

# 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验

崔巍<sup>1,2</sup> 赵亮<sup>1,2</sup> 刘立晶<sup>2,3</sup> 刘忠军<sup>1,2</sup> 赵金辉<sup>2,3</sup> 赵郑斌<sup>1,2</sup>

(1. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;  
3. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了实现蔬菜移栽的自动取苗作业,基于二阶椭圆齿轮行星轮系设计了自动取苗机构,并建立该机构的运动学数学模型和运动仿真模型。通过分析自动移栽的农艺要求,确定了机械取苗过程中取苗爪理想的运动轨迹和取投苗姿态。在理论分析的基础上,借助运动仿真优化了二阶椭圆齿轮行星轮系结构参数,包括椭圆齿轮偏心率、栽植鸭嘴相对于行星架初始安装角、行星架初始安装角、第一中间齿轮与第二中间齿轮夹角,最终得出一组最佳的参数组合。优化后的取苗机构能实现直线取苗和竖直投苗。在此基础上,设计了自动取苗试验台,进行取苗试验。试验结果显示,二阶椭圆行星轮系取苗机构工作效率为 80 株/min 时,取苗成功率平均达到 91.3%,达到了预期的设计目标。

**关键词:** 移栽机; 二阶椭圆行星轮系; 取苗机构; 优化; 试验

**中图分类号:** S223.92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0079-06

## Kinematic Analysis and Experiment of Rotary Pick-up Mechanism on Seedling Pick-up Device

CUI Wei<sup>1,2</sup> ZHAO Liang<sup>1,2</sup> LIU Lijing<sup>2,3</sup> LIU Zhongjun<sup>1,2</sup> ZHAO Jinhui<sup>2,3</sup> ZHAO Zhengbin<sup>1,2</sup>

(1. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China  
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China  
3. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A seedling pick-up mechanism which was driven by planetary second-order elliptic gear system was developed. The work principle and structural features of the seedling pick-up mechanism were introduced. The kinematics model was established, the kinematics property was analyzed and the kinematics simulation was carried out. Both the trajectory and pose of the seedling pick-up claw were all analyzed. According to vegetable transplanting agronomy, the best way of separating the seedlings from plug was discussed. Based on the analysis and the simulation mentioned above, structural parameters of the planetary second-order elliptic gear system were optimized, such as eccentricity ratio of the elliptic gear, the angle between the first middle gear and the second middle gear, the initial angle of planetary carrier and the initial installation angle of pick-up claw in respect to it. The optimized seedlings pick-up mechanism could take seedlings out of plug along a linear path and release it with upright posture. Finally, an experiment bench with rotary picking-up mechanism was developed and produced. Experiments were carried out to validate the optimization. The result of experiments showed that, at the working frequency of 80 plants per minute, the average success rate of picking-up seedling was 91.3%.  
**Key words:** transplanter; planetary second-order elliptic gear system; seedling pick-up device; optimization; experiment

### 0 引言

蔬菜产业是农业农村经济的重要支柱产业。蔬

菜生产属于劳动密集型作业,作业环节多,劳动强度大。小苗移栽是蔬菜生产的重要环节。国内现有半自动移栽机械工作效率低,推广使用的经济效益不

明显,难以满足蔬菜规模化生产需求,急需高速移栽装备<sup>[1-2]</sup>。自动取苗技术是高速移栽的主要技术瓶颈,也是目前研究的热点之一。国内外众多科研机构都进行了自动取苗机构研究,并取得了显著效果,但目前还没实现大规模推广和应用<sup>[3-10]</sup>。

本文对二阶椭圆行星轮系取苗机构参数进行优化,利用二阶椭圆传动比多次变化的特性,经行星轮系传动,驱动与行星轮固连的取苗爪按需求摆动,结合取苗爪自身的伸出动作,获得满足穴盘取投苗要求的理想轨迹和姿态。

