

丘陵山地作物移栽机井窖式成穴机构设计与试验

徐高伟¹ 荐世春² 宋裕民¹ 方会敏³ 邱绪云¹ 明向兰⁴

(1. 山东交通学院汽车工程学院, 济南 250357; 2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100;
3. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 4. 岭南师范学院机电工程学院, 湛江 524048)

摘要: 针对丘陵山地作物移栽的现有半自动和间歇井窖式成穴装备作业效率和质量较低、人工劳动强度较大等问题, 为保证井窖穴体的大深度以及穴体轮廓直径一致的农艺要求, 基于非圆齿轮-平行四杆机构设计一种井窖式成穴机构, 在阐述机构的组成结构和工作原理的基础上建立其运动学模型。依据运动学模型运用 Matlab 开发成穴机构的人机交互可视化辅助界面, 利用该界面结合二次正交旋转中心组合试验方法建立成穴机构响应指标与试验因素的回归方程, 并通过响应曲面得到其影响趋势和交互关系; 以回归方程为基础, 采用多目标函数优化获取成穴机构的优化参数组合。根据优化后的机构参数组合研制成穴机构样机及田间作业平台并进行田间试验, 试验结果表明: 穴体深度为 181.7 mm、穴体直立角度为 90.5°、穴体直径最大值为 75.6 mm、穴体直径最小值为 68.5 mm、穴体直径方差为 7.5 mm²、穴距为 503.1 mm, 优化后的成穴机构满足丘陵山地作物移栽井窖成穴的农艺要求。

关键词: 丘陵山地作物移栽机; 井窖式移栽; 井窖成穴机构; 参数优化

中图分类号: S223.94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0105-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Cellar Cavitation Mechanism for Crops of Hilly Mountains Transplanter

XU Gaowei¹ JIAN Shichun² SONG Yumin¹ FANG Huimin³ QIU Xuyun¹ MING Xianglan⁴

(1. Department of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250357, China

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

3. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: In the view of low operational efficiency and quality, high labor intensity of the existing semi-automatic and intermittent cellar cavitation mechanism for crops of hilly mountains, a cellar cavitation mechanism based on non-circular gear parallel four-bar mechanism was designed in order to ensure the agronomic requirements of deeper depth and consistent contour diameter of cavity. In addition, its kinematic model was established on the basis of elaborating the structure and working principle. The regression equation of response index and experimental factors for cavitation mechanism was established by combining the quadratic orthogonal rotation center combination test method and the human-computer interactive visual auxiliary interface of cavitation mechanism, which was established by the Matlab according to the kinematic model. Thus, the influence trend and interaction relationship were obtained by response surface simultaneously. In terms of the regression equation, multi-objective function optimization was used to obtain the optimal parameter combination of mechanism. According to the regression equation, the optimal parameters of cavitation mechanism, which was used to develop the prototype of cellar cavitation mechanism and field operation platform, could be achieved via the multi-objective function optimization. The field test results showed that the depth of cavitation was 181.7 mm, the vertical angle of cavitation was 90.5°, the maximum diameter of cavity was 75.6 mm, the minimum diameter of cavity was 68.5 mm, the variance of cavity diameter was 7.5 mm² and the distance between

收稿日期: 2021-04-12 修回日期: 2021-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005310)、山东交通学院博士科研启动基金项目(BS2020002)和山东交通学院科研基金项目(Z202008)

作者简介: 徐高伟(1989—),男,讲师,博士,主要从事现代农业机械装备、农业车辆设计研究,E-mail: 476181684@qq.com

通信作者: 方会敏(1989—),女,工程师,博士,主要从事农业装备设计研究,E-mail: hldldl@126.com

cavities was 503.1 mm. The optimized mechanism can meet the agronomic requirements for crops of hilly mountains transplanting cellar cavitation.

Key words: transplanter for crops of hilly mountains; cellar transplanting; cellar cavitation mechanism; parameter optimization

0 引言

井窖成穴移栽技术是将丘陵山地种植的部分作物小苗,如烟草^[1]、辣椒^[2]等,移栽到井窖内部。井窖是具有一定深度和高度以及直径一致的穴体,根据达西定律,井窖内随着外界温湿度变化而产生水力梯度,迫使井窖内土壤水分蒸发或凝结,从而保持井窖内温湿度的相对稳定^[3]。因此通过利用井窖内湿度、温度相对稳定的特点,将作物种苗移栽到井窖穴体后立即浇水、施药并覆盖地膜,能实现丘陵山地作物移栽的壮苗培育、适时早栽和高垄深栽,从而增加其抗旱能力、减轻病虫害,以达到丘陵山地作物提质增效的一种栽培方式^[4]。目前已在山东省临沂、淄博等丘陵山地进行部分推广^[5-6]。

目前丘陵山地移栽装备主要是以传统栽植农艺为基础的鸭嘴式移栽机为主^[7-13],无法形成稳定的井窖,穴体易坍塌,不能适应丘陵山地作物井窖式移栽的农艺要求。用于丘陵山地移栽机的井窖式成穴装置,目前有3种型式:人力背负式井窖成穴装置^[14],由汽油机驱动,人工控制穴体位置和深度,成穴效率较低、劳动强度较大;多连杆式成穴机构^[15-16],该机构在成穴过程中,由于与移栽机前进速度无法完全匹配,所成穴体形状为“喇叭形”,无法满足井窖成穴的农艺要求;间歇式井窖成穴装置^[17-18],与间歇运动底盘配套作业,到达指定位置时底盘停止前进,成穴装置沿垂直垄面方向成穴,该装置避免了成穴机构与底盘作业速度的匹配问题,穴体质量较好,但由于底盘的间歇运动,作业效率和机具可靠性不高。

针对以上情况,本文结合井窖成穴移栽技术提出的井窖成穴农艺要求,基于非圆齿轮-平行四杆机构,设计一种用于丘陵山地移栽机的井窖式成穴机构,该机构利用非圆齿轮连杆机构近似匀速直线运动的特性,抵消机构前进作业速度,在机具连续作业下形成适用于丘陵山地作物井窖移栽大深度、高规格的井窖穴体,提高机械化井窖成穴的工作效率和作业质量,降低人工成穴的劳动作业强度。

