

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.011

辣椒移栽机栽植机构的参数设计与仿真研究^{*}

徐志波,喻丽华^{*},罗震,张富贵
(贵州大学机械工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:针对辣椒移栽机在丘陵山区作业后出现直立度低、撕膜口较大、稳定性差等问题,对辣椒膜上移栽的鸭嘴多杆式栽植机构进行了参数优化设计和仿真研究。首先,建立了移栽机多杆式栽植机构三维模型和栽植器末端运动轨迹数学模型;其次,结合当地辣椒栽植农艺和机构约束条件,借助 MATLAB 软件对此进行了参数优化设计,获得了影响机构运动主参数的最优组合;最后,通过 RecurDyn 软件进行了运动仿真,分析了其运动轨迹及速度、加速度和位移曲线规律。仿真研究结果表明:栽植器末端 P 点运动轨迹最高点和最低点的距离 233 mm,移栽深度 97.5 mm,栽植器末端 P 点在垄面下运动轨迹的最大横向距离 8.3 mm 均满足设计要求,且栽植性能得到了提高。

关键词:辣椒移栽机;多杆式栽植机构;数学模型;参数设计;仿真分析

中图分类号:TH112;S223

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1057-06

Parameters design and simulation of planting mechanism of pepper transplanter

XU Zhi-bo, YU Li-hua, LUO Zhen, ZHANG Fu-gui
(College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low planting perpendicularity, large size of tearing film and poor stability of pepper transplanter after operation in hilly and mountainous areas, the parameter optimization design and simulation analysis of duck beak multi pole transplanter were carried out. Firstly, the three-dimensional model of multi-linkage planting mechanism of transplanter was established, on the basis of which the kinematic mathematical model of the end of the transplanter was built. According to the requirements of local pepper planting agronomy and structure constraints, the mechanism parameters were designed with MATLAB, by doing so, combination of the main parameters was extracted. The kinematic simulation of the optimized mechanism was carried out in RecurDyn, and the obtained planting trajectory and velocity, acceleration and displacement curves were analyzed. The simulation results indicate that the distance between the highest point and the lowest point of the P-point movement track at the end of the planter is 233 mm, the transplanting depth is 97.5 mm, and the maximum transverse distance of the P-point movement track at the end of the planter under the ridge surface is 8.3 mm, all of which meet the design requirements, and the planting performance is improved.

Key words: pepper transplanter; multi-linkage planting mechanism; mathematical model; parameters design; simulation analysis

0 引言

据统计,我国的辣椒年种植面积已达 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,

其中,贵州辣椒种植面积约占全国辣椒种植面积的 $1/4$ ^[1-2]。贵州辣椒种植多为丘陵山地,种植环境复杂、机械化作业难度大、生产成本低。当前,贵州辣椒移栽

收稿日期:2019-12-31

基金项目:贵州省农业科技支撑计划项目(黔科合支撑[2018]2325号);贵州省山地智能农业装备研发与应用科技创新人才团队项目(黔科合平台人才[2018]5616号)

作者简介:徐志波(1994-),男,贵州盘县人,硕士研究生,主要从事智能农业装备方面的研究。E-mail:zbxu109@163.com

通信联系人:喻丽华,女,博士,高级实验师,硕士生导师。E-mail:yulihua01@163.com

主要依靠手工完成,引进了几款旱地小苗移栽机用于辣椒移栽,但因复杂的地形地貌、土壤环境等问题,使得移栽机大多处于闲置状态。

根据栽植机构类型和栽植方式的不同,移栽机主要有链夹式、圆盘式、导苗管式及吊杯鸭嘴式^[3-7]。其中,链夹式、圆盘式和导苗管式移栽机以开沟、落苗和覆土 3 步完成移栽,主要适于小苗的不覆膜移栽。而吊杯鸭嘴式移栽机采用打孔放苗的移栽方式,不但适于不覆膜移栽,也适于膜下移栽,是当前蔬菜膜下移栽应用较广的一种机型。鸭嘴式栽植机构作为移栽机的关键部件,其接苗、打孔、放苗及回程等动作决定着整机的栽植性能^[8]。