### 1 结构特点和工作原理

目前国内研究的自动取苗机构主要有 2 种取苗方式:迎苗扎取式单株取苗和顶夹结合式排式取苗<sup>[3-7]</sup>。本文研究迎苗扎取式单株取苗。

迎苗扎取式单株取苗是基于仿生学原理的一种取苗技术,模仿人手的取苗投苗动作,实现自动取苗。取苗机构多由取苗爪和驱动部件组成。具体实施方式为:取苗爪扎入基质,以夹持基质的方式实现穴钵分离,带苗运动至栽植部件上方,将苗投出。动作过程如图 1 所示。取苗时,为了最小程度破坏苗钵,将苗完整取出,要求 BC 段、CD 段轨迹近似为直线,并且夹角越小越好,即直线插入苗钵,并近似原轨迹拔出,而到达投苗点 E 时秧苗应以竖直姿态投出,以保证栽植器接苗准确性和栽苗直立度。整个过程由单一工作部件完成,动作连续,结构简单。

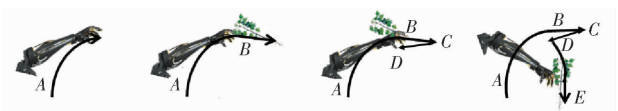


图 1 取苗装置运动轨迹

Fig. 1 Moving path of seedling pick-up mechanism

迎苗扎取式取苗运动轨迹复杂,动作频率高,研发难度大。国内众多学者开展了多种非圆齿轮行星轮系取苗机构的研究工作,采用一阶椭圆齿轮、变性椭圆齿轮、非圆齿轮、不完全齿轮等非匀速传动方案,通过优化结构参数,获得符合农艺要求的取苗轨迹<sup>[4-7]</sup>。而在实际应用中,取苗爪姿态和轨迹同样重要,都对取苗成功率有显著影响。

行星轮系的周期性传动比变化规律决定了执行部件的运动轨迹。常规的椭圆齿轮、偏心-共轭非圆齿轮等节曲线阶数为 1,传动周期内传动比函数变化一次,输出行星轮轴摆动一次,难以实现穴盘苗复杂的取苗要求。采用二阶齿轮节曲线,周期内传动比函数可以实现二次波动,如果齿轮参数和配置设计合理,更利于实现复杂的运动轨迹。因此本文采

用二阶椭圆齿轮,设计双排行星齿轮机构驱动取苗爪,通过优化结构参数,获得理想的取苗爪轨迹和取投苗姿态,实现穴盘苗自动取苗。

### 2 取苗机构运动学模型建立

#### 2.1 取苗机构运动分析

二阶椭圆齿轮行星轮系取苗机构基本结构如图 2 所示。根据传动需要,中间轮采用双排齿轮传动型式,共有 7 个二阶椭圆齿轮组成行星齿轮系。取苗机构工作时,太阳轮固定不动,第一中间轮和第二中间轮之间错开特定角度。行星架(行星齿轮箱)在外力作用下匀速转动。通过太阳轮、第一中间轮、第二中间轮和行星轮之间的啮合,驱动行星齿轮轴转动。行星齿轮轴在绕行星架回转中心( $O_1$ )公转的同时,还围绕自身回转中心( $O_2$ )做反向非匀速转动,从而驱动固结在行星轮轴上的取苗爪做周期性的非匀速摆动,形成特殊的运动轨迹和摆动姿态。本文所设计取苗机构包含一对取苗爪,行星齿轮箱内对应 2 组椭圆齿轮组,且以相位差 180°分布于回转中心( $O_1$ )两侧,运动规律一致,因此,选取单边行星齿轮系进行分析。

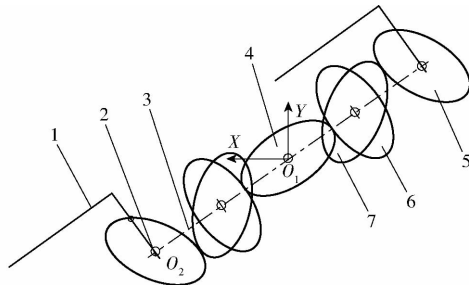


图 2 二阶椭圆行星齿轮取苗机构结构示意图

Fig. 2 Principle diagram of seedling pick-up mechanism with planetary second-order elliptic gears