1 成穴农艺要求分析

井窖成穴农艺要求如图1所示。穴距为500 mm、井窖形状为圆形、穴体深度为180~200 mm、穴体直

径为60~80 mm,穴体整体直径应较均匀,内壁坚实不坍塌。

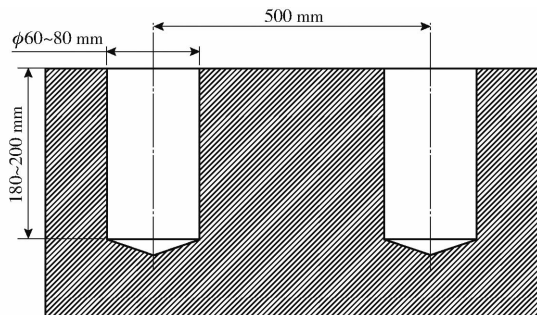


图1 井窖成穴的农艺要求

Fig. 1 Agronomic requirements for cellar cavitation

机构设计的难点在于:在机具连续作业的情况下,井窖成穴机构所成穴体要在达到较大深度的同时保证井窖穴体的直径以及单个井窖穴体轮廓直径的一致性。

2 成穴机构组成与工作原理

井窖成穴机构结构示意图如图2所示,该机构主要由非圆齿轮-平行四杆机构以及成穴器组成。其中非圆齿轮1、3组成非圆齿轮传动机构;直齿圆柱齿轮2、4、5组成齿轮传动机构,AB、CD、AC、BD为四杆机构的双曲柄、机架和连杆,与直齿圆柱齿轮2、4、5组成平行四杆机构;直齿圆柱齿轮6通过键连接固联在曲柄CD铰接点D处,直齿圆柱齿轮7固联安装在与连杆BD一体的锥齿轮换向减速器的动力输入轴上,与直齿圆柱齿轮6组成齿轮传动机构;成穴器8安装在锥齿轮换向减速器动力输出轴上。

作业时,匀速转动的动力由非圆齿轮1传入,通过非圆齿轮1、3组成的非圆齿轮机构将匀速转动转变为变速转动;直齿圆柱齿轮2与非圆齿轮3同轴心固联,又通过直齿圆柱齿轮2、4、5组成的直齿圆柱齿轮传动机构,将变速转动传递给平行四杆机构的曲柄AB和CD,带动连杆BD做变速的摆动;成穴器8与连杆BD垂直安装,随连杆BD做变速摆动,入土和出土过程中在水平方向上形成与机具前进速度大小相近、方向相反的速度,以抵消机具作业的前进速度,形成直径较均匀的井窖穴体。成穴器8随连杆BD摆动的过程中,曲柄CD的变速转动通过直齿圆柱齿轮6、7组成的齿轮机构以及锥齿轮换向减速器将动力传递至成穴器8,带动成穴器做变速转

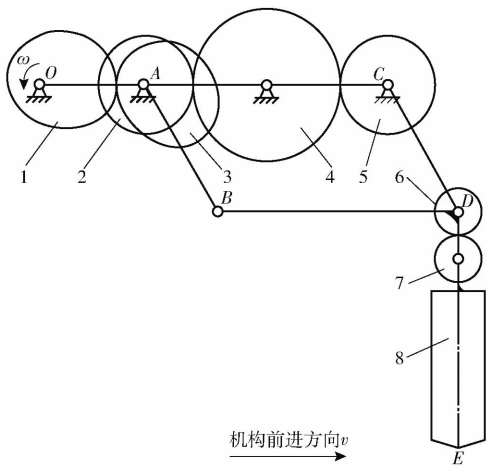


图 2 成穴机构示意图

Fig. 2 Schematic of cavitation mechanism

1、3. 非圆齿轮 2. 左侧圆柱齿轮 4. 中间圆柱齿轮 5. 右侧圆柱齿轮 6、7. 成穴器动力传递圆柱齿轮 8. 成穴器

动,以在成穴过程中压实穴体内壁。

3 成穴机构运动学模型与辅助界面建立

以非圆齿轮 1 旋转中心点 O 作为坐标原点,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立如图 3 所示的平面直角坐标系。

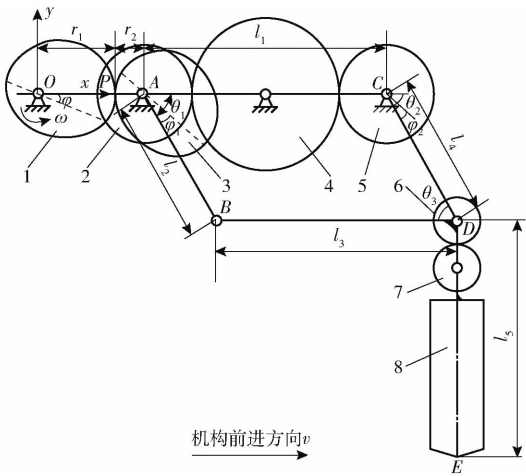


图 3 成穴机构运动学模型

Fig. 3 Kinematic model of cavitation mechanism

1、3. 非圆齿轮 2. 左侧圆柱齿轮 4. 中间圆柱齿轮 5. 右侧圆柱齿轮 6、7. 成穴器动力传递圆柱齿轮 8. 成穴器

3.1 位移模型

非圆齿轮 3 相对于非圆齿轮 1 的角位移^[19-20]为

$$\varphi_1 =$$

$$\begin{cases} \frac{2}{m_1} \arctan \left(\frac{1+e}{1-e} \tan \frac{-m_1 \varphi}{2} \right) & \left(0 \geq \varphi \geq -\frac{\pi}{m_1} \right) \\ 2\pi - \frac{2}{m_2} \arctan \left(\frac{1+e}{1-e} \tan \frac{m_2 (2\pi + \varphi)}{2} \right) & \left(-\frac{\pi}{m_1} > \varphi \geq -2\pi \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 e ——非圆齿轮偏心率

