$\begin{cases} x_F = L_1 \cos(\phi_1 + \phi) + L_2 \cos\phi_2 + L_5 \sin\phi_2 = \\ \quad x_C + L_3 \cos(\phi_3 + \phi) + L_4 \cos\phi_4 \\ y_F = L_1 \sin(\phi_1 + \phi) + L_2 \sin\phi_2 - L_5 \cos\phi_2 = \\ \quad y_C + L_3 \sin(\phi_3 + \phi) + L_4 \sin\phi_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 (x_C, y_C) ——点 C 的坐标

整理可得

$$\begin{cases} L_4 \sin \phi_4 = L_1 \sin(\phi_1 + \phi) - L_3 \sin(\phi_3 + \phi) - y_C + \\ L_2 \sin \phi_2 - L_5 \cos \phi_2 \\ L_4 \cos \phi_4 = L_1 \cos(\phi_1 + \phi) - L_3 \cos(\phi_3 + \phi) - x_C + \\ L_2 \cos \phi_2 + L_5 \sin \phi_2 \end{cases} \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} m = L_1 \cos(\phi_1 + \phi) - L_3 \cos(\phi_3 + \phi) - x_C \\ n = L_1 \sin(\phi_1 + \phi) - L_3 \sin(\phi_3 + \phi) - y_C \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可得

$$\begin{aligned} L_4^2 &= m^2 + n^2 + L_2^2 + L_5^2 + \\ &\sqrt{(2nL_2 + 2mL_5)^2 + (2mL_2 - 2nL_5)^2} \sin(\phi_2 + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tan \varphi = \frac{2mL_2 - 2nL_5}{2nL_2 + 2mL_5}$$

$$\phi_2 = \arcsin \frac{-(L_4^2 - m^2 - n^2 - L_2^2 - L_5^2)}{\sqrt{(2nL_2 + 2mL_5)^2 + (2mL_2 - 2nL_5)^2}} - \varphi \quad (6)$$

点 G 的位移方程为

$$\begin{cases} x_G = x_B + (L_2 + L_6) \cos \phi_2 \\ y_G = y_B + (L_2 + L_6) \sin \phi_2 \end{cases} \quad (7)$$

点 I 的位移方程为

$$\begin{cases} x_I = x_L + L_{10} \cos \phi_8 = x_C - L_7 \cos \phi_7 \\ y_I = y_L + L_{10} \sin \phi_8 = y_C - L_7 \sin \phi_7 \end{cases} \quad (8)$$

整理可得

$$2L_{10} \sqrt{(x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2} \sin(\phi_8 + \phi_1) = L_{10}^2 - L_7^2 + (x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2 \quad (9)$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{x_C - x_L}{y_C - y_L}$$

$$\phi_8 = \arcsin \frac{L_{10}^2 - L_7^2 + (x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2}{2L_{10} \sqrt{(x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2}} - \varphi_1 \quad (10)$$

式中 (x_L, y_L) ——点 L 的坐标

由于点 H 为杆 GI 的中点,故点 H 位移方程为

$$\begin{cases} x_H = \frac{x_G + x_I}{2} \\ y_H = \frac{y_G + y_I}{2} \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)可得

$$2L_7 \sqrt{(x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2} \sin(\phi_7 + \phi_2) = L_7^2 - L_{10}^2 + (x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2 \quad (12)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{x_C - x_L}{y_C - y_L}$$

$$\phi_7 = \arcsin \frac{L_7^2 - L_{10}^2 + (x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2}{2L_7 \sqrt{(x_C - x_L)^2 + (y_C - y_L)^2}} - \phi_2 \quad (13)$$

$$\phi_6 = \phi_7 + \pi + \gamma \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi_6 + \gamma \quad (15)$$

点 K 的位移方程为

$$\begin{cases} x_K = -v_x t + x_H + L_8 \cos \phi_6 - L_9 \sin \alpha \\ y_K = y_H + L_8 \sin \phi_6 - L_9 \cos \alpha \end{cases} \quad (16)$$

式中 v_x ——机组在水平方向的速度

t ——时间

2 株距减小前后栽植轨迹及穴口宽度对比

为实现小株距移栽,通过增大栽植行走速比,将株距减半,达到密植的目的^[15]。本文在行走传动系统设计了二挡变速箱,快挡与原机速度一致,慢挡时行走速度减慢至原机 1/2,实现株距减小 1/2,变速箱位置如图 4 所示。快挡时株距范围为 300 ~ 600 mm,慢挡时株距范围减半为 150 ~ 300 mm。

