

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.010

# 蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析\*

陈建能 王伯鸿 任根勇 黄前泽

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**【摘要】** 推导了蔬菜移栽机放苗七杆机构的位移、速度和加速度方程,用 Visual Basic 6.0 语言编写了放苗机构的辅助分析和仿真程序。利用该程序分析了主要参数对该机构运动特性的影响。双曲柄机构中曲柄  $OA$  的长度对插植嘴的轨迹高度影响很大,而对轨迹的形状影响不大;曲柄  $CD$  的长度对插植嘴的轨迹高度和穴口的大小影响很大;两主动曲柄的相位差对插植嘴的轨迹高度和轨迹形状影响都很大。根据参数影响分析结果,利用该程序求得一组较优机构参数,其对应的轨迹和姿态能满足蔬菜移栽的农艺要求。

**关键词:** 蔬菜移栽机 放苗机构 运动学 参数分析

中图分类号: S223.94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)12-0048-06

## Kinematics Modeling and Parameters Analysis of Seven-linkage Vegetable Seedling Transplanting Mechanism

Chen Jianneng Wang Bohong Ren Genyong Huang Qianze

(College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

### Abstract

The equations of displacement, velocity and acceleration of seven-linkage vegetable seedling transplanting mechanism were deduced. An aided analytical and simulation program was compiled by Visual Basic 6.0. The influences over the kinematics characteristics of the mechanism by some important parameters were analyzed by this program. The length of one of the two driving cranks had significant influence over the trajectory height of the transplanting tip, while it had little influence over the trajectory shape. The length of the other crank had significant influence over the trajectory height of the transplanting tip and hole size. The phase difference of two cranks had significant influence over the trajectory height of transplanting tip and trajectory shape. According to the influences of these parameters, the results were analyzed. A group of preferable mechanical parameters were obtained by this program, whose corresponding trajectory and posture could meet the demands of vegetable transplanting.

**Key words** Vegetable transplanter, Seedling transplanting mechanism, Kinematics, Parameter analysis

### 引言

目前,我国使用的移栽机主要是20世纪80年代研制的半自动蔬菜移栽机,农机工作者也作了一些研究<sup>[1~5]</sup>,但均因育苗技术落后、配套性能差及机器本身性能不稳定、操作强度大和生产率低等原因未得到推广<sup>[6]</sup>。20世纪80年代日本开始致力于新

型移栽机构的研究,并关公司的乘坐式2行半自动蔬菜移栽机就是其中的代表,它采用人工喂苗、机器放苗的方式,性能稳定。其放苗采用七杆机构,机构的末端有一插植嘴。我国的江苏、浙江等地引进该机器进行示范,但因蔬菜种类繁多,农艺要求各异,其适应范围有限。为满足不同类型蔬菜的移栽农艺要求,本文对该机构进行运动学建模,分析并优化各

收稿日期: 2010-01-04 修回日期: 2010-01-20

\* 浙江省农业工程重大科技专项(2006C12039)和浙江省研究生创新科研项目

作者简介: 陈建能,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

杆杆长以及初始相位差等参数,使其不仅可以满足蔬菜移栽农艺的要求,还使机构具有满意的运动学特性。

### 1 蔬菜移栽放苗七杆机构

图 1 为蔬菜移栽放苗七杆机构的简图及其初始位置。由双曲柄五杆机构  $OABDC$  和双摇杆机构  $DEFG$  串联而成。曲柄  $OA$  和曲柄  $CD$  为两个同向、同转速的匀速转动输入构件,连杆  $BD$  为输出构件,  $DE$  和连杆  $BD$  固结,带动双摇杆机构运动,插植嘴固结在连杆  $EF$  上。当插植嘴转到最上方时(即图 1 位置时),环形回转输送带上的供苗杯下面的活门打开,蔬菜钵苗依靠自重下落到插植嘴内,而后活门关闭,人工将钵苗喂入供苗杯;机构再转过  $180^\circ$  左右插植嘴转到最下面时,插植嘴插入菜畦并张开,钵苗被引入到开出的苗穴内,然后进行覆土填压,完成栽植过程。该移栽机构能适合高度  $40 \sim 170 \text{ mm}$  菜苗的移栽,它将开穴与移栽合二为一,不易伤苗。