$m_1、m_2$ ——非圆齿轮变形系数

φ ——非圆齿轮 1 的角位移,rad

其中,为保证非圆齿轮两段节曲线封闭, m_1 和 m_2 应满足

$$2\pi - \frac{\pi}{m_1} = \frac{\pi}{m_2} \quad (2)$$

非圆齿轮的节曲线方程为

$$r_1 = \begin{cases} \frac{a(1-e^2)}{1-ecos(-m_1\varphi)} & \left(0 \geq \varphi \geq -\frac{\pi}{m_1} \right) \\ \frac{a(1-e^2)}{1-ecos(m_2(2\pi+\varphi))} & \left(-\frac{\pi}{m_1} > \varphi \geq -2\pi \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$r_2 = 2a - r_1 \quad (4)$$

式中 r_1 ——非圆齿轮 1 轴心到啮合点 P 距离,mm

r_2 ——非圆齿轮 3 轴心到啮合点 P 距离,mm

a ——非圆齿轮长半轴长度,mm

点 A 的位移方程为

$$\begin{cases} X_A = X_o + r_1 + r_2 \\ Y_A = Y_o \end{cases} \quad (5)$$

式中 X_o ——点 O 在 x 方向上的坐标

Y_o ——点 O 在 y 方向上的坐标

点 B 的位移方程为

$$\begin{cases} X_B = X_A + l_2 \cos(\theta_1 - \varphi_1) \\ Y_B = Y_A - l_2 \sin(\theta_1 - \varphi_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 l_2 ——曲柄 AB 长度,mm

θ_1 ——曲柄 AB 初始安装角,rad

点 C 的位移方程为

$$\begin{cases} X_C = X_A + l_1 \\ Y_C = Y_A \end{cases} \quad (7)$$

式中 l_1 ——平行四杆机构机架 AC 长度,mm

点 D 的位移方程为

$$\begin{cases} X_D = X_C + l_4 \cos(\theta_2 - \varphi_2) \\ Y_D = Y_C - l_4 \sin(\theta_2 - \varphi_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中 l_4 ——曲柄 CD 长度,mm

θ_2 ——曲柄 CD 初始安装角,rad

φ_2 ——曲柄 CD 转动的角位移,rad

由平行四杆机构的运动特性可得

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_2 \\ \varphi_1 = \varphi_2 \end{cases} \quad (9)$$

点 E 的位移方程为

$$\begin{cases} X_E = X_D \\ Y_E = Y_D - l_5 \end{cases} \quad (10)$$

式中 l_5 ——平行四杆机构铰接点 D 到成穴器下端的长度,mm

3.2 速度模型

点 D 的速度方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_D = l_4 \sin(\theta_2 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \\ \dot{Y}_D = l_4 \cos(\theta_2 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \end{cases} \quad (11)$$

点 E 的速度方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_E = \dot{X}_D \\ \dot{Y}_E = \dot{Y}_D \end{cases} \quad (12)$$

其中,由反转法可得

$$\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_1} = -\frac{r_2}{r_1} \quad (13)$$

式中 $\dot{\varphi}$ ——非圆齿轮 1 的角速度,rad/s
 $\dot{\varphi}_1$ ——非圆齿轮 3 相对于非圆齿轮 1 的角速度,rad/s

3.3 辅助界面建立

根据所建立的成穴机构运动学数学模型,基于 Matlab GUI 模块,开发人机交互可视化辅助界面,如图 4 所示。

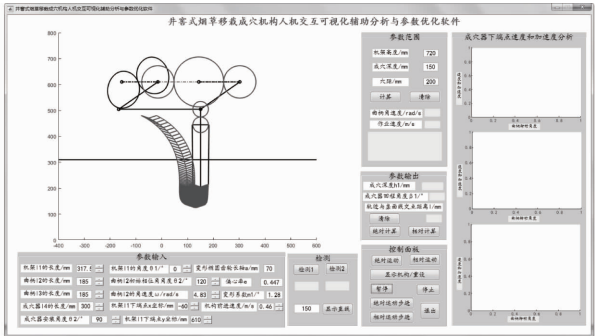


图4 成穴机构人机交互辅助界面

Fig.4 Human computer interaction auxiliary interface of cavitation mechanism

4 参数正交仿真试验优化

通过成穴机构人机交互可视化辅助界面,结合仿真试验设计优化方法得到成穴机构优化变量与优化目标的回归方程,以回归方程为基础进行多目标函数优化,获取成穴机构的参数优化组合。

4.1 试验因素与指标确定

结合成穴机构人机交互辅助界面通过单因素预试验,确定运动学方程中平行四杆的曲柄长度 l_2 、非圆齿轮偏心率 e 、非圆齿轮变形系数 m_1 为影响穴体质量的显著因素,而穴体质量的标准根据成穴农艺分析结果,由穴体深度 y_1 、穴体顶端和底端中点连线与莖面线夹角 y_2 、穴体直径最大值 y_3 、穴体直径最小值 y_4 、穴体最大值与最小值差值 y_5 以及穴体直径方差 y_6 作为评价指标^[21-22]。上述指标中用穴体顶端和底端中点连线与莖面线夹角

衡量穴体的直立度,穴体直径最大值、穴体直径最小值、穴体直径最大值和最小值的差值、穴体直径的方差衡量穴体直径总体所处的范围和穴体轮廓直径的一致程度。

4.2 试验内容与方法

根据单因素预试验结合试验指标确定成穴机构曲柄长度范围 175 ~ 195 mm、非圆齿轮偏心率 0.35 ~ 0.55、非圆齿轮变形系数 1.2 ~ 1.4,同时确定因素的水平为五水平,在此基础上利用成穴机构人机交互辅助界面,结合二次正交旋转中心组合试验方法,确定成穴机构最佳参数组合。试验因素编码如表 1 所示,通过辅助界面测定穴体 11 组直径数据并进行计算获得评价指标。

表1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	曲柄长度 l_2 /mm	非圆齿轮 偏心率 e	非圆齿轮变形 系数 m_1
1.682	195	0.55	1.40
1	191	0.51	1.36
0	185	0.45	1.30
-1	179	0.39	1.24
-1.682	175	0.35	1.20

4.3 试验结果与分析

试验方案与结果如表 2 所示,各响应指标的方差分析如表 3 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

