doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.017

# 茄子钵苗全自动移栽机构优化设计与试验

赵 匀 刘 星 薛向磊 张卫星 单伊尹 周脉乐

(东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

**摘要:**为了实现茄子钵苗的全自动机械化移栽,设计了一种全自动茄子钵苗移栽机构,提出了一种以牛顿插值法构 建的新型非圆齿轮,建立了茄子钵苗移栽机构运动学模型。通过农艺与农机的结合,以钵盘规格、基质体积比、土 钵含水率为试验因素,取苗力与土钵基质损失率为试验指标,进行了三因素三水平的正交试验,试验结果表明,钵 盘规格 105 穴、基质体积比 1、土钵含水率 70% ~80%时,取苗力为 2.70 N,土钵基质损失率为 2.94%,利于茄子钵 苗的全自动机械化移栽。根据移栽机构数学模型结合茄子钵苗农艺要求,开发了牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构 优化设计与分析软件,优化出一组满足茄子钵苗移栽要求的参数。根据优化的参数进行三维建模、虚拟仿真,运用 3D 打印技术制作物理样机进行了轨迹验证试验,验证了该机构的正确性与可行性,通过取苗试验与栽植试验,证 明了该机构的实用性。

关键词:茄子钵苗;移栽机构;牛顿插值齿轮;参数优化;正交试验 中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号:1000-1298(2018)05-0152-09

# Optimal Design and Experiment of Fully-automated Potted Eggplant Seedling Transplanting Mechanism

ZHAO Yun LIU Xing XUE Xianglei ZHANG Weixing SHAN Yiyin ZHOU Maile (College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to realize the automatic transplanting of potted eggplant seedling, a fully-automated potted eggplant seedling transplanting mechanism was designed based on a new type of non-circular gear which was proposed according to Newton interpolation method and the kinematic model of the mechanism was built. Orthogonal experiment with three factors and three levels was carried out according to the combination of agronomy and agricultural machinery. The experiment factors were the size of the pot tray, the volume ratio of the matrix and the water content of the bowl. The experiment indexes were the strength of picking seedling and the loss rate of the matrix. Test results showed that it is beneficial for the fullautomated mechanism to transplant the potted eggplant seedling when the size of the bowl was 105, the volume ratio of the matrix was 1, the water content of the pot body was  $70\% \sim 80\%$ , the picking strength was 2.70 N, and the loss rate of the mortar matrix was 2.94%. According to the mathematical model of transplanting mechanism and eggplant seedling agronomy requirements, computer-aided analysis and optimization software of the automatic transplanting mechanism was developed and used to obtain a set of parameters which satisfied the transplanting operation requirements. The optimized parameters were used for three-dimensional modeling and virtual simulation testing, and 3D printing technology was used to make a physical prototype for the trajectory verification test, which verified the validity and feasibility of the mechanism. The picking seedling tests and the transplanting tests certified the practicability of the mechanism.

Key words: potted eggplant seedling; transplanting mechanism; Newton-non-circular gear; parameter optimization; orthogonal test

收稿日期: 2018-01-18 修回日期: 2018-03-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、国家自然科学基金面上项目(51775104)和黑龙江省应用技术研究与开发计划重 大项目(GA16B302)

作者简介: 赵匀 (1943—2017),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与应用研究

通信作者:周脉乐(1989—),男,讲师,博士,主要从事水旱田移栽装备研究,E-mail: zhoumaile@126.com

## 0 引言

移栽是茄子的主要种植方式。移栽可以缩短生 长周期、提高土地利用率,移栽后根系发达、成熟一 致、方便管理<sup>[1]</sup>。但目前我国茄子移栽大多采用人 工方式,劳动强度大、生产效率低。

国外对蔬菜钵苗移栽机的研究以欧美等国和日 本为代表。欧美等国家采用信息化技术,由3套或 4 套装置完成钵苗移栽的取苗、输送、栽植 3 个动 作,结构复杂、成本高<sup>[2]</sup>。日本洋马公司研制的蔬 菜钵苗移栽机采用行星轮-滑道式栽植机构,由于增 加了滑道机构,移栽效率低,约60株/(min·行)<sup>[3]</sup>。 王蒙蒙等<sup>[4]</sup>提出了曲柄摆杆式夹苗机构,该机构综 合取苗成功率可达95.8%,由于曲柄摆杆机构本身 的运动学特性,具有较大的角加速度和惯性力,工作 效率仅为 30 株/min。陈建能等<sup>[5]</sup>提出了多杆式零 速度钵苗移栽机构,该机构运动为环扣型轨迹,满足 蔬菜农艺要求,目植苗时水平速度为0.03 m/s,实现 低速度移栽,但是属于往复式机构,高速工作时机构 振动和惯性力较大。俞高红等<sup>[6-7]</sup>提出了旋转式穴 盘苗取苗机构和大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植机 构,前者运动轨迹为鹰嘴型完成取苗动作,后者运动 轨迹为环扣型完成栽植动作,钵苗直立度优良率达 85%,栽植效率可达100株/(min·行)。国内应用 的蔬菜移栽机多为半自动移栽机,主要有导苗管式、 吊杯式、链夹式、挠性圆盘式等机型,这类机型需要 人工喂苗,劳动强度大,同时限制了移栽机的工作效 率<sup>[8-12]</sup>。目前我国未见应用于茄子钵苗的全自动 移栽机构,高效、轻简化的全自动茄子钵苗移栽机构 是茄子大面积移栽作业机具的发展方向<sup>[2]</sup>。