为提高移栽机的栽植质量,许多学者在栽植机构的优化方面开展了许多研究。李旭英等^[9]通过改进吊杯式移栽机的栽植器结构,并优化了其运动性能参数,减小了移栽过程中穴口尺寸;陈建能等^[10]提出了一种钵苗移栽机椭圆齿轮行星系旋转式植苗机构,并对机构进行了参数分析,建立了微分方程;胡建平^[11]提出了一种行星轮多转臂式栽植机构,仿真分析了鸭嘴栽植器末端运动轨迹,得到了钵苗栽植状态较好的运动特征参数 λ 值。但专门针对移栽机在山地作业中存在的问题,开展栽植机构参数优化的研究则鲜有报道。

针对一款鸭嘴式移栽机在作业中存在苗直立度低、撕膜口尺寸大、移栽机稳定性差等问题,笔者开展鸭嘴多杆式栽植机构的建模、结构参数设计和运动学仿真分析。

1 栽植机构的工作原理

栽植机构是移栽机的核心部件,笔者设计的多杆式栽植机构示意图如图 1 所示。

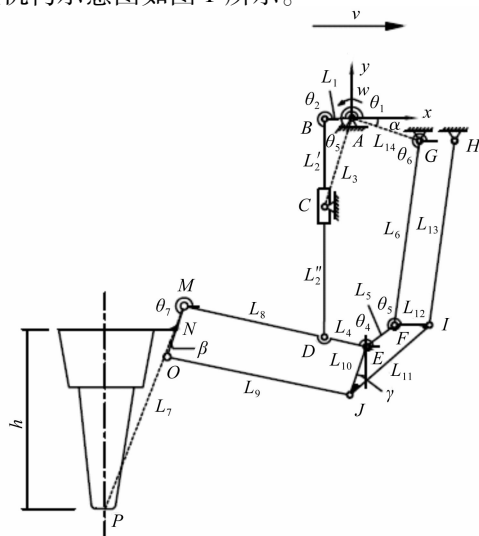


图 1 多杆式栽植机构示意图

该机构主要由曲柄导杆组、2 个平行四边形机构及连接件 4 部分组成;曲柄导杆组包括曲柄 L_1 、连杆 L_2 及套筒 C ;机构 $FGHI$ 是一个由机架 GH 、摇杆 L_6 、摇杆 L_{12} 、连杆 L_{13} 构成的双摇杆机构;机构 $EMOJ$ 由连杆 L_4 、连杆 L_8 、连杆 L_9 、连杆 L_{M0} 、连杆 L_{10} 构成;连杆 L_5 、连杆 L_{10} 、连杆 L_{11} 、连杆 L_{12} 形成一个刚性连接件 $EFIJ$ 。栽植器安装于连杆 L_{M0} , P 点为鸭嘴栽植器末端点。

作业时,曲柄 L_1 的转动带动杆 L_2 在套筒 C 中滑动和摆动,进而使 2 个平行四边形机构在曲柄导杆组的驱动下完成一个复合式运动,最终由连杆 L_{M0} 带动鸭嘴栽植器按一定轨迹作栽植运动。曲柄 L_1 从初始相位角位置,以一定速度旋转一周,即可完成接苗、落苗的一个辣椒苗移栽工作。在移栽机作业时,要求栽植机构各部分协调运动,保证苗直立度、栽深、株距,避免伤苗、带苗、撕膜等。

2 栽植机构的运动数学模型

笔者以 A 为原点,水平方向为 x 轴的正方向,竖直方向为 y 轴的正方向,建立坐标系;设移栽机运动方向 v 与 x 轴的正方向相反,曲柄 L_1 以角速度 w 逆时针旋转。多杆式栽植机构参数如表 1 所示。