通过 Design-Expert 8.0 软件对试验数据进行回归分析和因素方差分析,剔除交互项和二次项中的不显著项,得出指标与因素编码值间的回归方程

$$y_1 = 183.95 + 5.26x_1 + 0.42x_2 - 0.24x_3 + 1.83x_1x_3 + 1.28x_3^2 \quad (14)$$

$$y_2 = 91.63 + 0.16x_1 + 1.58x_2 + 2.19x_3 + 1.45x_2x_3 \quad (15)$$

$$y_3 = 73.18 + 0.57x_1 + 1.61x_2 - 0.93x_3 - 7.15x_1x_2 + 5.38x_1^2 + 11.86x_2^2 \quad (16)$$

$$y_4 = 64.94 - 3.27x_1 + 4.02x_2 + 0.17x_3 - 5.30x_1x_2 + 5.58x_2^2 - 1.40x_3^2 \quad (17)$$

$$y_5 = 8.82 + 3.85x_1 - 2.41x_2 - 1.10x_3 - 1.85x_1x_2 + 4.70x_1^2 + 6.27x_2^2 + 1.09x_3^2 \quad (18)$$

$$y_6 = 8.77 + 23.11x_1 - 9.99x_2 - 5.47x_3 - 6.23x_1x_2 + 19.62x_1^2 + 27.47x_2^2 \quad (19)$$

为分析各因素对各响应指标的影响规律,运用 Design-Expert 8.0 软件得到响应曲面,如图 5 所示。

曲柄长度 l_2 与非圆齿轮变形系数 m_1 在其他因素为零水平时对穴体深度的影响如图 5a 所示。非圆齿轮变形系数处于零水平以下时,穴体深度随曲

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experimental plan and results

序号	因素			指标					
	x_1	x_2	x_3	y_1/mm	$y_2/({}^\circ)$	y_3/mm	y_4/mm	y_5/mm	y_6/mm^2
1	-1	-1	-1	181.7	87.7	80.6	61.6	19.0	41.8
2	1	-1	-1	190.5	87.4	96.7	65.9	30.8	98.6
3	-1	1	-1	186.1	88.1	96.7	80.6	16.1	30.0
4	1	1	-1	187.5	88.7	87.9	63.0	24.9	80.9
5	-1	-1	1	178.8	88.7	79.1	64.5	14.6	28.0
6	1	-1	1	189.0	91.4	96.7	68.9	27.8	85.8
7	-1	1	1	178.8	96.6	95.3	80.6	14.7	25.1
8	1	1	1	193.4	96.8	80.6	64.5	16.1	39.0
9	-1.628	0	0	174.4	91.9	90.8	73.3	17.5	26.9
10	1.628	0	0	196.3	91.3	89.4	61.6	27.8	107.9
11	0	-1.628	0	184.6	90.2	104.1	73.3	30.8	106.6
12	0	1.628	0	184.6	94.1	112.8	89.4	23.4	72.6
13	0	0	-1.628	186.1	91.7	74.8	63.1	11.7	13.9
14	0	0	1.628	187.6	96.7	73.3	60.1	13.2	13.1
15	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
16	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
17	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
18	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
19	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
20	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
21	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
22	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3
23	0	0	0	183.2	91.8	73.3	64.5	8.8	8.3

柄长度的增加而呈上升趋势;当非圆齿轮变形系数处于零水平以上时,穴体深度随曲柄长度的增加上升趋势明显加大,这是由于曲柄长度越大,成穴器竖直方向上所能达到的位置就越低,穴体深度就越大;而非圆齿轮变形系数会改变成穴器在水平方向上的速度,造成穴体角度的改变,进而改变穴体的垂直深度;非圆齿轮变形系数越大,对垂直度的影响越小,穴体的垂直深度就越大;曲柄长度处于零水平以下时,穴体深度随非圆齿轮变形系数的增加而呈下降趋势,这是由于曲柄长度在零水平以下发生变化时,与非圆齿轮变形系数的交互作用会降低成穴器在水平方向上的速度,使穴体的倾斜度加大,降低穴体垂直深度;当曲柄长度处于零水平以上时,穴体深度随着非圆齿轮变形系数增加,在零水平以下不变,零水平以上呈上升趋势,这是由于曲柄长度在零水平以上发生变化时,与非圆齿轮变形系数的交互作用会不断提高成穴器在水平方向上的速度,逐步逼近机构前进的速度,使穴体的倾斜角度不断减小,增加穴体垂直深度。

非圆齿轮变形系数与非圆齿轮偏心率在其他因素为零水平时对穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角影响如图 5b 所示。非圆齿轮变形系数处于零水平以下时,穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角随曲柄非圆齿轮偏心率的增加而呈上升趋势;当非圆齿轮变形系数处于零水平以上时,穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角度随曲柄非圆齿轮偏心

率的增加上升趋势明显加大;非圆齿轮偏心率处于零水平以下时,穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角随非圆齿轮变形系数的增加而呈上升趋势;当非圆齿轮偏心率处于零水平以上时,穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角随非圆齿轮变形系数的增加上升趋势明显加大。这是由于非圆齿轮变形系数和非圆齿轮偏心率的增加不断改变成穴器在水平方向上的速度,导致穴体顶部与底部中点连线与垄面线夹角不断增加。

曲柄长度与非圆齿轮偏心率在其他因素为零水平时对穴体直径最大值和最小值的影响如图 5c、5d 所示。当非圆齿轮偏心率处于零水平以上时,穴体直径最大值和最小值均随曲柄长度的增加而呈下降趋势;非圆齿轮系数处于零水平以下时,穴体直径最大值和最小值随曲柄长度的增加而呈上升趋势,这是由于曲柄长度越大在水平方向上的速度越大,与机构前进方向速度的差值越大,所形成的穴体直径也越大,而非圆齿轮偏心率在零水平以下时,对曲柄长度在水平方向的速度影响越小,穴体直径呈上升趋势;而随着非圆齿轮偏心率不断增大(零水平以上),对曲柄长度在水平方向的速度影响不断增大,降低曲柄长度在水平方向的速度,穴体直径呈下降趋势;当非圆齿轮偏心率处于零水平以上时,穴体直径最大值和最小值随曲柄长度的增加而呈下降趋势;非圆齿轮系数处于零水平以下时,穴体直径最大值和最小值随曲柄长度的增加而呈上升趋势,这是