本文提出一种全自动茄子钵苗移栽机构——牛 顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构,并通过农艺与农机 的结合,探究茄子钵苗的育苗方案。通过建立机构 数学模型与参数优化,得出满足茄子移栽要求的轨 迹与姿态,并进行轨迹验证试验、取苗试验和栽植 试验。

## 1 移栽机构设计要求与工作原理

## 1.1 茄子钵苗移栽设计要求

茄子钵苗根系发达,茎秆粗壮且不易夹伤,若采 用取土式移栽方式,会对土钵内的根系造成破坏,影 响茄苗的后续生长,所以在设计茄子钵苗移栽机构 时选用夹苗式移栽方式。茄子钵苗夹苗式移栽要求 所生成的轨迹能够满足在一个周期内完成取苗、输 送、栽植3个动作。

茄子钵苗移栽时苗高达到150 mm,需选用大规

格育苗钵盘(钵盘高度大于 30 mm),如图 1 所示。 要求相对运动(相对于机架)轨迹既满足取苗长度 大于土钵的高度,保证土钵完整取出,又满足茄苗在 输送过程中不与秧箱发生干涉。



Fig. 1 Diagram of eggplant seedling growth status

茄子种植需要满足特定株距,即栽植株距 300~400 mm<sup>[1]</sup>。要求绝对运动(相对于地面)轨迹不推 倒已经栽好的茄苗,并保证茄苗的直立度。

## 1.2 茄子钵苗移栽机构工作原理

茄子钵苗移栽机构由牛顿插值齿轮行星系和栽 植臂部件两部分组成。行星轮系由3个相互啮合的 牛顿插值齿轮和齿轮箱壳体组成,栽植臂部件由凸 轮、拨叉、推秧杆、夹片等组成。

茄子钵苗移栽机构简图如图2所示,在变速箱 两侧各布置一个移栽机构,下面选取右侧为研究对 象说明其工作原理。传动箱固接于机架,动力由传 动轴传到上锥齿轮,上锥齿轮与下锥齿轮相互啮合, 下锥齿轮与中心轴固接,太阳轮空套在中心轴上,并 通过牙嵌与传动箱壳体固连,中心轴与齿轮箱壳体 固连,齿轮箱壳体做圆周转动,在齿轮箱壳体内部,





1. 传动箱 2. 传动轴 3. 上锥齿轮 4. 下锥齿轮 5. 齿轮箱壳体 6. 中心轴 7. 太阳轮 8. 中间轮 9. 中间轮轴 10. 行星轮轴 11. 行星轮 12. 凸轮 13. 拨叉 14. 拨叉轴 15. 载植臂壳体 16. 后盖

太阳轮与中间轮相互啮合,中间轮与中间轮轴固 接,中间轮与行星轮相互啮合,行星轮与行星轮轴 固接,同时行星轮轴与栽植臂壳体固接,凸轮与齿 轮箱壳体固接,栽植臂壳体与后盖固接,栽植臂壳 体既随着齿轮箱壳体做圆周运动又随着行星轮轴 相对于齿轮箱壳体转动,拨叉绕拨叉轴摆动,以此 来控制推秧杆运动,实现夹片的开闭,完成取苗和 栽植动作。

## 2 茄子钵苗移栽机构数学模型建立

## 2.1 牛顿插值齿轮节曲线成型方法

非圆齿轮成型方法是整个茄子钵苗移栽机构的 设计关键,以往的偏心齿轮、椭圆齿轮、卵形齿轮等 非圆齿轮的节曲线变化范围小,难以满足设计要 求<sup>[13]</sup>。本文运用牛顿插值法成型非圆齿轮节曲线, 提高了非圆齿轮节曲线的调节范围,使其能满足茄 子钵苗移栽机构特定的轨迹要求。