表 1 多杆式栽植机构参数

符号	含义	符号	含义
L_1/mm	曲柄 AB 的长度	$\theta_1/(\circ)$	曲柄 AB 的初始相位角
L_2'/mm	连杆 BC 的长度	$\theta_2/(\circ)$	连杆 BC 的角位移
L_2''/mm	连杆 CD 的长度	$\theta_3/(\circ)$	连杆 CD 的角位移
L_3/mm	机架 AC 的长度	$\theta_4/(\circ)$	连杆 DE 的角位移
L_4/mm	连杆 DE 的长度	$\theta_5/(\circ)$	杆 EF 与杆 FI 所呈夹角
L_5/mm	连杆 EF 的长度	$\theta_6/(\circ)$	摇杆 FG 的角位移
L_6/mm	摇杆 FG 的长度	$\alpha/(\circ)$	机架 AG 与 x 坐标轴正方向所呈夹角
L_8/mm	连杆 DM 的长度	$\beta/(\circ)$	杆 DM 与杆 MP 所呈夹角
L_{14}/mm	机架 AG 的长度		

在变量 $\theta_1, \theta_5, \alpha, \beta$ 及 L_1 至 L_{14} 已知情况下,根据图 1 建立辣椒移栽机多杆栽植机构的封闭矢量方程如下:

$$\vec{L}_1 + \vec{L}_2' = \vec{L}_3 \quad (1)$$

$$\vec{L}_1 + \vec{L}_3 = \vec{L}_{14} + \vec{L}_6 + \vec{L}_5 + \vec{L}_4 \quad (2)$$

将矢量方程(1)转换为解析式:

$$\begin{cases} L_1 \cos \theta_1 + L_2' \cos \theta_2 = L_3 \cos \theta_3 \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2' \sin \theta_2 = L_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可求出变量 θ_2 :

$$L_2' = \sqrt{(L_3 \cos \theta_3 - L_1 \cos \theta_1)^2 + (L_3 \sin \theta_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}$$

式(3)经简化整理为:

$$A_1 \sin \theta_2 + B_1 \cos \theta_2 + C_1 = 0 \quad (4)$$

其中:

$$A_1 = 2L_1L'_2\cos\theta_1; B_1 = 2L_1L'_2\sin\theta_1; C_1 = L_1^2 + L_2'^2 - L_3^2;$$

$$\theta_2 = 2\arctan\left(\frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{B_1 - C_1}\right)。$$

将矢量方程(2)转换为解析式,即可得出以下各点位置方程:

$$x_A = y_A = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_B = L_1\cos\theta_1 \\ y_B = L_1\sin\theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_G = L_{14}\cos\alpha \\ y_G = L_{14}\sin\alpha \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_F = x_G + L_6\cos\theta_6 \\ y_F = y_G + L_6\sin\theta_6 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_E = x_F + L_5\cos\theta_5 \\ y_E = y_F + L_5\sin\theta_5 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_D = x_B + (L_2' + L_2'')\cos\theta_2 = x_E + L_4\cos\theta_4 \\ y_D = y_B + (L_2' + L_2'')\sin\theta_2 = y_E + L_4\sin\theta_4 \end{cases} \quad (10)$$

令 $L_2' + L_2'' = L_2$, 整理式(5 ~ 10) 可得:

$$\begin{cases} L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 = L_{14}\cos\alpha + L_6\cos\theta_6 + \\ L_5\cos\theta_5 + L_4\cos\theta_4 \\ L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 = L_{14}\sin\alpha + L_6\sin\theta_6 + \\ L_5\sin\theta_5 + L_4\sin\theta_4 \end{cases} \quad (11)$$

整理式(10) 如下:

$$\begin{cases} L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 - L_{14}\cos\alpha - L_5\cos\theta_5 - \\ L_4\cos\theta_4 = L_6\cos\theta_6 \\ L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 - L_{14}\sin\alpha - L_5\sin\theta_5 - \\ L_4\sin\theta_4 = L_6\sin\theta_6 \end{cases} \quad (12)$$

由式(3) 求出的参数 θ_2 , 代入式(11), 可解出未知变量 θ_4 。

$$\begin{cases} a = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 - L_{14}\cos\alpha - L_5\cos\theta_5; \\ b = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 - L_{14}\sin\alpha - L_5\sin\theta_5 \end{cases}$$

式(10) 经简化整理为:

$$A_2\sin\theta_4 + B_2\cos\theta_4 + C_2 = 0 \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} A_2 = -2L_4a \\ B_2 = -2L_4b \\ C_2 = a^2 + b^2 + L_4^2 - L_6^2 \end{cases};$$

$$\theta_4 = 2\arctan\left(\frac{A_2 \pm \sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}}{B_2 - C_2}\right)。$$