表 3 回归模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression model

项目	来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	项目	来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>y</i> ₁	模型	448.72	9	16.70	<0.000 1 **	<i>y</i> ₄	模型	1 130.14	9	59.65	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₁	377.81	1	126.56	<0.000 1 **		<i>x</i> ₁	146.16	1	69.43	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₂	2.46	1	0.83	0.380 2		<i>x</i> ₂	220.51	1	104.75	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₃	0.79	1	0.26	0.616 4		<i>x</i> ₃	0.41	1	0.19	0.667 8
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	1.12	1	0.38	0.549 9		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	224.72	1	106.75	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	26.65	1	8.93	0.010 5 *		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	0.32	1	0.15	0.702 9
	<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	1.13	1	0.38	0.549 9		<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	2.42	1	1.15	0.303 1
	<i>x</i> ₁ ²	9.08	1	3.04	0.104 8		<i>x</i> ₁ ²	7.24	1	3.44	0.086 5
	<i>x</i> ₂ ²	3.83	1	1.28	0.278 0		<i>x</i> ₂ ²	496.39	1	235.79	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₃ ²	26.29	1	8.81	0.010 9 *		<i>x</i> ₃ ²	30.85	1	14.65	0.002 1 **
残差		38.81	13			残差		27.37	13		
总和		487.53	22			总和		1 157.51	22		
<i>y</i> ₂	模型	126.49	9	8.21	0.000 4 **	<i>y</i> ₅	模型	1 316.19	9	45.11	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₁	0.35	1	0.21	0.657 9		<i>x</i> ₁	201.99	1	62.31	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₂	34.03	1	19.88	0.000 6 **		<i>x</i> ₂	78.99	1	24.37	0.000 3 **
	<i>x</i> ₃	65.94	1	38.52	<0.000 1 **		<i>x</i> ₃	16.65	1	5.13	0.041 2 *
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	0.32	1	0.19	0.672 6		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	27.38	1	8.45	0.012 3 *
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	0.84	1	0.49	0.494 7		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	4.5	1	1.39	0.259 8
	<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	16.82	1	9.83	0.007 9 **		<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	0.98	1	0.3	0.591 8
	<i>x</i> ₁ ²	3.83	1	2.24	0.158 6		<i>x</i> ₁ ²	350.73	1	108.19	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₂ ²	1.4	1	0.82	0.382 8		<i>x</i> ₂ ²	624.97	1	192.78	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₃ ²	2.91	1	1.7	0.214 6		<i>x</i> ₃ ²	18.95	1	5.84	0.031 *
残差		22.25	13			残差		42.14	13		
总和		148.75	22			总和		1 358.33	22		
<i>y</i> ₃	模型	3152.76	9	88.24	<0.000 1 **	<i>y</i> ₆	模型	27 584.22	9	69.37	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₁	4.51	1	1.14	0.306		<i>x</i> ₁	7 294.45	1	165.09	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₂	35.54	1	8.95	0.010 4 *		<i>x</i> ₂	1 361.94	1	30.82	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₃	11.85	1	2.99	0.107 7		<i>x</i> ₃	409.09	1	9.26	0.009 4 **
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	408.98	1	103.03	<0.000 1 **		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	310	1	7.02	0.020 1 *
	<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	2.42	1	0.61	0.448 9		<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	162	1	3.67	0.077 8
	<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	6.48	1	1.63	0.223 7		<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	51.01	1	1.15	0.302 2
	<i>x</i> ₁ ²	458.74	1	115.56	<0.000 1 **		<i>x</i> ₁ ²	6 119.31	1	138.49	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₂ ²	2 235.32	1	563.09	<0.000 1 **		<i>x</i> ₂ ²	11 993.06	1	271.43	<0.000 1 **
	<i>x</i> ₃ ²	1.44	1	0.36	0.556 9		<i>x</i> ₃ ²	5.13	1	0.12	0.738 9
残差		51.61	13			残差		574.4	13		
总和		3 204.37	22			总和		28 158.61	22		

注：**表示差异极显著($P<0.01$)；*表示差异显著($0.01\leq P\leq 0.05$)。

由于曲柄长度越长在水平方向上的速度越大,与机构前进方向速度的差值越大,所形成的穴体直径也越大,而非圆齿轮偏心率较小(零水平以下)时,对成穴机构在水平方向的速度影响越小,穴体直径呈上升趋势;而随着非圆齿轮偏心率不断增大(零水平以上),对成穴机构在水平方向的速度影响不断增大,降低成穴机构在水平方向的速度,穴体直径呈下降趋势。

曲柄长度与非圆齿轮偏心率在其他因素为零水平时对穴体直径最大值和最小值差值的影响如图 5e 所示。当非圆齿轮偏心率一定时,穴体直径最大

值和最小值的差值随曲柄长度的增加而呈先降低后上升趋势;非圆齿轮偏心率处于零水平以下时,穴体直径最大值和最小值的差值随曲柄长度的增加而呈上升趋势,这说明曲柄长度与非圆齿轮偏心率在零水平附近时,成穴机构在水平方向上的速度接近于机构前进速度,穴体直径最大值和最小值的差值最小。

曲柄长度与非圆齿轮偏心率在其他因素为零水平时对穴体直径方差的影响如图 5f 所示。曲柄长度一定时,穴体直径的方差随非圆齿轮偏心率的增加先降低后上升;当非圆齿轮偏心率一定时,穴体直径的方差随曲柄长度的增加先降低后上升,这说明