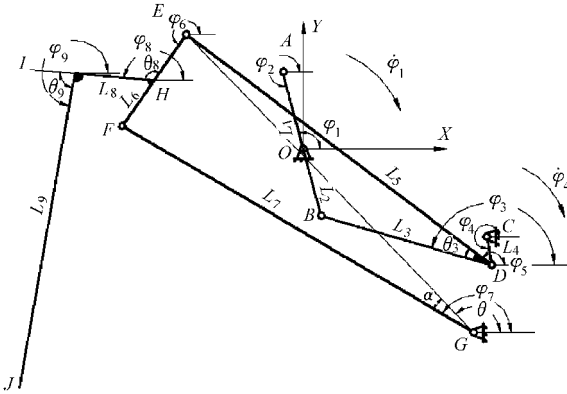


图 1 蔬菜移栽放苗七杆机构简图及其初始位置  
Fig.1 Sketch of seven-bar linkage vegetable seedling transplanting mechanism and its initial position

### 2 运动学模型的建立

建立以  $O$  点为原点、水平方向为  $X$  轴、垂直方向为  $Y$  轴的坐标系(图 1)。为方便分析,把相关的参数及其说明列于表 1。

#### 2.1 位移方程

A 点位移方程

$$\begin{cases} X_A = L_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) \\ Y_A = L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

D 点位移方程

$$\begin{cases} X_D = X_C + L_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) \\ Y_D = Y_C + L_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

由矢量方程  $l_{OA} + l_{AB} = l_{OC} + l_{CD} + l_{DB}$  得 B 点的位移方程

表 1 相关参数

Tab.1 Related parameters

符号	含义	符号	含义
$L_1$	曲柄 $OA$ 的长度	$\varphi_1$	曲柄 $OA$ 的初始相位角
$L_2$	连杆 $AB$ 的长度	$\varphi_2$	连杆 $AB$ 的角位移
$L_3$	连杆 $BD$ 的长度	$\varphi_3$	连杆 $BD$ 的角位移
$L_4$	曲柄 $CD$ 的长度	$\varphi_4$	曲柄 $CD$ 的初始相位角
$L_5$	杆 $DE$ 的长度	$\varphi_5$	杆 $DE$ 的角位移
$L_6$	连杆 $EF$ 的长度	$\varphi_6$	连杆 $EF$ 的角位移
$L_7$	摇杆 $FG$ 的长度	$\varphi_7$	摇杆 $FG$ 的角位移
$L_8$	杆 $HI$ 的长度	$\varphi_8$	杆 $HI$ 的角位移
$L_9$	杆 $IJ$ 的长度	$\varphi_9$	杆 $IJ$ 的角位移
$\dot{\varphi}_1$	曲柄 $OA$ 的角速度(为匀速顺时针)	$\theta$	$GE$ 连线与 $X$ 轴正方向的夹角
$\dot{\varphi}_2$	连杆 $AB$ 的角速度	$\theta_3$	连杆 $BD$ 和连杆 $DE$ 的夹角
$\dot{\varphi}_3$	连杆 $BD$ 的角速度	$\theta_8$	连杆 $EF$ 和杆 $HI$ 的夹角
$\dot{\varphi}_4$	曲柄 $CD$ 的角速度(为匀速顺时针),等于 $\dot{\varphi}_1$	$\theta_9$	杆 $IJ$ 与杆 $HI$ 所夹的锐角
$\dot{\varphi}_6$	连杆 $EF$ 的角速度	$\ddot{\varphi}_2$	连杆 $AB$ 的角加速度
$\dot{\varphi}_7$	摇杆 $FG$ 的角速度	$\ddot{\varphi}_3$	连杆 $BD$ 的角加速度
$\theta_{41}$	曲柄 $OA$ 和 $CD$ 相位角差	$\ddot{\varphi}_6$	连杆 $EF$ 的角加速度
$S$	株距	$\ddot{\varphi}_7$	摇杆 $FG$ 的角加速度
$\varphi$	曲柄 $OA$ 和 $CD$ 转过的角度	$N$	移栽频率