M 点位置移动方程为:

$$\begin{cases} x_M = x_D + L_8\cos\theta_4 = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 + L_8\cos\theta_4 \\ y_M = y_D + L_8\sin\theta_4 = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 + L_8\sin\theta_4 \end{cases} \quad (14)$$

鸭嘴栽植器末端 P 点的位置方程为:

$$\begin{cases} x_P = x_M + L_7\cos\theta_7 = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 + \\ L_8\cos\theta_4 + L_7\cos\beta \\ y_P = y_M + L_7\sin\theta_7 = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 + \\ L_8\sin\theta_4 + L_7\sin\beta \end{cases} \quad (15)$$

鸭嘴栽植器端点 P 的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} X_P = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 + L_8\cos\theta_4 + L_7\cos\beta + vt \\ Y_P = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 + L_8\sin\theta_4 + L_7\sin\beta \end{cases} \quad (16)$$

式中: v — 移栽机前进速度; t — 时间。

对式(16) 求一阶导数和二阶导数, 即可得出鸭嘴栽植器底端 P 点的速度和加速度。

3 栽植机构参数设计

3.1 设计目标及约束条件

3.1.1 设计目标

在辣椒移栽作业过程中, 首先要保证移栽苗的直立度; 其次在满足苗栽深度要求下, 减小撕膜尺寸; 其三在栽植器运动的过程中应避免伤苗、带苗。

根据图 1 和文献[12], 栽植机构设计目标为:

(1) 栽植器末端在垄面下的入土轨迹和出土轨迹的最大横向距离应趋近于零, 即零速投苗;

(2) 栽植器末端在垄面下的运动达到最低点时与垄面的距离, 应满足苗栽深 50 mm ~ 100 mm, 这里取栽深为 100 mm 作为设计目标;

(3) 在移栽期的辣椒苗高主要集中在 125 mm ~ 191 mm, 需大于最大苗高 191 mm, 结合整机装配情况, 栽植器末端运动轨迹的最高点和最低点的距离取 230 mm。

3.1.2 约束条件

综合考虑机构的几何关系及空间布置, 结合机构运动的运动规律, 应满足多杆机构运动条件 $L_{BD} - L_{DE} < L_{BE} < L_{BD} + L_{DE}$, 即在机构运动过程中不能出现死点位置。

3.1.3 设计变量

曲柄 AB 的长度 L_1 、连杆 BD 的长度 L_2 、连杆 DE 的长度 L_4 、连杆 EF 的长度 L_5 、连杆 FG 的长度 L_6 、连杆 DM 的长度 L_8 、鸭嘴栽植器与连杆 DM 安装所呈夹角 β 。

3.2 设计结果

根据数学模型, 笔者通过给定各主要杆件长度初

始值和鸭嘴栽植器安装初始角等参数,并根据设计目标和机构运动关系,调用 MATLAB 中的数学多目标规划问题函数 $fgoalattain$,进行 .m 程序文件编写^[13]。

机构参数设计流程如图 2 所示。

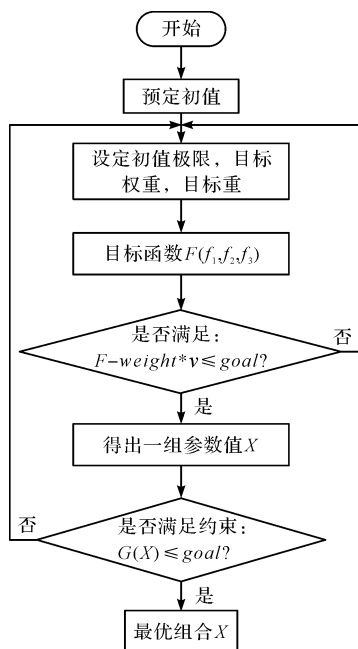


图 2 机构参数设计流程

根据移栽机田间实际工作情况,设定其前进速度为 $v = 0.3 \text{ m/s}$,移栽频率为 60 株/min 的条件下,笔者得出设计前、后的多杆式栽植机构主要参数如表 2 所示。