- 1. 取苗爪 2. 行星齿轮轴 3. 行星架(行星齿轮箱) 4. 太阳轮
- 5. 行星轮 6. 第一中间轮 7. 第二中间轮

如图 2 所示,建立以点  $O_1$  为原点、水平方向为 X 轴、竖直方向为 Y 轴的直角坐标系。相关参数见表 1。

#### 2.2 行星轮角位移方程

齿轮系中所有传动齿轮均为全等的二阶椭圆齿轮,设行星架回转中心  $O$  在椭圆的一个焦点处,则二阶椭圆齿轮节曲线示意图如图 3 所示。

二阶椭圆可由普通椭圆演变而成,因此其极坐标方程通常采用对应普通椭圆的参数来表示。则二阶椭圆极坐标方程式为<sup>[11]</sup>

$$r_1 = \frac{A(1 - k_1^2)}{1 - k_1 \cos(2\varphi_1)} \quad (1)$$

其中

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi$$

表 1 相关参数

Tab.1 Parameter specification

| 参数          | 含意                 | 参数                 | 含意             |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------|
| $A$ (mm)    | 普通椭圆长半轴长度          | $\omega$ (°/s)     | 行星架角速度         |
| $a$ (mm)    | 二阶椭圆齿轮中心距          | $\theta$ (°)       | 第一中间轮与第二中间轮的夹角 |
| $r_1$ (mm)  | 太阳轮回转中心到与中间轮啮合点的距离 | $\varphi$ (°)      | 任意时刻行星架的角位移    |
| $r_2$ (mm)  | 中间轮回转中心到与太阳轮啮合点的距离 | $\varphi_0$ (°)    | 行星架初始安装角       |
| $r_2'$ (mm) | 中间轮回转中心到与行星轮啮合点的距离 | $\varphi_M$ (°)    | 取苗爪角位移         |
| $r_3$ (mm)  | 中间轮回转中心到与行星轮啮合点的距离 | $\varphi_{21}$ (°) | 中间轮相对于行星架的角位移  |
| $k_1$       | 普通椭圆偏心率            | $\varphi_{31}$ (°) | 行星轮相对于行星架的角位移  |
| $i_{12}$    | 二阶椭圆齿轮传动比          | $\alpha_0$ (°)     | 取苗爪初始安装角       |

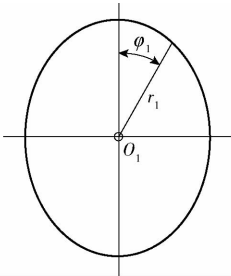


图 3 二阶椭圆齿轮节曲线

Fig.3 Pitch curve of the second-order elliptic gear

式中  $\varphi_1$ ——极角

则根据二阶椭圆齿轮的传动特性可得

$$\left\{\begin{aligned}r_2 &= \frac{A(1-k_1^2)}{1+k_1\cos(2\varphi_2)} \\ a &= A(1+\sqrt{4-3k_1}) \\ \varphi_{21} &= \arctan\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\tan\varphi_1\right) \\ \varphi'_{21} &= \varphi_{21} + \theta = \arctan\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\tan\varphi_1\right) + \theta \\ i_{12} &= \frac{k_1(k_1 - \cos(2\varphi_1)) + (1 - k_1\cos(2\varphi_1))\sqrt{4-3k_1^2}}{1-k_1^2}\end{aligned}\right.$$

(2)

式中  $\varphi'_{21}$ ——中间轮相对于行星架的角速度

则行星轮 5 (行星轮轴 2) 的角位移方程为

$$\varphi_{31} = \arctan\left(\frac{1+k_1}{1-k_1}\tan\varphi'_{21}\right)$$

(3)

行星轮轴心  $O_2$  位移方程为

$$\begin{cases}x_B = 4a\cos\varphi_1 \\ y_B = 4a\sin\varphi_1\end{cases}$$

(4)

式中  $x_B$ ——点  $O_2$  横坐标

$y_B$ ——点  $O_2$  纵坐标

故取苗爪末端  $M$  的位移方程为

$$\begin{cases}x_M = x_B + l\cos\varphi_M \\ y_M = y_B + l\sin\varphi_M\end{cases}$$

(5)

其中

$$\varphi_M = \varphi_{31} + \alpha_0$$

式中  $x_M$ ——点  $M$  横坐标

$y_M$ ——点  $M$  纵坐标

$l$ ——取苗爪回转中心到取苗爪尖端的距离

3 取苗机构结构参数优化

3.1 优化目标

根据穴盘苗自动取苗农艺要求,优化目标包括<sup>[3,12-13]</sup>:

(1)移栽爪取苗段轨迹近似直线,尽量与苗盘垂直,直线段长度不小于苗钵长度。取苗时取苗爪角度应与其本身运动轨迹尽量一致,保证在扎入基质过程中最大程度减小对基质的扰动。此时行星轮角速度  $\omega_{31}$  应尽量小。

(2)投苗时,苗体尽量呈竖直状态,投苗位置离接苗部件越近越好。

(3)取苗爪运动轨迹应满足送苗位移的要求,并有效避开苗盘架和栽植部件。

(4)在满足以上条件下,运动轨迹尽可能短,这有利于提高取苗速度和改善该机构的动力学特性。

根据建立的运动方程以及取苗农艺要求可知,行星轮角位移  $\varphi_{31}$  直接影响取苗角和投苗角,而取苗爪末端点  $M$  的位移则决定了取苗爪的运动轨迹。

3.2 参数优化

根据优化目标,结合行星轮角位移方程和取苗爪末端点  $M$  运动轨迹方程,可得出对取苗部件设计参数选取有指导意义的约束条件。以所建立的运动学模型为依据,利用 SolidWorks 软件建立二阶椭圆齿轮取苗机构的参数化模型,如图 4 所示。本研究中,取苗爪为了完成取苗投苗动作,在取苗段会向前伸出,夹取基质;投苗段会缩回,退出基质。因此仿真研究中苗爪的轨迹是行星齿轮系驱动和苗爪在特定位置伸出和缩回形成的复合轨迹。

二阶椭圆行星齿轮取苗机构中,可变参数很多,如椭圆偏心率  $k_1$ 、行星架初始安装角  $\varphi_0$ 、取苗爪初始安装角  $\alpha_0$ 、第一中间齿轮与第二中间齿轮夹角  $\theta$ 、椭圆长半轴长度  $a$  等,优化目标包括运动轨迹和取投苗姿态,因此优化过程实质上是寻求一组满足多目标优化的非劣解,属于一个多目标、多变量的复杂

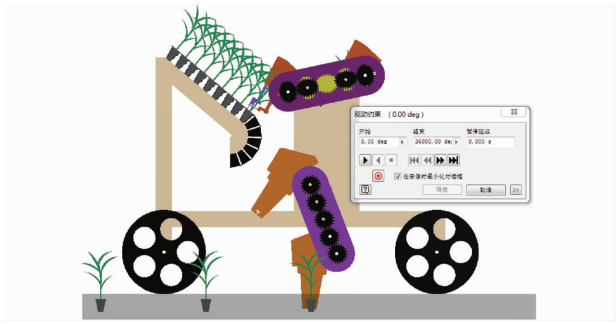


图4 二阶椭圆齿轮取苗机构的参数化模型  
Fig.4 Parameter model of seedling pick-up mechanism

约束优化问题。

本文借助二阶椭圆齿轮取苗机构的参数化模型,采用人机交互式的优化方法进行参数优化。首先在特定范围内,改变各参数值,找出参数变化对运动轨迹和栽植器姿态的影响规律,最终通过多次赋值的方法,获得最佳参数组合。

3.2.1  $k_1$ 变化对取苗轨迹和苗爪姿态的影响

根据二阶椭圆齿轮的设计原理,齿轮无内凹的条件是  $k_1 \leq 1/3$ <sup>[11]</sup>。根据以往设计经验,取  $k_1$  为 0.05、0.175、0.3,寻找  $k_1$  改变时对点  $M$  运动轨迹和苗爪姿态的影响规律。图5为通过运动仿真得到的不同  $k_1$  值情况下取苗爪的运动轨迹,图6为在取苗段即行星架角位移在  $0^\circ \sim 60^\circ$  时,苗爪角度的摆动情况。仿真结果显示,偏心率明显影响取苗段的运动轨迹以及取苗段和投苗段苗爪角度的摆动幅度。 $k_1$  较小时,取苗段苗爪角度摆动幅度较小,角度变化为  $9.4^\circ$ ,但会形成较大的V形轨迹,随着  $k_1$  值的增大,V形夹角逐渐减小,当  $k_1 = 0.175$  时,整个取苗段轨迹接近于直线状态,角度摆动略大,为  $25.1^\circ$ 。当  $k_1$  继续增大时,取苗爪在取苗段和投苗段角度摆动幅度明显增大,轨迹形成扣环,并且随着  $k_1$  的增大,扣环越来越大。当  $k_1 = 0.3$  时,苗爪角度摆动幅度达到  $66.66^\circ$ 。