$$\begin{cases} X_B = L_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \cos\varphi_2 = \\ X_C + L_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) + L_3 \cos\varphi_3 \\ Y_B = L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \sin\varphi_2 = \\ Y_C + L_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) + L_3 \sin\varphi_3 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)移项后平方相加,消去  $\varphi_2$ 。并令

$$\begin{aligned} a &= X_C + L_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) - L_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) \\ b &= Y_C + L_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) - L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) \\ c &= \frac{a^2 + b^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_3} \end{aligned}$$

则有  $a \cos\varphi_3 + b \sin\varphi_3 + c = 0$ , 得

$$\tan \frac{\varphi_3}{2} = \frac{b - \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c} \quad (4)$$

由式(4)可解得  $\varphi_3$ 。

令  $\varphi_5 = \varphi_3 - \theta_3$ , 则 E 点位移方程

$$\begin{cases} X_E = X_D + L_5 \cos\varphi_5 \\ Y_E = Y_D + L_5 \sin\varphi_5 \end{cases} \quad (5)$$

令  $\tan\theta = \frac{Y_E - Y_G}{X_E - X_G}$ ,  $\angle EGF = \alpha$ , 则在  $\triangle EFG$  中根据余弦定理有

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \cos(\varphi_7 - \theta) = \\ &= \frac{(X_G - X_E)^2 + (Y_G - Y_E)^2 + L_7^2 - L_6^2}{2L_7 \sqrt{(X_G - X_E)^2 + (Y_G - Y_E)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可解得  $\varphi_7 = \alpha + \theta_0$ 。

$F$  点位移方程

$$\begin{cases} X_F = X_E + L_6 \cos \varphi_6 = X_G + L_7 \cos \varphi_7 \\ Y_F = Y_E + L_6 \sin \varphi_6 = Y_G + L_7 \sin \varphi_7 \end{cases} \quad (7)$$

令  $\tan \varphi_6 = \frac{Y_F - Y_E}{X_F - X_E}$ ,  $\varphi_8 = \varphi_6 - \pi + \theta_8$ ,  $\varphi_9 = \varphi_8 + \theta_9$ , 则

$J$  点位移方程 ( $H$  为  $EF$  的中点)

$$\begin{cases} X_J = X_H + L_8 \cos \varphi_8 + L_9 \cos \varphi_9 \\ Y_J = Y_H + L_8 \sin \varphi_8 + L_9 \sin \varphi_9 \end{cases} \quad (8)$$

## 2.2 速度方程

由式(3)求得  $B$  点速度方程

$$\begin{cases} \dot{X}_B = -L_4 \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) - L_3 \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_3 = \\ -L_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 \\ \dot{Y}_B = L_4 \dot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) + L_3 \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_3 = \\ L_1 \dot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 \end{cases} \quad (9)$$

化简式(9), 可求出连杆  $AB$  角速度

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{L_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_4 \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) - L_1 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 + \varphi) \tan \varphi_3 + L_4 \dot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) \tan \varphi_3}{L_2 \cos \varphi_2 \tan \varphi_3 - L_2 \sin \varphi_2} \quad (10)$$

代入式(9)中, 得连杆  $BD$  角速度

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{L_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 - L_4 \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 + \varphi)}{L_3 \sin \varphi_3} \quad (11)$$

由式(5)求得  $E$  点速度方程

$$\begin{cases} \dot{X}_E = -L_4 \dot{\varphi}_4 \sin \varphi_4 - L_5 \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_5 \\ \dot{Y}_E = L_4 \dot{\varphi}_4 \cos \varphi_4 + L_5 \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_5 \end{cases} \quad (12)$$