表 2 多杆式栽植机构主要参数

变量	初始值/mm	设定范围/mm	设计值/mm
L_1	35	20 ~ 50	35.6
L_2	284	234 ~ 334	285.8
L_4	55	35 ~ 75	55.9
L_5	49	29 ~ 49	48.1
L_6	240	190 ~ 290	238.3
L_8	185	135 ~ 235	185
β	1.29π	$\pi \sim 1.5\pi$	4.8

4 栽植机构仿真与分析

为了验证栽植机构结构设计的合理性,笔者将其结构模型的 .x_t 文件导入 Recurdyn 中。在 Recurdyn 中,笔者根据移栽机作业的运动规律,给机构主动件添加驱动及其他连接杆件添加运动约束。

设置栽植机构前进速度 $v = 0.3 \text{ m/s}$,控制栽植器运动的曲柄 L_1 的角速度为 $w = 2\pi \text{ rad/s}$,通过运动学

仿真分析,笔者得到一个运动周期内的初始参数下载植点 P 的运动轨迹,如图 3 所示。

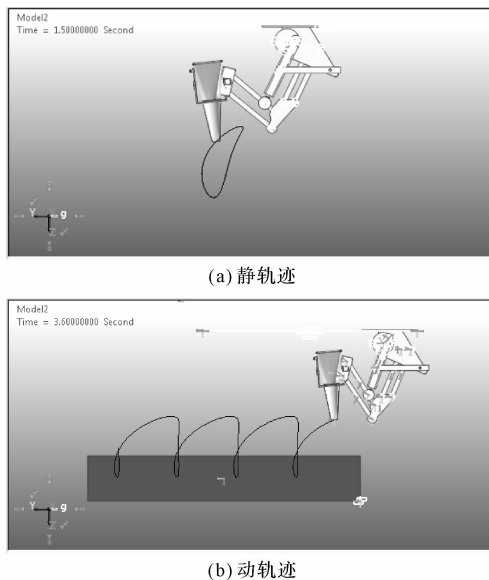


图 3 初始参数下载植点 P 的运动轨迹

参数设计后栽植点 P 的运动轨迹如图 4 所示。

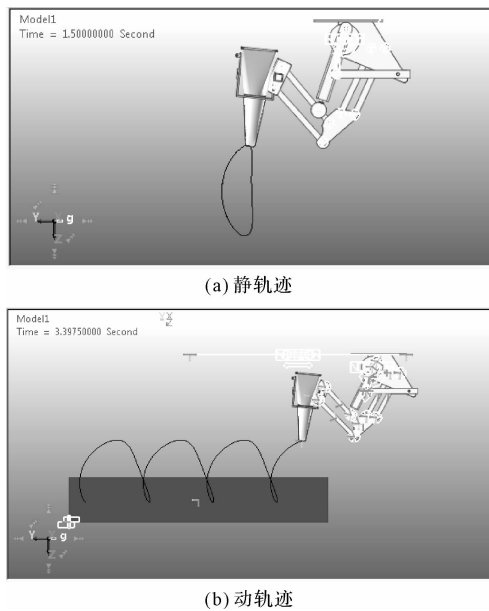


图 4 参数设计后栽植点 P 的运动轨迹

4.1 栽植机构运动轨迹及位移分析

对栽植机构仿真结果进行数据处理,得到栽植点 P 的位移曲线如图 5 所示。

根据栽植点 P 的运动轨迹和位移曲线可知:

(1)栽植器末端 P 点运动轨迹最高点和最低点的距离,即为图 5 中垂直方向位移曲线上 I 点与 II 点的高度差为 233 mm (初始参数下,高度差为 265 mm),即与设计目标相吻合,能有效避免了伤苗、带苗;