随着曲柄长度与非圆齿轮偏心率两因素水平的变化,成穴器在水平方向上的速度存在波动,引起穴体的各部分直径发生较大变化,而导致穴体直径方差

较大。当成穴器所在水平方向上的速度接近于机构的前进速度时,穴体各部分直径变化程度越小,穴体直径的方差就越小。

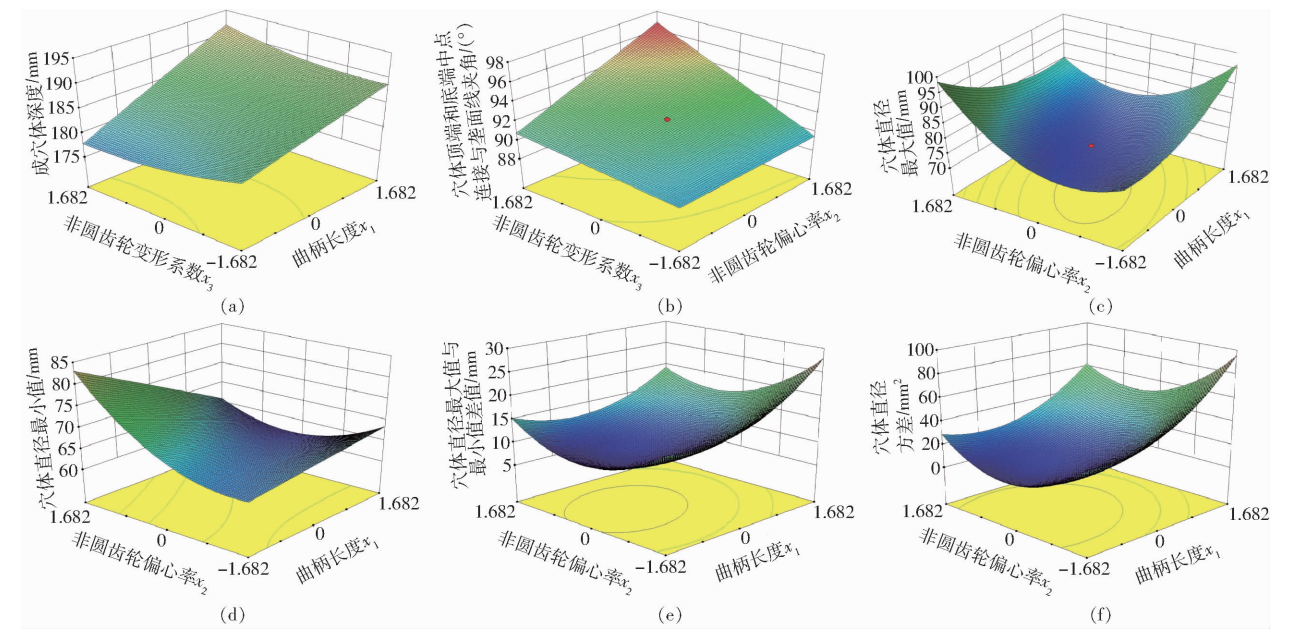


图5 各因素对试验指标影响的响应曲面
Fig. 5 Response surfaces of factor to test index

4.4 参数优化

为得到试验因素最佳水平组合,对试验因素进行优化设计,建立参数优化的数学模型。结合试验因素的边界条件,对成穴机构响应指标的回归方程进行分析,得到其非线性规划的优化模型

$$\begin{cases} 180\text{ mm} \leq y_1 \leq 185\text{ mm} \\ 85^\circ \leq y_2 \leq 95^\circ \\ 60\text{ mm} \leq y_3 \leq 80\text{ mm} \\ 60\text{ mm} \leq y_4 \leq 80\text{ mm} \\ \min y_5 \\ \min y_6 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 175\text{ mm} \leq l_2 \leq 195\text{ mm} \\ 0.35 \leq e \leq 0.55 \\ 1.2 \leq m_1 \leq 1.4 \end{cases} \end{cases}$$

(20)

运用 Design-Expert 8.0 软件优化模块对回归方程进行多目标参数优化,当曲柄 AB 和 CD 长度为 184.710 mm、非圆齿轮偏心率 e 为 0.447、非圆齿轮变形系数 m₁ 为 1.278 时,所成穴体各参数为最优,穴体深度为 182.3 mm、穴体顶端中点与穴体底端中点连线与垄面线夹角为 89.8°、穴体直径最大值为 72.8 mm、穴体直径最小值为 63.6 mm、穴体直径最大值与最小值差值为 10.7 mm、穴体直径方差为 6.32 mm²,所成穴体如图 6 所示。

通过辅助界面输出优化参数下的成穴机构端点在水平方向上分速度曲线,如图 7 所示。图中,椭圆

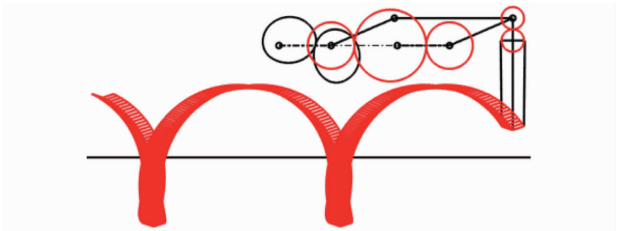


图6 辅助界面输出的穴体截面
Fig. 6 Cavity section outputed by auxiliary interface

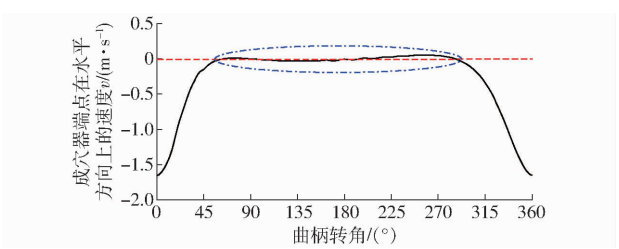


图7 优化参数下成穴机构端点在水平方向上速度曲线
Fig. 7 Horizontal velocity curve of end point of mechanism with optimized parameters

区域为成穴机构在成穴时成穴器的速度状态,此时成穴器在水平方向上的速度接近于 0,说明成穴过程中成穴器在水平方向上的速度与机具的前进速度几乎抵消,满足成穴机构在速度上的设计要求。

将上述参数优化组合分别通过回归方程和辅助界面得到各指标值如表 4 所示。由表 4 可知,与辅助界面相比,通过回归方程得到各响应指标参数值的误差在合理范围内,验证了回归方程和参数优化的准确性。