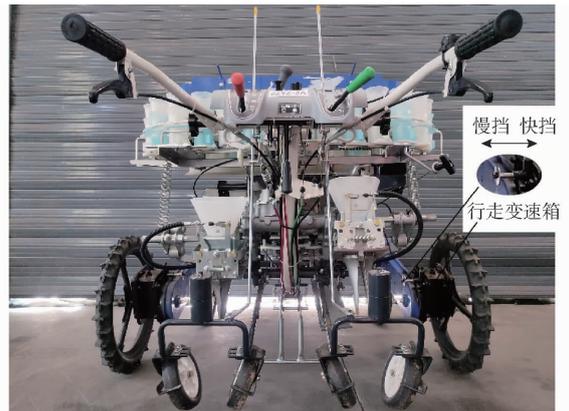


图 4 行走变速箱位置图

Fig. 4 Location of travelling gearbox

利用所得点 K 数学模型,并结合原机栽植机构的杆件尺寸,通过仿真得出栽植轨迹。栽植深度为 50 mm、株距 300 mm 时,仿真结果如图 5a 所示;栽植株距为 150 mm,仿真结果如图 5b 所示。其中,箭头方向为机组前进方向,红色曲线为静轨迹,黑色曲线为动轨迹,黑色直线为土壤平面。

通过三维仿真可知,最大栽植穴口在鸭嘴入土和出土时形成,鸭嘴栽植器最下端宽度约为 40 mm。由仿真结果可知,当不改变栽植传动杆件时,栽植深度为 50 mm,株距 300 mm,加上鸭嘴宽度 40 mm,栽植穴口宽度为 68.6 mm,穴口宽度占株距百分比为 22.9%,地膜连接部分长度为 231.4 mm;当栽植株距减小为 150 mm,栽植穴口宽度为 91.1 mm,穴口

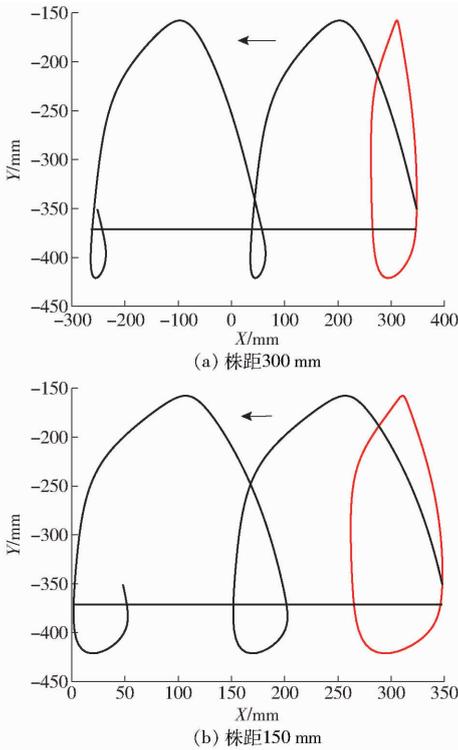


图5 不同株距时的栽植轨迹

Fig. 5 Planting trajectory with different planting distances

宽度占株距百分比为 60.7%，地膜连接部分长度为 58.9 mm。因株距较小，穴口宽度占株距比较大，相邻穴口间的地膜连接部分变短，地膜容易撕开，因此需对栽植机构杆件进行优化，以减小穴口宽度。

3 栽植机构杆件优化

为最大减少改造工作量，对栽植传动箱体及鸭嘴栽植器不做改动，仅对栽植杆件进行优化，改变栽植轨迹，减小穴口宽度。

3.1 设计变量确定

如图 3 所示，根据栽植机构杆件运动关系和尺寸可知：杆 AB 和杆 CD 的相位差为定值，杆 AB 、 CD 、 JK 的长度已知，点 A 、 C 和 L 相对位置固定。通过优化杆件的长度参数 L_2 、 $L_4 \sim L_8$ 、 L_{10} 和角度参数 β 、 γ ，可得出设计变量为

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9] = [L_2 \ L_4 \ L_5 \ L_6 \ L_7 \ L_8 \ L_{10} \ \beta \ \gamma]$$