(2)栽植器末端 P 点在栽植轨迹最低点到入土轨

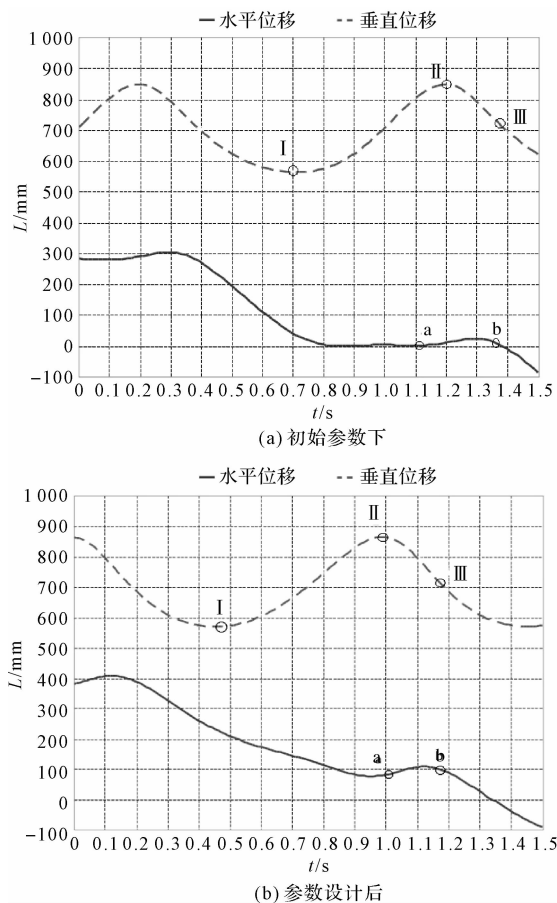


图5 栽植点P的位移曲线

I—栽植轨迹最高点;II—栽植轨迹最低点;III—入土轨迹和出土轨迹在垄面上的交叉点;a—II点附近的水平位移;b—III点附近的水平位移

迹和出土轨迹在垄面上的交叉点的距离,即为图5中垂直方向位移曲线上II点与III点的高度差为97.54 mm(初始参数下,高度差为102.1 mm),能有效地保证苗移栽深度与苗直立度;

(3)栽植器末端P点的入土轨迹和出土轨迹在垄面下的最大横向距离,即为图5中水平方向位移曲线上a点与b点之间的最大高度差为8.3 mm(初始参数下,高度差为21.6 mm),使得机构栽植轨迹接近于重合状态,移栽苗的直立度及垄面膜上移栽撕膜口尺寸得以保证。运动位移曲线I点的轨迹平缓,即机构运行平稳,利于接苗。

4.2 速度与加速度分析

栽植器末端的速度、加速度分析是衡量多杆式栽植机构性能的重要评价指标^[14-15]。因此,笔者根据栽植机构仿真结果,处理得到栽植点P的速度与加速度曲线如图6所示。

图6中,接苗点在0.48 s附近,栽植器P点的水

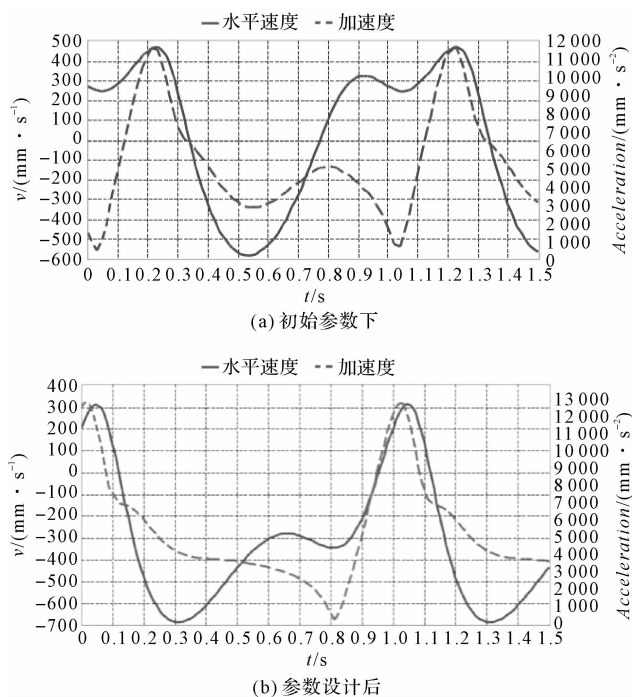


图6 栽植器P点的速度与加速度曲线

平速度绝对值在0.122 m/s上下变化(初始参数下,接苗点在0.72 s(I点)附近,栽植器P点的水平速度绝对值为0.306 m/s),接苗点速度越小越利于提高接苗的稳定性;选落苗点在0.96 s(II点)附近,栽植器P点的水平速度绝对值在0.106 m/s上下变化(初始参数下,落苗点在1.1 s附近,栽植器P点的水平速度绝对值为0.285 m/s),根据零速投苗原理,速度越小越有利于提高移栽苗的直立度和膜上移栽撕膜口尺寸。通过机构结构参数设计,在0.48 s~0.96 s,栽植器加速下降,在0~0.48 s和0.96 s~1.5 s,栽植器加速上升,极大提高了移栽效率。