牛顿插值法是通过插入曲线的节点来控制曲线 形状的变化。为了满足非圆齿轮节曲线设计要求, 对牛顿插值齿轮节曲线做如下改变:①将插入的第 一个节点与最后一个节点重合,保证非圆齿轮节曲 线始终封闭。②采用牛顿3次多项式插值,防止 Runge 现象<sup>[14]</sup>。③采用节点分段逐次生成,增加节 曲线的调节范围。由于非圆齿轮节曲线变化复杂, 低次插值多项式无法形成复杂节曲线。为此本文采 用分段线性插值的方式,将插值区间分成若干个区 间,在每个区间做低次插值。牛顿插值公式为

$$N_{n}(x) = f(x_{0}) + f(x_{0}, x_{1})(x - x_{0}) + f(x_{0}, x_{1}, x_{2})(x - x_{0})(x - x_{1}) + f(x_{0}, x_{1}, x_{2}, x_{3})(x - x_{0})(x - x_{1})(x - x_{2})$$
(1)

其中

$$\begin{aligned} x_1 - x_0 \\ f(x_0, x_1, x_2) &= \frac{f(x_0, x_2) - f(x_0, x_1)}{x_2 - x_1} \\ f(x_0, x_1, x_2, x_3) &= \frac{f(x_0, x_1, x_3) - f(x_0, x_1, x_2)}{x_3 - x_2} \end{aligned}$$

 $f(x_0, x_1) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{1 - f(x_0)}$ 

根据上述成型方法,设计者只需给出控制点的 坐标,即可计算出牛顿插值齿轮节曲线的各点坐标, 牛顿插值齿轮节曲线公式为

$$r_{o1}(\theta) = \sqrt{f_x^2(\theta) + f_y^2(\theta)}$$
(2)  
式中  $f_x(\theta)$ ——节曲线各点 *x* 坐标值关于  $\theta$  函数

 $f_y(\theta)$ ——节曲线各点 y 坐标值关于  $\theta$  函数

# 2.2 运动学模型建立

茄子钵苗移栽机构侧面简图如图 3 所示,建立 以 0 为原点,X 轴、Y 轴为水平方向和垂直方向的坐 标系,对牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构进行运动





在牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构工作过程 中,行星架顺时针匀速转动,太阳轮与机架固接,以 逆时针转动为正,当行星架顺时针转过θ时有:

行星架的绝对转角

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{H}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{H0} - \boldsymbol{\theta} \tag{3}$$

式中  $\varepsilon_{II0}$  ——行星架初始安装角 太阳轮相对于行星架的转角

$$\alpha_1(\theta) = \theta \tag{4}$$

中间轮相对于行星架的转角

$$\alpha_2(\theta) = \int_0^\theta \frac{r_{o1}(x)}{Z - r_{o1}(x)} \mathrm{d}x \tag{5}$$

式中 r<sub>ol</sub>(x) — 太阳轮节曲线的极径 Z — 两齿轮间的中心距

行星轮相对于行星架的转角

$$\alpha_{3}(\theta) = \int_{\varepsilon_{0}}^{\alpha_{2}(\theta)+\varepsilon_{0}} \frac{r_{o2}(x)}{Z - r_{o2}(x)} \mathrm{d}x \qquad (6)$$

式中 r<sub>o2</sub>(x)——中间轮节曲线极径

 $\varepsilon_0$ ——行星架拐角

太阳轮的绝对转角

$$\boldsymbol{\beta}_1(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{H0} \tag{7}$$

中间轮的绝对转角

$$\beta_2(\theta) = \varepsilon_H(\theta) - \alpha_2(\theta) \tag{8}$$

行星架拐角引进的行星轮初始安装角

$$\varepsilon_{20} = \int_{0}^{\varepsilon_{0}} \frac{r_{o2}(2\pi - x)}{Z - r_{o2}(2\pi - x)} dx$$
(9)

行星轮的绝对转角

$$\beta_3(\theta) = \varepsilon_H(\theta) + \varepsilon_0 - \varepsilon_{20} + \alpha_3(\theta)$$
(10)

3个齿轮的向径  $r_{o1}(\theta)$ 、 $r_{o2}(\theta)$ 、 $r_{o3}(\theta)$ 满足公式

$$r_{o2}(\theta) = Z - r_{o1}(\theta)$$
(11)

$$r_{o3}(\theta) = Z - r_{o2}(\theta) \tag{12}$$

太阳轮转动中心位置坐标

$$\begin{cases} x_o(\theta) = 0\\ y_o(\theta) = 0 \end{cases}$$
(13)