表 4 回归方程与辅助界面输出的指标值

Tab.4 Output index value of regression equation and auxiliary interface

参数	$y_1/$ mm	$y_2/$ ($^{\circ}$)	$y_3/$ mm	$y_4/$ mm	$y_5/$ mm	$y_6/$ mm ²
理论值	182.3	89.9	70.5	62.6	7.7	6.32
仿真值	180.8	90.3	71.8	64.5	7.3	6.05

5 试验

5.1 机构设计与制造

根据优化参数对成穴机构进行结构设计,如图 8 所示。该机构由非圆齿轮机构、直齿齿轮机构、平行四杆机构、锥齿轮换向器以及成穴器组成。实物图如图 9 所示。

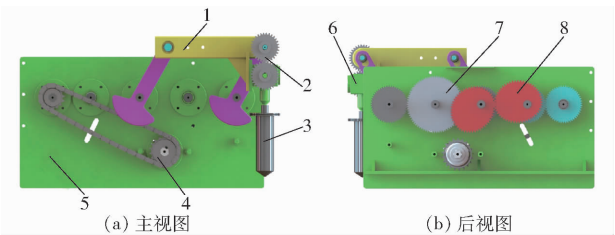


图 8 成穴机构三维模型

Fig.8 Three-dimensional model of cavitation mechanism

1. 平行四杆机构 2. 直齿圆柱齿轮机构 3. 成穴器 4. 传动链
5. 机架 6. 锥齿轮换向器 7. 直齿齿轮轮系 8. 非圆齿轮机构

5.2 田间试验

5.2.1 试验条件

为验证并窖式成穴机构的作业性能,研制了搭载成穴机构的自走式作业平台。试验条件为丘陵山地作物种植常规的大垄,大垄规格为:垄面宽为 0.4 m,垄高为 0.3 m,垄距为 1.2 m。根据上述作业条件对成穴机构进行重复性田间试验,试验在山东省农业机械科学研究院试验基地进行,如图 9 所示。

5.2.2 试验方法与设备

试验测定所成穴体的穴体深度、与仿真测定位置相同的 11 组穴体直径数据、穴距以及穴体直立角度等参数。测量时使用铁锹沿穴体的中心位置挖



图 9 田间成穴试验

Fig.9 Field cavitation tests

开,获取穴体的截面,如图 10 所示。使用卷尺和角尺进行上述参数测量,随机测量 5 组不同穴体的参数,并计算其平均值^[23-25]。



图 10 实际形成的穴体截面

Fig.10 Actually formed cavity section

试验设备包括:187-101 型数显角尺(量程:0°~360°)、卷尺(量程:1~3 m)、标杆和计时器等。

5.2.3 试验结果

穴体测量数据如表 5 所示。测定 5 组穴体各参数的平均值在设计要求范围内,与仿真值相比较存在误差,误差最大值 7.6%,最小值为 1.8%,产生误差的原因是试验田地形起伏以及机构振动;而测量的 5 组穴体中,各组穴体的参数也具有差异性,究其原因 是作业平台前进速度发生波动,导致成穴机构成穴器在前进方向上的速度与作业平台前进速度

表 5 穴体测量数据

Tab.5 Measurement data of cavitation

试验序号	穴体深度/ mm	穴体直立角度/ ($^{\circ}$)	穴体直径 最大值/mm	穴体直径 最小值/mm	穴体直径 方差/mm ²	穴距/mm
1	183.2	93.9	74.7	67.6	7.2	505.5
2	181.4	94.3	72.8	65.2	7.4	496.5
3	182.2	93.5	75.2	68.4	7.8	504.8
4	181.5	86.4	78.6	72.1	7.3	505.9
5	180.3	89.2	76.7	69.1	7.6	502.4
平均值	181.7	90.5	75.6	68.5	7.5	503.1

的差值也产生波动,造成各组穴体参数的差异。

6 结论

(1)根据井窖成穴的农艺要求,基于非圆齿轮-平行四杆设计一种井窖成穴机构,建立了机构运动学模型,结合机构运动学模型采用 Matlab 开发了人机交互可视化辅助界面。

(2)借助辅助界面结合二次正交旋转中心组合试验方法,通过 Design-Expert 8.0 软件建立成穴机构响应指标与试验因素的回归方程,通过响应曲面

得出成穴机构试验因素对响应指标的影响趋势和交互关系;以回归方程为基础,采用多目标函数优化得到成穴机构优化参数组合:曲柄长度 l_2 为 184.710 mm、非圆齿轮偏心率 e 为 0.447、变形系数 m_1 为 1.278。