3.2 目标函数建立

设计要求为减小栽植穴口宽度，故目标函数为

$$K_{\min} = X_R - X_L$$

式中 K_{\min} ——穴口宽度

X_R ——栽植深度为 50 mm 时栽植曲线上上升段的横坐标

X_L ——栽植深度为 50 mm 时栽植曲线下下降段的横坐标

3.3 约束条件确定

确定约束条件时，综合考虑以下因素：

(1) 栽植器喇叭口纵向约束，避免鸭嘴栽植器运动到最高点时与导苗筒干涉，利用 Matlab 编写约束函数为

$$p_y = \text{real}(\max(y_p));$$

$$y = p_y - (235 - 5);$$

其中，点 p 为运动轨迹上的活动点， $\max(y_p)$ 为点 p 在 Y 方向的最大值，235 mm 为导苗筒下沿到鸭嘴运动最低点的距离，5 mm 为防止喇叭口与导苗筒干涉余量。

(2) 栽植器喇叭口横向约束，确保秧苗能准确落入喇叭口^[16]，约束函数为

$$m = \text{find}(y_p = \max(y_p));$$

$$xp(m(1));$$

$$\text{if } \text{abs}(xp(m(1)) - 246) < 15$$

$$y = 1;$$

$$\text{else}$$

$$y = 0;$$

其中， m 为循环值， $xp(m(1))$ 是点 p 在 Y 方向取最大值时的横坐标，246 mm 为导苗筒中心线的横坐标，喇叭口中心线与导苗筒中心线偏移量为 15 mm 内。

(3) 轨迹斜率约束，鸭嘴下行与回程斜率约束范围为 $70^\circ \sim 110^\circ$ ，减小鸭嘴栽插过程土壤阻力^[17-18]，约束函数为

$$k(i) = \sin(F9(i)) / \cos(F9(i));$$

$$\text{if } \text{abs}(k(i)) > 2.74$$

$$N(i) = 1;$$

$$\text{else}$$

$$N(i) = 0;$$

其中， $F9(i)$ 为杆件 $L9$ 与水平方向的夹角，2.74 为 70° 的正切值。

(4) 与原栽植装置鸭嘴入土后打开时刻一致，鸭嘴到最低点时瞬间打开，减少鸭嘴内部积土；约束函数为

$$y_{\min} = \min(y_k);$$

$$Dt_{\min} = \text{find}(y_k = y_{\min});$$

$$\text{if } \text{abs}(Dt_{\min} - 83) < 3$$

$$y = 1;$$

$$\text{else}$$

$$y = 0;$$

其中， $\min(y_k)$ 为点 K 在 Y 方向的最小值， Dt_{\min} 为循环值，将控制鸭嘴开合的凸轮转动一圈时间设定为 1 s，步长为 0.1 s，经测量，控制鸭嘴开合的凸轮从循环值为 0 转动 83% 时鸭嘴完全打开，3 为鸭嘴

打开余量。

(5)与原栽植装置鸭嘴上行闭合时刻一致,确保在接苗时鸭嘴闭合;轨迹高度方向约束,鸭嘴闭合前最低点高于苗顶,避免带苗,最大苗高限定为160 mm^[19-22]。约束函数为

```

m = find(yp == max(yp));
if (m(1) > 28) && (yk(24) > min(yk) + 160)
y = 1;
else
y = 0;

```

经测量,控制鸭嘴开合的凸轮从循环值为0转动24%时鸭嘴开始闭合,从0转动28%时完全闭合。

3.4 优化方法及结果

采用 Matlab 遗传算法 $ga()$ 函数求解,得到最优解

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \\ L_7 \\ L_8 \\ L_{10} \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 97.1 \\ 108.3 \\ 64.9 \\ 143.3 \\ 71.7 \\ 80.9 \\ 230.7 \\ 99.8 \\ 88.7 \end{bmatrix}$$

目标函数值即最小穴口宽度为26.5 mm。

将优化后的杆件尺寸圆整得: $L_2 = 97$ mm, $L_4 = 108$ mm, $L_5 = 65$ mm, $L_6 = 143$ mm, $L_7 = 72$ mm, $L_8 = 81$ mm, $L_{10} = 231$ mm, $\beta = 100^\circ$, $\gamma = 89^\circ$,所得仿真结果如图6所示。通过三维仿真可知,最大栽植穴口在鸭嘴入土和出土时形成,由图可见,栽植株距为150 mm、栽植深度50 mm时,加上鸭嘴宽度40 mm,栽植穴口宽度为66.3 mm,穴口宽度占株距百分比为44.2%,地膜连接部分长度为83.7 mm。与原机具相同株距和深度状态相比,穴口宽度减小了24.8 mm,穴口宽度占株距百分比减小16.5个百分点,即地膜连接部分长度增加24.8 mm,达到了优化目的。