中间轮转动中心位置坐标

$$\begin{cases} x_{o1}(\theta) = Z\cos(\varepsilon_{H0} - \theta) \\ y_{o1}(\theta) = Z\sin(\varepsilon_{H0} - \theta) \end{cases}$$
(14)  

$$\widehat{T} = \Re \Re \operatorname{dot} \operatorname{dot$$

式中 ε<sub>1</sub> — 栽植臂与行星架的夹角 *l<sub>02<sup>41</sup></sub>* — 栽植臂长度

## 3 茄子钵苗育苗方案

全自动茄子钵苗移栽涉及土壤、秧苗、机械等多 方面,需要各方面相互适应才能从根本上解决问题。 单纯从机械着手,则难以达到预期目标<sup>[16]</sup>。

在茄子钵苗移栽过程中,取苗机构夹取茎秆、使 钵苗脱离钵盘时,需要克服土钵自身重力及钵盘与 土钵间的黏附力<sup>[17]</sup>。在栽植过程中,取苗机构释放 钵苗使其栽植到土壤中,在与地面接触碰撞时,会造 成土钵基质的损失<sup>[18]</sup>。本文研究钵盘规格、基质体 积比、土钵含水率对茄子钵苗的取苗力和土钵基质 损失率的影响,通过正交试验寻找适合全自动机械 化移栽的最佳育苗方案。

#### 3.1 试验条件

选用东北农业大学园艺站的茄子钵苗,茄苗品种为"紫长茄",苗龄 60 d,育苗方式为钵盘育苗。 为了便于幼苗管理和培育壮苗,采用温室培育茄子 钵苗。育苗穴盘选用3种市场上常见的蔬菜育苗钵 盘,规格 50、72、105 穴,如表1所示。育苗基质为蔬 菜育苗营养土与原土混合使用,其营养土为徐州耀 德化工有限公司生产的营养土,内含有珍珠岩、蛭 石、草炭、有机质等,原土为东北地区黑土,基质体积 比为蔬菜育苗营养土与原土体积比值<sup>[1]</sup>。土钵含 水率采用称重法测定。试验设备主要有 YZC 拉压 力传感器、可移动矩形土槽、固定夹具、多通道拉压 测量仪、电子天平、直尺、套尺等。

表1 钵盘规格尺寸

	140.1	Size of pot truy	IIIII
日十名粉	钵盘规格/穴		
八寸参数	50	72	105
上口径	50	40	40
高度	50	36	34
下口径	28	25	15

#### 3.2 试验方法

选取钵盘规格、基质体积比、土钵含水率为3个

试验因素,每个因素选取3个水平,如表2所示。

	表 2 试验因素水平
Tab. 2	Factors and levels of orthogonal tes

→k J		试验因素					
小十一	钵盘规格/穴	基质体积比	土钵含水率/%				
1	50	1	50 ~ 60				
2	72	2	60 ~ 70				
3	105	3	70 ~ 80				

取苗力试验使用专用夹具夹取茄子钵苗茎秆下 部,以 v = 5 mm/s 的速度使茄子钵苗脱离钵盘,需要 克服茄子钵苗自重、茄子钵苗与钵盘的黏附力。由 于取苗速度非常小,忽略加速度的影响。

取苗力试验为探究茄子钵苗在不同因素水平组 合下从钵盘中拔出所需要的取苗力,如图4所示。 在试验时每个组合进行10次重复试验,求出10次 重复试验的取苗力平均值,以取苗力为试验指标。 本试验的试验指标越小越好。



图 4 取苗试验 Fig. 4 Test of picking seedling

钵苗落体试验为探究茄子钵苗在不同因素水平 组合下取苗机构从距离穴口垂直高度 100 mm 处释 放钵苗到穴口中土钵基质的损失率,每个组合进行 10次试验,求出 10次试验的土钵基质损失率平均 值,以土钵基质损失率为试验指标,本试验的试验指 标越小越好。土钵基质损失率 θ. 计算公式为

$$\theta_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{17}$$

式中 m1----土钵未落体时总质量

*m*<sub>2</sub>——土钵落体后总质量

## 3.3 正交试验结果与分析

采用正交试验方法,试验方案与试验结果如表3所示,*A*、*B*、*C*为因素水平值。

计算三因素三水平下两种试验指标的数据、平均值、极差 R,如表 4 所示。根据极差大小列出两种 试验指标下的因素主次顺序。由表 4 可知,土钵含 水率对取苗力的影响最大,其次为钵盘规格,基质体 积比的影响最小。钵盘规格对土钵基质损失率的 表 3 正交试验方案与结果

#### Tab. 3 Plan and results of orthogonal test

试验	钵盘	基质体	土钵含	空列	取苗	土钵基质
序号	规格 A	积比 B	水率 C	D	力/N	损失率/%
1	1	1	1	1	6.35	4.80
2	1	2	2	2	4.38	5.80
3	1	3	3	3	3.60	6.20
4	2	1	2	3	4.31	3.30
5	2	2	3	1	3.39	3.94
6	2	3	1	2	5.10	4.51
7	3	1	3	2	2.70	2.94
8	3	2	1	3	4.50	3.10
9	3	3	2	1	3.10	4.30