由式(7)求得  $F$  点速度方程

$$\begin{cases} \dot{X}_F = \dot{X}_E - L_6 \dot{\varphi}_6 \sin \varphi_6 = -L_7 \dot{\varphi}_7 \sin \varphi_7 \\ \dot{Y}_F = \dot{Y}_E + L_6 \dot{\varphi}_6 \cos \varphi_6 = L_7 \dot{\varphi}_7 \cos \varphi_7 \end{cases} \quad (13)$$

化简式(13)得连杆  $EF$  和摇杆  $FG$  的角速度

$$\dot{\varphi}_6 = \frac{\dot{X}_E \cos \varphi_7 + \dot{Y}_E \sin \varphi_7}{L_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_7)} \quad (14)$$

$$\dot{\varphi}_7 = \frac{\dot{X}_E \cos \varphi_6 + \dot{Y}_E \sin \varphi_6}{L_7 \sin(\varphi_6 - \varphi_7)} \quad (15)$$

由式(8)求得  $J$  点速度方程

$$\begin{cases} \dot{X}_J = \dot{X}_H - L_8 \dot{\varphi}_6 \sin \varphi_8 - L_9 \dot{\varphi}_6 \sin \varphi_9 \\ \dot{Y}_J = \dot{Y}_H + L_8 \dot{\varphi}_6 \cos \varphi_8 + L_9 \dot{\varphi}_6 \cos \varphi_9 \end{cases} \quad (16)$$

其中  $\dot{X}_H = \frac{\dot{X}_E + \dot{X}_F}{2}$   $\dot{Y}_H = \frac{\dot{Y}_E + \dot{Y}_F}{2}$

## 2.3 加速度方程

由式(9)求得  $B$  点加速度方程

$$\begin{cases} \ddot{X}_B = -L_4 \ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 + \varphi) - L_3 \ddot{\varphi}_3 \sin \varphi_3 - L_3 \dot{\varphi}_3^2 \cos \varphi_3 = \\ -L_1 \dot{\varphi}_1^2 \cos(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 - L_2 \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 \\ \ddot{Y}_B = -L_4 \ddot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 + \varphi) + L_3 \ddot{\varphi}_3 \cos \varphi_3 - L_3 \dot{\varphi}_3^2 \sin \varphi_3 = \\ -L_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \ddot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 - L_2 \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{令} \quad d &= -L_4 \dot{\varphi}_4^2 \cos(\varphi_4 + \varphi) - L_3 \dot{\varphi}_3^2 \cos \varphi_3 \\ e &= -L_1 \dot{\varphi}_1^2 \cos(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 \\ f &= -L_4 \dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 + \varphi) - L_3 \dot{\varphi}_3^2 \sin \varphi_3 \\ g &= -L_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 \end{aligned}$$

化简式(17), 可求出连杆  $AB$  和连杆  $BD$  的角加速度

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{e - d + (g - f) \tan \varphi_3}{L_2 \sin \varphi_2 - L_2 \cos \varphi_2 \tan \varphi_3} \quad (18)$$

$$\ddot{\varphi}_3 = \frac{e - d + (g - f) \tan \varphi_2}{L_3 \cos \varphi_3 \tan \varphi_2 - L_3 \sin \varphi_3} \quad (19)$$

由式(12)求得  $E$  点加速度方程

$$\begin{cases} \ddot{X}_E = -L_4 \ddot{\varphi}_4 \cos \varphi_4 - L_5 \ddot{\varphi}_3 \sin \varphi_5 - L_5 \dot{\varphi}_3^2 \cos \varphi_5 \\ \ddot{Y}_E = -L_4 \ddot{\varphi}_4 \sin \varphi_4 + L_5 \ddot{\varphi}_3 \cos \varphi_5 - L_5 \dot{\varphi}_3^2 \sin \varphi_5 \end{cases} \quad (20)$$