4 性能试验

按照优化圆整后的尺寸,加工出栽植机构杆件,替换原机具一侧栽植机构杆件,并进行性能试验。试验环境如图7所示,土壤含水率为20%,按照垄高250 mm、上垄宽700 mm、下垄宽900 mm的要求起垄,并覆以厚度为1 mm的地膜。选用的辣椒苗苗龄40 d,平均苗高160 mm。性能试验实际栽植效

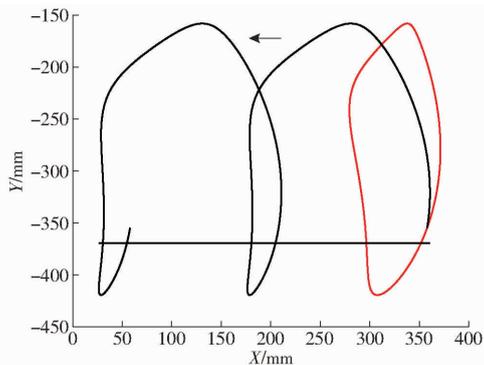


图6 优化后的栽植轨迹

Fig. 6 Optimized planting trajectory

果如图8所示。通过对左右两行秧苗穴口宽度对比分析,因地膜弹性较好,两种条件下的穴口宽度均较理论分析值略小,优化前的栽植穴口宽度约为90 mm,优化后约为60 mm,优化结果符合小株距移栽的要求。



图7 土槽试验环境

Fig. 7 Experimental environment of soil trough laboratory



(a) 优化前后栽植穴口情况对比 (b) 优化前栽植穴口情况 (c) 优化后栽植穴口情况

图8 实际栽植效果图

Fig. 8 Drawing of actual planting effects

5 结论

(1)为适应小株距辣椒移栽,对开关PVHR2型移栽机的栽植行走传动系统优化前后的栽植轨迹变化进行分析,优化前栽植株距为150 mm时,穴口宽度占株距百分比为60.7%,地膜连接长度58.9 mm。

(2)为防止小株距移栽时地膜撕裂,以减小穴口宽度为目标,通过 Matlab 遗传算法 $ga()$ 函数对栽植杆件进行优化,优化后株距为150 mm,穴口宽

度占株距百分比为 44.2%, 地膜连接长度增至 83.7 mm。

弹性较好, 两种条件下的穴口宽度均较理论分析值略小, 优化前的栽植穴口宽度约为 90 mm, 优化后约为 60 mm。

(3) 样机垄作膜上移栽性能试验表明, 因地膜

参 考 文 献

- [1] 詹永发, 田应书. 贵州辣椒产业发展存在的问题及对策[J]. 农技服务, 2020, 37(2): 89-91.
ZHAN Yongfa, TIAN Yingshu. Problems and countermeasures in the development of pepper industry in Guizhou [J]. Agricultural Technology Service, 2020, 37(2): 89-91. (in Chinese)
- [2] 任卫卫, 付小松, 张万萍, 等. 贵州地方辣椒品种资源主要类别、分布及利用潜力[J]. 长江蔬菜, 2015(2): 6-12.
REN Weiwei, FU Xiaosong, ZHANG Wanping, et al. The main types, distribution and utilization potential of local pepper varieties resources in Guizhou [J]. Yangtze River Vegetables, 2015(2): 6-12. (in Chinese)
- [3] 詹永发, 周光萍, 田应书, 等. 贵州省辣椒栽培历史及主要类型与分布研究[J]. 北京农业, 2015(27): 35-39.
ZHAN Yongfa, ZHOU Guangping, TIAN Yingshu, et al. Study on the history, main types and distribution of pepper cultivation in Guizhou [J]. Beijing Agriculture, 2015(27): 35-39. (in Chinese)
- [4] IMRAN M S, ABDUL M M S, KHALIL A N M, et al. Design of transplanting mechanism for system of rice intensification (SRI) transplanter in Kedah, Malaysia [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [5] 李华, 曹卫彬, 李树峰, 等. 2ZX-2 型全自动蔬菜穴盘苗铺膜移栽机的研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 23-33.
LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Development of 2ZX-2 automatic vegetable plug seedling film laying and transplanting machine [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 23-33. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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 of pot seedling transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 62-66. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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. Kinematics analysis of transplanting mechanism of seven-bar transplanter—based on Matlab [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 59-62. (in Chinese)
- [11] 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. Motion analysis and performance test of cam swing-rod type planting mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 34-41. (in Chinese)
- [12] 尹文庆, 刘海马, 胡飞, 等. 旱地栽植机八连杆栽植机构的优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 51-60.
YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimization design and experiment of eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51-60. (in Chinese)
- [13] 肖名涛, 孙松林, 罗海峰, 等. 双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 25-33.
XIAO Mingtao, SUN Songlin, LUO Haifeng, et al. Kinematics analysis and experiment of double parallel multi-pole planting mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 25-33. (in Chinese)
- [14] 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-five-bar planting mechanism of rape pot seedling transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49-56. (in Chinese)
- [15] KIM Y S, KIM H G, KIM Y J, et al. Development of performance evaluation methods considering work loads for riding type vegetable transplanter [C]//ASABE 2018 Annual International Meeting, 2018.
- [16] 姬江涛, 杨林辉, 金鑫, 等. 行星轮系滑道式钵苗栽植机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 83-92.
JI Jiangtao, YANG Linhui, JIN Xin, et al. The design and parameter optimization of the planting mechanism of the planetary gear slide type pot seedlings [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 83-92. (in Chinese)
- [17] 陈建能, 夏旭东, 王英, 等. 钵苗在鸭嘴式栽植机构中的运动微分方程及应用试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):