(3)根据优化后的参数研制成穴机构样机及田间作业平台并进行田间试验,试验结果表明:穴体深度为 181.7 mm、穴体直立角度为 90.5°、穴体直径最大值为 75.6 mm、穴体直径最小值为 68.5 mm、穴体直径方差为 7.5 mm²、穴距为 503.1 mm,优化后的成穴机构满足井窖成穴的农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 邱雪柏,高维常,陈伟,等.井窖式移栽烟田温湿度对烟株前期生长发育的影响[J].烟草科技,2015,48(7):20-24,35.
QIU Xuebai,GAO Weichang,CHEN Wei,et al. Effects of soil temperature and humidity on early stage growth and development of tobacco plants by well-cellar transplanting[J]. Tobacco Science & Technology,2015,48(7):20-24,35. (in Chinese)
- [2] 王永平,吴康云,邢丹,等.贵州山地辣椒绿色高产栽培技术[J].辣椒杂志,2018,16(3):20-21,39.
- [3] 程亚东,谭小兵,刘棋,等.烤烟井窖式移栽不同苗高对烟株生长发育及产质量的影响[J].山东农业科学,2019,51(11):44-48.
CHENG Yadong,TAN Xiaobing,LIU Qi,et al. Effects of different seeding height on growth,yield and quality of tobacco under well-cellar transplanting[J]. Shandong Agricultural Sciences,2019,51(11):44-48. (in Chinese)
- [4] 喻丽华,徐志波,韩忠禄,等.丘陵山区辣椒机械化移栽适应性分析[J].农机化研究,2020,42(10):184-188,194.
YU Lihua,XU Zhibo,HAN Zhonglu,et al. Insertion trajectory analysis and experiment of rape combine harvester reel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(10):184-188,194. (in Chinese)
- [5] 刘林,张永涛,曹德强,等.临沂市设施辣椒产业化现状及发展建议[J].中国果菜,2019,39(6):49-51.
LIU Lin,ZHANG Yongtao,CAO Deqiang,et al. Current situation and development suggestions of facility pepper industry in Linyi City[J]. China Fruit & Vegetable,2019,39(6):49-51. (in Chinese)
- [6] 刘艳红,张宝贤.黄瓜、茄子、辣椒山地越夏栽培品种筛选试验[J].农业科技通讯,2017(5):126-128.
- [7] 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 mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):38-44. (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].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)
- [9] 孙良,沈嘉豪,周誉株,等.非圆齿轮-连杆组合传动式蔬菜钵苗移栽机构设计[J].农业工程学报,2019,35(10):26-33.
SUN Liang,SHEN Jiahao,ZHOU Yuzhu,et al. Design of non-circular gear linkage combination driving type vegetable pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(10):26-33. (in Chinese)
- [10] 周脉乐,薛向磊,钱孟波,等.探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(1):77-83.
ZHOU Maile,XUE Xianglei,QIAN Mengbo,et al. Optimal design and experiment of potted vegetable seedling transplanting mechanism with punching hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):77-83. (in Chinese)
- [11] 金鑫,杜新武,杨传华,等.移栽机曲柄滑槽式栽植机构设计与试验[J].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):83-90. (in Chinese)
- [12] ZHOU M L,SHAN Y Y,XUE X L,et al. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng.,2020,13(4):85-92.
- [13] YOUNG B M,KANG J K,CHAN S R. Development of an onion transplanter: performance analysis and optimum shape investigation of a 4bar link-cam type transplanting device[J]. Journal of Agriculture & Life Science,2016,50:213-224.
- [14] 喻丽华,刘光辉,张富贵,等.背负式幼苗移栽井窖制作机性能测试分析[J].农机化研究,2018,40(3):141-145.
YU Lihua,LIU Guanghui,ZHANG Fugui,et al. Test and analysis for performance on the knapsack well-cellar making machine for seedling transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(3):141-145. (in Chinese)
- [15] 李民朝,燕亚民.2YZS 自走式烟草移栽机的设计[J].农机化研究,2012,34(7):154-156,160.
LI Minchao,YAN Yamin. Design to 2YZS self-propelled tobacco transplanting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(7):154-156,160. (in Chinese)
- [16] 董欣,杨波,徐允飞,等.烟草钵苗移栽机成穴机构的运动学仿真分析[J].农机化研究,2017,39(3):37-41.
DONG Xin,YANG Bo,XU Yunfei,et al. Kinematic analysis and simulation of cavitation mechanism of tobacco seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(3):37-41. (in Chinese)

- 47(12): 1-7, 52.
- WEI Xinhua, BAO Sheng, LIU Xiaokai, et al. Design and experiment on potted-seedling automatic transplanter control system for motion coordinating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 1-7, 52. (in Chinese)
- [26] 胡建平, 常航, 杨丽红, 等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.
- HU Jianping, CHANG Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 78-84. (in Chinese)
- [27] 文永双, 张宇, 田金元, 等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 123-129.
- WEN Yongshuang, ZHANG Yu, TIAN Jinyuan, et al. Design and experiment of detection and supply system of vegetable plug seedlings for transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 123-129. (in Chinese)
- [28] 王超, 刘彩玲, 李永磊, 等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 35-43, 51.
- WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 35-43, 51. (in Chinese)
- [29] 白晓平, 王卓, 胡静涛. 基于有限状态机的农机导航多任务调度研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 26-31.
- BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao. Multi-task scheduling research of farm machinery navigation system based on the FSM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 26-31. (in Chinese)
- [30] 赵丽敏, 郑文艳, 王文博. 轮转调度算法中动态时间片的 CPN 实现[J]. 软件, 2020, 41(8): 129-131.
- ZHAO Limin, ZHENG Wenyan, WANG Wenbo. The CPN implementation of dynamic time slice in round robin scheduling algorithm[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(8): 129-131. (in Chinese)
-

(上接第 113 页)

- [17] 范沿沿, 张秀丽, 李建华. 烟草井窖式移栽机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 40-46.
- FAN Yanyan, ZHANG Xiuli, LI Jianhua. Design and test of tobacco cellar-type transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 40-46. (in Chinese)
- [18] 张大斌, 张元常, 张云飞, 等. 间歇移动烟苗移栽机成穴机构设计与运动特性分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(3): 106-112.
- ZHANG Dabin, ZHANG Yuanchang, ZHANG Yunfei, et al. Design and locomotion characteristics analysis of cavitation mechanism of intermittent mobile tobacco seedlings transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 106-112. (in Chinese)
- [19] 何敬良, 吴序堂, 李建刚. 变形椭圆齿轮连杆机构的运动特性及齿轮副设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 62-65.
- HE Jingliang, WU Xutang, LI Jian'gang. Kinematic characteristics and gear pair design for deformed elliptical geared linkage elliptical geared linkage mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 62-65. (in Chinese)
- [20] 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]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52-57.
- CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 52-57. (in Chinese)
- [21] 喻丽华, 胡长寿, 徐志波, 等. 面向大窝移栽的螺旋成穴装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 198-202.
- YU Lihua, HU Changshou, XU Zhibo, et al. Design and test of spiral cavitation device for transplanting in large den[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 198-202. (in Chinese)
- [22] 刘光辉, 喻丽华, 陈雪, 等. 背负式大窝深栽成穴机设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 263-267.
- [23] 全伟, 吴明亮, 罗海峰, 等. 油菜钵苗移栽机成穴作业方式及参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 13-21, 327.
- QUAN Wei, WU Mingliang, LUO Haifeng, et al. Soil hole opening methods and parameters optimization of pot seedling transplanting machine for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 13-21, 327. (in Chinese)
- [24] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124-136.
- WANG Xuezheng, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124-136. (in Chinese)
- [25] WANG Xuezheng, LI Peng, HE Jinpu, et al. Discrete element simulations and experiments of soil-winged subsoiler interaction[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(1): 50-62.