#### 表4 极差分析

Tab. 4 Range analysis

计心比标		钵盘	基质体积	土钵含	空列	
此刊	3 121	规格 A	比В	水率 C	D	
	$K_1$	14.33	13.36	15.95	12.84	
	$K_2$	12.80	12.27	11.79	12.18	
	$K_3$	10.30	11.80	9.69	12.41	
	$k_1$	4.78	4.45	5.32	4.28	
取苗力	$k_2$	4.27	4.09	3.93	4.06	
	$k_3$	3.43	3.93	3.23	4.14	
	极差R	1.35	0.53	2.09	0.22	
	主次顺序	C > A > B > D				
	最优组合	$A_3B_3C_3$				
	$K_1$	16.80	11.04	12.41	13.04	
	$K_2$	11.75	12.84	13.40	13.25	
	$K_3$	10.34	15.01	13.08	12.60	
土钵基质损	$k_1$	5.60	3.68	4.14	4.35	
失率	$k_2$	3.92	4.28	4.47	4.42	
	$k_3$	3.45	5.00	4.36	4.20	
	极差R	2.15	1.32	0.33	0.22	
	主次顺序		A > B >	C > D		
	最优组合		$A_3B$	${}_{1}C_{1}$		

影响最大,其次为基质体积比,土钵含水率影响最小。 从表5中可知,对于试验指标取苗力,B因素的

	表	5	方差分	Ւ析
Tab.	5	Va	riance	analysis

试验	方差	离差	白山座	平均离差	F	日支州
指标	来源	平方和	日田茂	平方和	Г	业有住
	A	2.76	2	1.38	11.00	*
	С	6.77	2	3.38	26.97	**
取田刀	误差	0.50	4	0.13		
	总和	10.03	8			
	Α	7.69	2	3.58	63.17	**
土钵基质	В	2.63	2	1.32	21.64	**
损失率	误差	0.24	4	0.06		
	总和	10.57	8			

注:\*\*表示极显著(P<0.01),\*表示显著(P<0.05)。

影响较小,将其归入误差。重新计算得 $F_{0.05}(2,4) = 6.94 < 11.00$ ,所以因素 A 对取苗力的影响显著。  $F_{0.01}(2,4) = 18 < 26.97$ ,所以因素 C 对最大取苗力的影响极显著。

对于试验指标土钵基质损失率来说, C 因素的 影响较小,将其归入误差。重新计算得  $F_{0.01}(2,4) =$ 18 < 63. 17, 所以因素 A 对土钵基质损失率的影响极 显著。 $F_{0.01}(2,4) =$  18 < 21. 64, 所以因素 B 对土钵 基质损失率的影响也极显著。

综合平衡确定最佳钵盘育苗方案,以上两指标 单独分析的优化条件不一致,所以根据因素的影响 主次和显著程度,综合考虑,确定最佳的育苗方 案<sup>[19]</sup>。

因素 A 对于取苗力的影响显著,对于土钵基质 损失率的影响极显著,因素 A 对两种试验指标优化 的水平一样,所以选取 A<sub>3</sub>。因素 B 对于最大取苗力 的影响不显著,但对于土钵基质损失率的影响极显 著,所以 B 选取土钵基质损失率优化的优水平,因 此选取 B<sub>1</sub>。因素 C 对最大取苗力的影响极显著。 对土钵基质损失率的影响不显著,因此选取 C<sub>3</sub>。优 组合为 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>。

由于表 4 得出的取苗力最优组合 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>与土 钵基质损失率最优组合 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>不在设计的 9 个试 验中,所以需要进行对比验证试验。

从表 6 中可以看出,优组合 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>的取苗力比 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>大 3.84%,但土钵 基质损失率却小了 32.72%。优组合 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>的土钵基质损失率比 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> 大4.83%,但取苗力却小 43.75%。从而可以得到 优组合 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>是 3 组中最优的,其它两组只是单项 试验指标达到了最优。由试验验证可知,钵盘规格、 基质体积比、土钵含水率的最优组合为 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>时, 其取苗力和土钵基质损失率最小,最有利于全自动 茄子钵苗机械化移栽。

表 6 试验结果对比 Tab.6 Test result comparison

方案	最大取苗力/N	土钵基质损失率/%
$A_3B_1C_3$	2.70	2.94
$A_{3}B_{3}C_{3}$	2.60	4.37
$A_3 B_1 C_1$	4.80	2.80

## 4 茄子钵苗茎秆拉伸试验

茄子钵苗移栽机构在取苗时是刚性体(夹片) 和柔性体(茄子茎秆)之间相互作用的过程。为了 保证茄苗在取苗过程中不受破坏,对茄子钵苗茎秆 进行拉伸试验。

#### 4.1 试验条件

选用东北农业大学园艺站的茄子钵苗,茄苗品 种为"紫长茄",苗龄 60 d,育苗方式为钵盘育苗(穴 盘规格为 105 穴、基质体积比为1),茄苗茎秆(距土 钵 10 mm 处)直径均值为 3.1 mm。试验在东北农业 大学力学实验室进行,试验设备有万能材料试验机、 拉力测试仪等。