31-39.

CHEN Jianneng, XIA Xudong, WANG Ying, et al. Differential equation of motion of pot seedlings in duckbill planting mechanism and application experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 31-39. (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. Kinematics analysis and experiment of effective zero-speed transplanting planting mechanism for pot seedlings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 76-84. (in Chinese)
- [19] 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. Optimized design and experiment of duckbill planting mechanism with high-speed changing posture receiving seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65-72. (in Chinese)
- [20] 吴畏,孙松林,肖名涛,等. 2ZY-1型烟草移栽机栽植器的优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 166-170.
WU Wei, SUN Songlin, XIAO Mingtao, et al. Optimal design of 2ZY-1 tobacco transplanter planting institution[J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2012, 10(2): 166-170. (in Chinese)
- [21] 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]. China Agricultural Mechanization Research, 2019, 40(12): 6-11. (in Chinese)
- [22] 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 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78-86. (in Chinese)

(上接第46页)

- [26] 宋鹏,张俊雄,李伟,等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 71-74.
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71-74. (in Chinese)
- [27] 李雷霞,郝志明,杨薇,等. 精密播种机排种性能检测系统的研制[J]. 农业工程, 2012, 2(8): 16-19.
LI Leixia, HAO Zhiming, YANG Wei, et al. Design of seeding performance detection system for precision seeder [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(8): 16-19. (in Chinese)
- [28] 金宏亮,邱立春,钱伟. 播种机排种监测系统设计与试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(6): 743-746.
JIN Hongliang, QIU Lichun, QIAN Wei. Design and experiment of seeding monitoring system for seed drill[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(9): 743-746. (in Chinese)
- [29] 赵斌,匡丽红,张伟. 气吸式精播机种、肥作业智能计量监测系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 147-153.
ZHAO Bin, KUANG Lihong, ZHANG Wei. Seed and fertilizer intelligent gauging and monitoring system of suction precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 147-153. (in Chinese)
- [30] 张锡志,李敏,孟臣. 精密播种智能监测仪的研制[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 136-139.
ZHANG Xizhi, LI Min, MENG Chen. Research and development of precision seeding intelligent monitor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 136-139. (in Chinese)
- [31] 窦钰程,欧阳斌林,陈海涛. 光敏式气吸播种机监测装置研究[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 133-136.
DOU Yucheng, OUYANG Binlin, CHEN Haitao. Study on photosensitive-type suction planter monitoring apparatus [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(9): 133-136. (in Chinese)
- [32] 张继成,陈海涛,欧阳斌林,等. 基于光敏传感器的精密播种机监测装置[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(2): 265-268, 273.
ZHANG Jicheng, CHEN Haitao, OUYANG Binlin, et al. Monitoring system for precision seeders based on a photosensitive sensor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(2): 265-268, 273. (in Chinese)
- [33] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机排种器性能监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 69-75.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on performance monitoring system of no-tillage planter seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 69-75. (in Chinese)
- [34] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机漏播补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 69-77, 120.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on no-tillage planter reseeding system for miss-seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 69-77, 120. (in Chinese)