3.2.2  $\theta$ 对运动轨迹和苗爪姿态的影响

根据以往设计经验,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  内, $\theta$  分别取  $30^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$ ,研究  $\theta$  变化对点  $M$  运动轨迹和苗爪姿态的影响规律。仿真结果显示, $\theta$  明显影响取苗爪姿态,即影响取苗角和投苗角,如图7所示。

采取同样的方法,改变取苗爪相对于行星架初

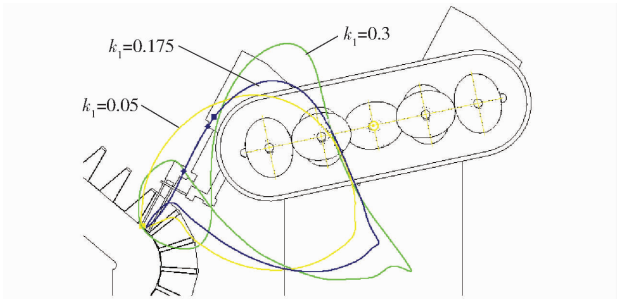


图5 不同椭圆偏心率的取苗爪运动轨迹  
Fig.5 Comparison of seedling pick-up claw motion curves with different eccentricity ratios

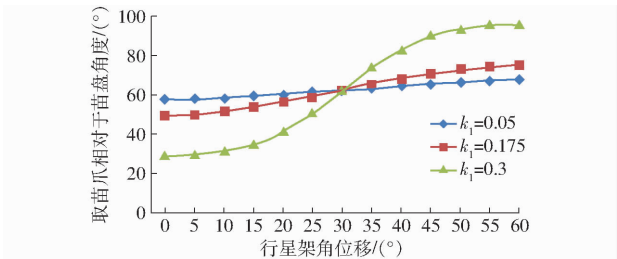


图6 不同  $k_1$  时取苗角的变化曲线  
Fig.6 Angle-change curves of seedling pick-up claw with different  $k_1$

始安装角  $\alpha_0$ 、行星架初始安装角  $\varphi_0$ ,进行仿真分析,结果显示  $\alpha_0$ 、 $\varphi_0$  也显著影响取苗爪姿态。

3.2.3 优化结果分析

基于上述影响趋势,借助于参数化模型,通过对各参数多次赋值,最终得到一组最佳的参数组合。基于该组参数组合,取苗爪获得了满足快速稳定取苗、竖直投苗的理想工作轨迹  $ABCD A$ ,如图8所示。取苗机构从图8a所示的初始位置按照顺时针方向转动,当行星架旋转一周时,取苗爪末端点  $M$  依次经过以下4个工作段,对应工作状态如下:①  $AB$  取苗段:取苗爪以近似直线的运动轨迹垂直插入穴盘,夹持基质,再以近似直线的运动轨迹退出穴盘。完成取苗动作,实现钵苗分离。②  $BC$  送苗段:退出穴盘后,取苗爪夹持小苗沿预定轨迹运动至投苗点。此段轨迹实现了两组取苗爪及其上的苗体互相避让,以及苗爪与苗盘架的有效避让,避免部件之间的互相干涉。③  $CD$  投苗段:取苗爪携带小苗运动至投苗位置,此时苗体姿态调整为近似竖直状态,苗爪缩回,苗体在挡苗环的作用下脱离苗爪,落入栽植鸭嘴。④  $DA$  回程段:投苗后的取苗爪沿预定轨迹上升