综合以上栽植机构运动轨迹分析及鸭嘴栽植器末端位移、速度和加速度仿真结果分析,表明该设计能满足设计要求,提高移栽机的栽植性能。

5 结束语

(1)基于现有移栽机作业中存在的问题,笔者设计了一个由曲柄导杆组、两个平行四边形机构及连接件所组成的鸭嘴多杆式栽植机构,并建立了该机构的运动学模型;

(2)结合贵州山地辣椒栽植农艺要求及移栽期辣椒苗的主要技术指标,提出了栽植机构的设计目标,基于MATLAB软件进行机构参数化设计,最终获得了影响机构运动轨迹和姿态的主要参数优化组合为: $L_1 = 35.6 \text{ mm}$, $L_2 = 285.8 \text{ mm}$, $L_4 = 55.9 \text{ mm}$, $L_5 = 48.1 \text{ mm}$,

$L_6 = 238.3 \text{ mm}$, $L_8 = 185 \text{ mm}$, $\beta = 4.82^\circ$;

(3)通过 RecurDyn 软件对参数设计前、后的栽植机构进行运动学仿真,得到了其运动轨迹以及速度、加速度和位移运动规律。

仿真研究结果表明,参数设计的栽植器末端 P 点运动轨迹最高点和最低点的距离为 233 mm,机构移栽深度为 97.5 mm,栽植器末端 P 点在垄面下运动轨迹的最大横向距离为 8.3 mm,均达到了设计目标要求;且降低了鸭嘴在接苗和放苗时的竖直瞬时速度,移栽性较优化前得到了提高。

参考文献 (References):

- [1] 黄道梅,魏江霖,吴世焕,等. 贵州省辣椒加工业发展现状解析[J]. 中国调味品,2019,44(10):187-189.
- [2] 孟 奇. 我国辣椒主产区生产成本收益分析[D]. 保定:河北农业大学现代科技学院,2018.
- [3] 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.
- [4] 王义鹏,王卫兵,张 恒,等. 错列链夹式移栽机栽植机构的设计与仿真[J]. 机械设计与制造,2018(4):68-71.
- [5] 倪向东,梅卫江. 导管式番茄移栽机的设计[J]. 农机化研究,2011,33(2):84-86,119.
- [6] 周福君,芦 杰,杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2014,30(1):18-24.
- [7] 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]. 农业机械学报,2018,49(9):55-65.
- [8] 石 峰,孙松林,邓向春,等. 偏心圆盘指夹式幼苗移栽机栽植机构运动轨迹分析[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2012,38(3):333-336.
- [9] 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.
- [10] 陈建能,章鹏华,王 英,等. 旋转式钵苗栽植机构多目标参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(5):46-53.
- [11] 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.
- [12] 喻丽华,徐志波,韩忠禄,等. 面向丘陵山区的辣椒移栽机适应性分析及改进[J]. 农机化研究,2020,23(10):125-130.
- [13] 李 娅. MATLAB R2015b 最优结构计算[M]. 北京:清华大学出版社,2017.
- [14] 安明云,于大泳,张黎明. 六自由度并联机构的误差分布研究[J]. 轻工机械,2019,37(1):29-33.
- [15] 黎宁慧,薛金林,丁兰英,等. 多杆式栽植机构参数化设计与仿真分析[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2017,48(6):844-848.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

徐志波,喻丽华,罗 震,等. 辣椒移栽机栽植机构的参数设计与仿真研究[J]. 机电工程,2020,37(9):1057-1062.

XU Zhi-bo, YU Li-hua, LUO Zhen, et al. Parameters design and simulation of planting mechanism of pepper transplanter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(9):1057-1062.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>