#### 4.2 试验方法

从茄苗钵盘中随机选取 50 株茄子钵苗。将茄 子钵苗分别在距离钵体 0、50 mm 处使用剪刀剪断。 每株茄子钵苗做成拉伸试样。

将茄子钵苗试样放置于拉伸试验台上,为了防止试样在拉伸时,夹持部位破坏,试验采用纱布包裹 夹持端,试验机以5 mm/min的速度匀速运动,直到 试样茎秆韧皮部被拉断时为止,记录拉断力的数据。

#### 4.3 试验结果与分析

茄子钵苗茎秆拉断力为(38.19±4.59)N。在 取苗过程时,茄子钵苗的拔取力应小于其拉断力。

## 5 茄子钵苗移栽机构的多目标优化

#### 5.1 优化目标分析

根据茄子钵苗农艺要求、人工移栽动作,同时结 合牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构运动情况,本文 提出9个优化目标,根据移栽机构数学模型,建立各 参数与各优化目标的函数关系,将几何目标数值化, 同时给出了优化目标的最优范围<sup>[20]</sup>。优化目标如 下:①移栽机构在周期工作时,绝对轨迹不推倒秧 苗。②取秧夹片不与秧箱发生干涉。③齿轮箱回转 运动最低点距地面大于25 mm。④取秧角介于5°~ 15°之间。⑤推秧角介于45°~60°之间。⑥角度差 介于50°~60°之间。⑦轨迹高度大于240 mm。 ⑧齿轮模数大于2.5。⑨取苗高度大于土钵高度。

## 5.2 移栽机构优化设计与分析软件开发

牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构的优化是一个 多目标(9个目标)、多参数(33个参数)、强耦合的 复杂优化问题。针对该类问题课题组提出了"参数 导引"启发式优化算法<sup>[21]</sup>。根据茄子钵苗移栽机构 数学模型,开发牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构优 化设计与分析软件,优化软件界面如图 5 所示。

## 5.3 移栽机构优化结果

根据以上分析,借助人机交互,运用优化设计软件<sup>[22]</sup>,并结合"参数导引"启发式优化算法进行快速 优化求解。最后得到了一组移栽机构的结构设计参 数,即  $r_1$  = 41 mm,  $r_2$  = 33 mm,  $r_3$  = 28 mm,  $r_4$  = 27 mm,  $r_5$  = 29 mm,  $r_6$  = 33 mm,  $r_7$  = 37 mm,  $r_8$  = 37 mm,  $r_9$  = 31 mm,  $r_{10}$  = 26 mm,  $r_{11}$  = 22 mm,  $r_{12}$  = 21 mm,



图 5 优化软件界面 Fig. 5 Optimize software interface

 $r_{13} = 22 \text{ mm}, r_{14} = 25 \text{ mm}, r_{15} = 31 \text{ mm}, r_{16} = 39 \text{ mm}, r_{17} = 44 \text{ mm}, r_{18} = 43 \text{ mm}, \sigma = 20^{\circ}, \lambda_1 = 44^{\circ}, \lambda_2 = 49.5^{\circ}, \lambda_3 = 270^{\circ}, \lambda_4 = 249^{\circ}, \lambda_5 = -5^{\circ}, L_1 = 76.6 \text{ mm}, L_2 = 160 \text{ mm}, S = 5 \text{ mm}, X_1 = 150 \text{ mm}, Y_1 = 96 \text{ mm}, X_2 = 317 \text{ mm}, Y_2 = 31 \text{ mm}, X_3 = 205 \text{ mm}, Y_3 = 68 \text{ mm}_{\circ}$  移栽 机构优化的优化目标(函数值)即 $M_1 = 30 \text{ mm}, M_2 = 45 \text{ mm}, M_3 = 30 \text{ mm}, M_4 = 1.3^{\circ}, M_5 = 56.8^{\circ}, M_6 = 55.5^{\circ}, M_7 = 245 \text{ mm}, M_8 = 3 \text{ mm}, M_9 = 59 \text{ mm}_{\circ}$ 

## 6 虚拟仿真与物理样机试验

#### 6.1 虚拟仿真与绝对轨迹分析

根据牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构优化设计 与分析软件所优化得到的一组参数,完成茄子钵苗 移栽机构的结构设计。建立茄子钵苗移栽机构各零 件三维实体模型并进行虚拟装配,运用 ADAMS 2013 软件进行虚拟仿真,在虚拟仿真中得到牛顿插 值齿轮茄子钵苗移栽机构栽植臂夹片尖点的运动轨 迹。