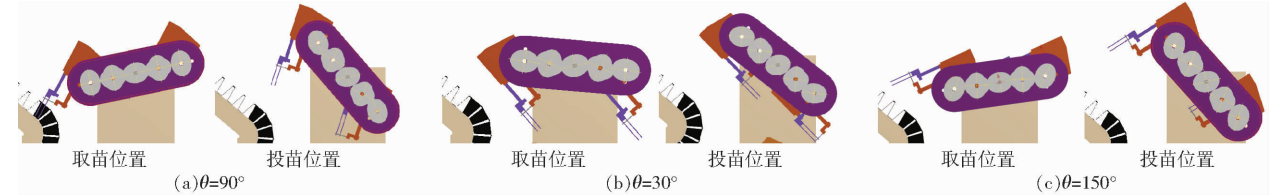


图7  $\theta$ 对取苗爪取投苗角的影响  
Fig.7 Pose of seedling pick-up claw with different  $\theta$



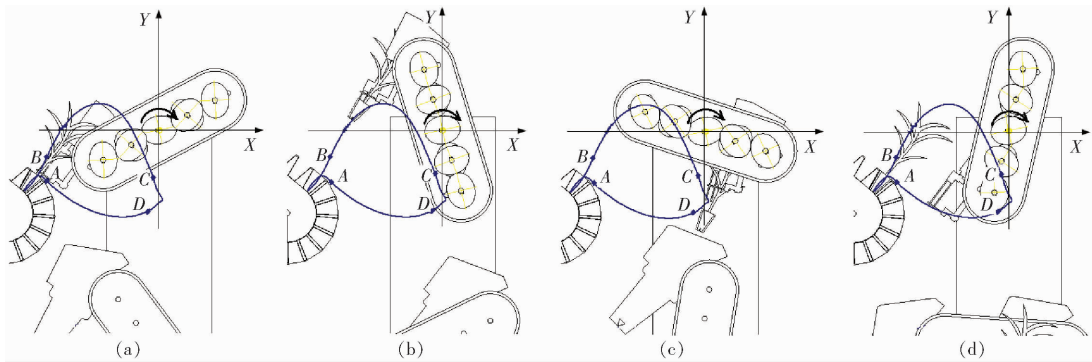


图 8 优化后的取苗爪点  $M$  轨迹及不同位置姿态变化

Fig. 8 Motion curves and position version ofpick-up claw optimized

回程至取苗位置。此过程同样需要避让另外一组取苗爪及其夹持的苗体。

4 取苗机构结构与试验

4.1 结构设计

在理论分析的基础上,设计了基于二阶椭圆行星轮系的取苗机构,如图 9 所示。

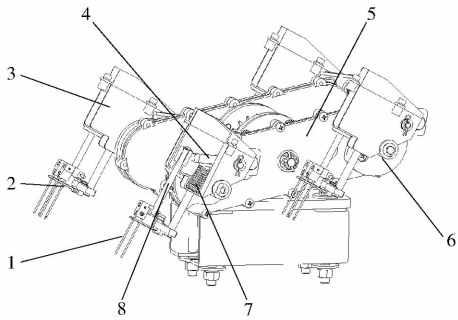


图 9 二阶椭圆齿轮取苗机构结构图

Fig. 9 Structure diagram of seedling pick-up mechanism with planetary second-order elliptic gears

1. 取苗爪 2. 挡苗环 3. 取苗爪箱体 4. 压杆 5. 二阶椭圆齿轮箱 6. 取苗凸轮 7. 弹簧 8. 苗爪推杆

取苗部件设计为 2 行,以适应蔬菜种植单垄双行的种植农艺<sup>[14]</sup>。其工作原理为二阶椭圆齿轮箱驱动取苗部件做回转运动,当取苗爪运动至取苗位置时,苗爪在取苗凸轮、压杆和苗爪推杆的联合作用下向前伸出,扎入并夹紧基质。之后苗爪夹持小苗运动至投苗点,此时取苗凸轮转到低点,苗爪在弹簧的作用下回缩至初始位置。在挡苗环的作用下,苗体被推出苗爪,完成投苗动作。