绝对运动轨迹下部为环扣型曲线,要求绝对运 动轨迹既要满足在载植臂推秧后,绝对运动轨迹绕 开与茄苗接触,又要满足在下一次茄子钵苗栽植时 不推倒已经栽好的茄苗。

由优化软件可得,株距越小,绝对运动轨迹下部 环扣曲线水平距离越短,下部环扣曲线交点距轨迹 最低点越长;株距越大,绝对运动轨迹下部环扣曲线 水平距离越长,下部环扣曲线交点距轨迹最低点越 短。所以在株距为 300 mm 时,绝对运动轨迹下部 环扣曲线水平距离最短,绝对运动轨迹下部环扣曲 线交点距轨迹最低点最长;在株距为 400 mm 时,绝 对运动轨迹下部环扣曲线水平距离最长,绝对运动 轨迹下部环扣曲线交点距轨迹最低点最短。

由虚拟仿真可得:轨迹最低点距地面为35 mm, 栽植深度为50 mm。株距为300 mm 绝对运动轨迹 如图6所示,当茄苗进入穴口后,茄苗最高点距离轨 迹线为46 mm,载植臂在下一次茄子钵苗栽植时与 已栽植的茄苗最近距离为50mm;株距为400mm绝 对运动轨迹如图7所示,当茄苗进入穴口后,茄苗最 高点距离轨迹线为30mm,载植臂在下一次茄子钵 苗栽植时与已栽植的茄苗最近距离为126mm,因此 该移栽机构的绝对运动轨迹满足株距300~400mm 的移栽要求。



图 6 株距 300 mm 绝对运动轨迹

Fig. 6 Absolute motion trajectory of 300 mm plant spacing







### 6.2 物理样机试验

## 6.2.1 多功能钵苗移栽试验台

采用课题组研制的多功能钵苗移栽试验台进行 样机试验,该试验台由电动机驱动,为Y100L1-4 型。采用变频器实现调速,变频器型号为3G3JV 型。多功能钵苗移栽试验台有横向移箱装置和纵向 送秧机构,工作转速为80~200 r/min。

## 6.2.2 移栽机构相对运动轨迹验证试验

采用 3D 打印技术完成茄子钵苗移栽机构物理 样机的实体成型,对打印成型的零件模型进行组合 装配,完成物理样机的试制。将茄子钵苗移栽机构 的物理样机安装到多功能钵苗移栽试验台上,茄子 钵苗移栽机构运行速度为 100 r/min。通过 Phantom v5.1 高速摄像机对茄子钵苗移栽机构的高速运动 进行拍摄,分析出茄子钵苗移栽机构夹片尖点的轨 迹与姿态。物理样机的轨迹与姿态(如图 8 所示) 与理论轨迹、虚拟样机仿真轨迹(如图 9 所示)基本 一致。

6.2.3 移栽机构取苗试验与栽植试验

为了进一步验证茄子钵苗移栽机构的可行性,



图 8 物理样机轨迹 Fig. 8 Trajectory of physical prototype



图 9 优化软件理论轨迹与虚拟仿真轨迹 Fig. 9 Trajectory of theoretical analysis and virtual simulation

进行物理样机的取苗试验与栽植试验,如图 10 所示。采用课题组研制的多功能钵苗移栽试验台,设置试验台工作转速为 20 r/min。试验设置茄子钵苗移栽机构运行速度为 20 r/min。穴盘采用 105 穴,钵盘长 540 mm、宽 280 mm。穴口上口径 40 mm × 40 mm、下口径 15 mm×15 mm、高 34 mm。由于试验时间非茄苗移栽期,所以选用自制 210 株茄子假苗完成试验,茄子假苗高度为 150 mm,栽植上穴口半径 32 mm、下穴口半径 28 mm,深度 50 mm。取苗效果以取苗成功率来衡量。栽植效果以直立度来衡量,即茄苗茎秆与土槽内土的夹角大于 70°并小于 110° 为优良;40°~70°或 110°~135°合格;其它为倒伏。



图 10 取苗与栽植试验 Fig. 10 Test of picking seedling and transplanting

取苗试验结果:对于茄子假苗的取苗成功率为 91.42%,满足取苗设计要求。根据栽植试验结果, 对于茄子假苗的栽植合格率为 95.71%,其中栽植 优良为 50.95%,倒伏率为 4.29%。茄苗倒伏的原 因主要有两方面,一方面由于假苗的基质较轻与实 际茄苗存在差异,致使假苗重心上移;另一方面由于 在完成茄苗移栽后,还需进行覆土镇压等过程。

#### 7 结论

(1)提出了一种全自动茄子钵苗移栽机构,并 建立了茄子钵苗移栽机构的数学模型。

(2) 三因素三水平的正交试验与验证试验结果 表明:钵盘规格为105 穴,基质体积比为1,土钵含 水率为70%~80%,茄子钵苗取苗力为2.70 N,土 钵基质损失率为2.94%,该组合使取苗力与土钵基 质损失率达到最优,并进行了茄子钵苗茎秆的拉伸 试验,为后续的茄子钵苗全自动移栽机构优化提供 了有利条件。