4.2 试验

设计了自动取苗试验台进行取苗试验,自动取苗试验台如图 10 所示<sup>[15-18]</sup>。

动力由变速箱输入,再经由链传动驱动各工作部件。苗盘放置于送苗机构上,送苗机构通过横向和纵向进给将苗送到取苗位置。取苗机构将苗取出后投入栽植机构。

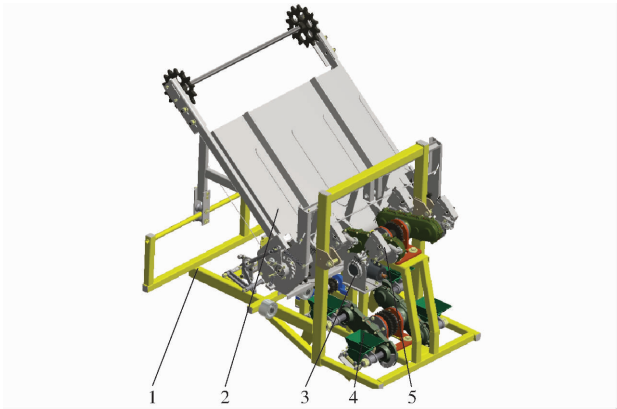


图 10 自动取苗试验台

Fig. 10 Test bench of automatic transplanter

1. 机架 2. 送苗机构 3. 变速箱 4. 栽植机构 5. 取苗机构

(1)试验方法:将自动取苗试验台通过三点悬挂方式挂接在移栽底盘上,移栽底盘动力输出轴通过万向节联轴器与试验台变速箱连接,为试验平台提供动力。试验对象为 128 穴软盘所培育的西红柿钵苗,苗龄为 40 d。试验按照相关检测方法和标准<sup>[19-20]</sup>对样机作业性能进行测定。以 80 株/min 的取苗速度进行取苗试验,一次取苗 2 盘,记录成功取苗株数,重复 3 次。试验样机如图 11 所示。

(2)试验结果:对试验数据进行整理得到试验结果如表 2 所示。结果表明,工作效率为 80 株/min



图 11 二阶椭圆齿轮行星轮系取苗机构试验样机

Fig. 11 Seedling pick-up mechanism with planetary second-order elliptic gears

时,取苗装置的平均取苗成功率为 91.3%,达到了设计要求。

表 2 取苗试验结果

| Tab.2 Measured results of seedling pick-up seedling |                                 |           |            |             |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 测量组号                                                | 工作效率/<br>(株·min <sup>-1</sup> ) | 总株数/<br>株 | 取出株数/<br>株 | 取苗成功<br>率/% |
| 1                                                   | 80                              | 256       | 232        | 90.6        |
| 2                                                   | 80                              | 256       | 236        | 92.2        |
| 3                                                   | 80                              | 256       | 233        | 91.0        |
| 平均值                                                 |                                 |           |            | 91.3        |

5 结论

(1)建立了二阶椭圆齿轮行星轮系取苗机构运

动学模型,得出取苗爪的角位移方程和运动轨迹方程。

(2)在农艺要求的基础上,确定了参数优化目标。建立二阶椭圆齿轮行星轮系栽植机构参数化模型,采用人机交互式的优化方法,对椭圆齿轮偏心率 $k_1$ 、栽植鸭嘴相对于行星架初始安装角 $\alpha_0$ 、行星架初始安装角 $\varphi_0$ 、第一中间齿轮与第二中间齿轮夹角 $\theta$ 进行了优化,最终得到一组最佳的参数组合。根据运动仿真显示,优化后的取苗机构能实现直线取苗、竖直投苗。

(3)设计了二阶椭圆行星齿轮取苗机构及取苗试验台,并制作了试验样机。试验结果显示,移栽机工作效率为 80 株/min 时,取苗成功率为 91.3%。

参 考 文 献

[1] 崔巍,徐盼,王海峰,等. 旱地钵苗自动移栽技术现状与分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 1-5, 28.  
CUI Wei, XU Pan, WANG Haifeng, et al. Present status and analysis of dry-land auto-transplanting seedling technique [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 1-5, 28. (in Chinese)

[2] 何亚凯,颜华,崔巍,等. 蔬菜自动移栽技术研究现状与建议[J]. 农业工程, 2018, 8(4): 1-7.  
HE Yakai, YAN Hua, CUI Wei, et al. Research situation and analysis on automatic transplanting technology for vegetable seedling[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 1-7. (in Chinese)

[3] 崔巍,方宪法,赵亮,等. 齿轮-五杆取苗装置机构优化与试验验证[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 74-77.  
CUI Wei, FANG Xianfa, ZHAO Liang, et al. Structural optimization and experimental verification of geared five-bar linkage seedling pick up device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 74-77. (in Chinese)

[4] 郭林强. 穴盘苗全自动移栽机气动取苗装置的设计与试验[D]. 镇江:江苏大学, 2016.  
GUO Linqiang. Design and test on the pneumatic taking seedling mechanism of auto-transplanter [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[5] 俞高红,刘炳华,赵匀,等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 53-57.  
YU Gaohong, LIU Binghua, ZHAO Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 53-57. (in Chinese)

[6] 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 gear train of cand tests on seedling pick-up mechanism of planetary combined gear transmission with non-circular gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 74-82. (in Chinese)

[7] 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)

[8] MANILLA R D, SHAW L N. A high-speed dibbling transplanter [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1987, 30(4): 904-908.

[9] JI Jiangtao, JIN Xin, DU Xinwu, et al. Motion trajectory analysis and performance test of up-film punch transplanting mechanism [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(2): 30-38.

[10] CUI Wei, LIU Shuangxi, GAO Lijuan, et al. Development of 2ZFS-1A multifunctional tobacco transplanting machine [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Sup. 2): 36-41.

[11] 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.

[12] 赵匀. 农业机械计算机辅助分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.

[13] 胡静,韩绿化,温贻芳,等. 与自动移栽相关的不同蔬菜穴盘苗力学特性[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 132-136.  
HU Jing, HAN Lühua, WEN Yifang, et al. Mechanical properties of different vegetable plug seedlings as related to automatic transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 132-136. (in Chinese)

[14] 崔巍. 旱地钵苗自动移栽机理论与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.  
CUI Wei. Research on dry land automatic transplanter for plug seedling[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

- WANG Xiaodan, WANG Hongmei, HAN Yunxiu, et al. Structure of beef chewing model based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 228–234. (in Chinese)
- [21] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121–129.  
LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of panax notoginseng seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121–129. (in Chinese)
- [22] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160910&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam). DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 09. 010. (in Chinese)
- [23] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 118(5): 117–122.
- [24] 赵旭, 张祖立, 黄秋波, 等. 玉米根土复合体剪切性能试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 126–132.  
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, HUANG Qiubo, et al. Cutting performance of corn root-soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 126–132. (in Chinese)
- [25] 郑乐, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 63–71.  
ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 63–71. (in Chinese)
- [26] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1–2): 227–242.
- [27] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 等. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 40–46.  
YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 40–46. (in Chinese)
- [28] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8–15.  
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8–15. (in Chinese)
- [29] 丁素明, 薛新宇, 方金豹, 等. 手持式风送授粉机工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 68–75.  
DING Suming, XUE Xinyu, FANG Jinbao, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted pollination device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 68–75. (in Chinese)
- [30] 孙亚朋, 董向前, 宋建农, 等. 振动深松试验台作业参数减阻减振优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 43–49.  
SUN Yapeng, DONG Xiangqian, SONG Jiannong, et al. Parameter optimization of vibration subsoiler test bed for reducing resistance and vibration [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 43–49. (in Chinese)
- [31] 邹亮亮, 刘雪美, 李金光, 等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 72–79.  
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72–79. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191008&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191008&journal_id=jcsam). DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 10. 008. (in Chinese)

(上接第 84 页)

- [15] Ferrari futura automated transplanter [EB/OL]. [2018–06–30]. <https://ferrariostruzioni.com/en/tray-planters/8-futura-automated-transplanter.html>.
- [16] 崔巍, 赵亮, 宋建农, 等. 吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 35–38, 34.  
CUI Wei, ZHAO Liang, SONG Jiannong, et al. Kinematic analysis and experiment of dibble-type planting devices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 35–38, 34. (in Chinese)
- [17] YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(4): 493–498.
- [18] 金鑫, 姬江涛, 刘卫想, 等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 58–67.  
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement [J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(9): 58–67. (in Chinese)
- [19] 中国机械工业联合会. JB/T 10291—2013 旱地栽植机械[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [20] 王英. 面向高立苗率要求的栽植机构参数优化与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.  
WANG Ying. Parameter optimization and experimental study on high seedling erectness rate oriented planting mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)