(3)根据茄子钵苗在移栽农艺上对轨迹与姿态的要求,开发了牛顿插值齿轮茄子钵苗移栽机构优化设计与分析软件,并运用"参数导引"启发式优化设计算法与人机交互优化方法优化出一组满足茄子钵苗移栽工作要求的设计参数。

(4)通过比较与分析理论轨迹、虚拟仿真轨迹、 物理样机试验轨迹,验证了茄子钵苗移栽机构理论 分析与结构设计的正确性与可行性。通过移栽机构 的取苗试验与栽植试验验证了茄子钵苗移栽机构的 实用性。

#### 参考文献

- 1 高坤金,温吉华. 茄子栽培入门到精通[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- 2 于晓旭,赵匀,陈宝成,等.移栽机械发展现状与展望[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):44-53.http://www.j-csam.org/ jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20140808&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the

Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):44-53. (in Chinese)

- 3 LIU Fa, HU Jianping, HUANG Yingsa, et al. Design and simulation analysis of transplanter's planting mechanism [J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, IFIP Advances in Information and Comunication Technology, 2011, 344:456-463.
- 4 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)
- 5 陈建能,王伯鸿,张翔,等. 多杆式零速度钵苗移栽机植苗机构运动学模型与参数分析[J]. 农业工程学报,2011,27(9):7-12. CHEN Jianneng, WANG Bohong, ZHANG Xiang, et al. Kinematics modeling and characteristic analysis of multi-linkage transplanting mechanism of pot seeding transplanter with zero speed[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):7-12. (in Chinese)
- 6 俞高红,俞腾飞,叶秉良,等.一种旋转式穴盘苗取苗机构的设计[J].机械工程学报,2015,51(7):67-76. YU Gaohong, YU Tengfei, YE Bingliang, et al. Design of a rotary plug seedling pick-up mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(7):67-76. (in Chinese)
- 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/OL].农业机械学报,2015,46(7):38-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20150706&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.006.

YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable potseedling planting mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):38 - 44. (in Chinese)

- 8 吕志军,单伊尹,王杰,等.蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J].中国农机化学报,2017,38(11):30-34. LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seedlingpicking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(11):30-34. (in Chinese)
- 9 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. NI Xiangdong, MEI Weijiang. Design on the tomato transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(2):84-86.(in Chinese)
- 10 吴彦强,王文莉,侯加林.2ZBX-4型吊杯式蔬菜移栽机的研究与设计[J].农机化研究,2017,39(8):107-111.
   WU Yanqiang, WANG Wenli, HOU Jialin. Design and research of the 2ZBX 4 cup vegetable transplanting machine [J].
   Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(8):107-111. (in Chinese)
- 11 袁文胜,金诚谦,吴崇友,等.链夹式移栽机立苗机理分析与试验[J].中国农业大学学报,2015,20(6):277-281. YUAN Wensheng, JIN Chengqian, WU Chongyou, et al. Theoretical analysis and experiments of transplanting mechanism of chain-clamp transplanter for rapeseed seedlings [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6):277-281. (in Chinese)
- 12 王石,王笑岩,李成华. 挠性圆盘式蔬菜移栽机运动仿真分析[J]. 农机化研究,2013,35(10):42-45.
   WANG Shi, WANG Xiaoyan, LI Chenghua. Analysis of kinematic simulation of soft disc-type vegetable seedling transplanter[J].
   Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,35(10):42-45. (in Chinese)
- 13 王超. 基于非圆齿轮的变速机构设计[D]. 北京:北京邮电大学,2010.

- 14 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 15 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- 16 缪小花,毛罕平,韩绿化,等.黄瓜穴盘苗拉拔力及土钵抗压性能影响因素分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1): 27-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 2013s106&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn. 1000-1298.2013.S1.006.

MIAO Xiaohua, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Analysis of influencing factors on force of picking plug seedlings and pressure resistance of plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1):27 - 32. (in Chinese)

17 韩绿化,毛罕平,严蕾,等.穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):23-30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20150704&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2015.07.004.

HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):23 - 30. (in Chinese)

- 18 梁喜凤,蔡阳阳,王永维.番茄钵苗自动移栽钵体物理机械特性试验[J].浙江大学学报,2015,41(5):616-622. LIANG Xifeng, CAI Yangyang, WANG Yongwei. Experiment on physical and mechanical properties of tomato seedling pot for automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Zhejiang University,2015,41(5):616-622. (in Chinese)
- 19 葛宜元,梁秋艳,王桂莲.试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
- 20 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)
- 21 赵匀,赵雄,代丽,等."参数导引"启发式优化算法及应用[C]//第10届中国机构与机器科学应用国际会议 (2013CCAMMS)论文集.中国机械工程学会机械传动分会机构学专业委员会,2013:1-6.
- 22 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.