由式(13)求得

$$\begin{cases} \ddot{X}_E - L_6 \ddot{\varphi}_6 \sin \varphi_6 - L_6 \dot{\varphi}_6^2 \cos \varphi_6 = \\ -L_7 \ddot{\varphi}_7 \sin \varphi_7 - L_7 \dot{\varphi}_7^2 \cos \varphi_7 \\ \ddot{Y}_E + L_6 \ddot{\varphi}_6 \cos \varphi_6 - L_6 \dot{\varphi}_6^2 \sin \varphi_6 = \\ L_7 \ddot{\varphi}_7 \cos \varphi_7 - L_7 \dot{\varphi}_7^2 \sin \varphi_7 \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)得连杆  $EF$  和摇杆  $FG$  的角加速度

$$\ddot{\varphi}_6 = \frac{\ddot{X}_E \cos \varphi_7 + \ddot{Y}_E \sin \varphi_7 - L_6 \dot{\varphi}_6^2 \cos(\varphi_6 - \varphi_7) + L_7 \dot{\varphi}_7^2}{L_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_7)} \quad (22)$$

$$\ddot{\varphi}_7 = \frac{\ddot{X}_E \cos \varphi_6 + \ddot{Y}_E \sin \varphi_6 - L_6 \dot{\varphi}_6^2 \cos(\varphi_6 - \varphi_7) + L_7 \dot{\varphi}_7^2 \cos(\varphi_6 - \varphi_7)}{L_7 \sin(\varphi_6 - \varphi_7)} \quad (23)$$

$F$  点加速度方程

$$\begin{cases} \ddot{X}_F = -L_7 \ddot{\varphi}_7 \sin \varphi_7 - L_7 \dot{\varphi}_7^2 \cos \varphi_7 \\ \ddot{Y}_F = L_7 \ddot{\varphi}_7 \cos \varphi_7 - L_7 \dot{\varphi}_7^2 \sin \varphi_7 \end{cases} \quad (24)$$

$J$  点加速度方程

$$\begin{cases} \ddot{X}_J = \ddot{X}_H - L_8 \ddot{\varphi}_6 \sin \varphi_8 - L_8 \dot{\varphi}_6^2 \cos \varphi_8 - \\ L_9 \ddot{\varphi}_6 \sin \varphi_9 - L_9 \dot{\varphi}_6^2 \cos \varphi_9 \\ \ddot{Y}_J = \ddot{Y}_H + L_8 \ddot{\varphi}_6 \cos \varphi_8 - L_8 \dot{\varphi}_6^2 \sin \varphi_8 + \\ L_9 \ddot{\varphi}_6 \cos \varphi_9 - L_9 \dot{\varphi}_6^2 \sin \varphi_9 \end{cases} \quad (25)$$

其中  $\ddot{X}_H = \frac{\ddot{X}_E + \ddot{X}_F}{2}$   $\ddot{Y}_H = \frac{\ddot{Y}_E + \ddot{Y}_F}{2}$

### 3 辅助分析程序

根据所建立的数学模型,基于 Visual Basic 6.0 编写了可视化的蔬菜移栽放苗七杆机构辅助分析及仿真程序,如图 2 所示。通过人机对话,可以改变各参数,包括各杆杆长和初始角位移、支点 C 和 G 的坐标、移栽频率和株距等,从而求得一组机构参数为满意的插植嘴轨迹和姿态。

### 4 主要参数对运动学特性的影响分析

根据所建立的数学模型和辅助分析程序,限于篇幅,只分析众多参数中几个主要参数对机构运动特性的影响。

#### 4.1 曲柄 OA 长度 $L_1$

曲柄 OA 长度  $L_1$  和移栽轨迹关系如图 3 所示。当  $L_2 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 18 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 240 \text{ mm}$ 、 $L_6 = 70 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 250 \text{ mm}$ 、 $L_8 = 55 \text{ mm}$ 、 $L_9 = 200 \text{ mm}$ 、 $X_C = 115 \text{ mm}$ 、 $Y_C = 55 \text{ mm}$ 、 $X_G = 107 \text{ mm}$ 、 $Y_G = 115 \text{ mm}$ 、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400 \text{ mm}$ 、 $N = 65 \text{ 株/min}$  时,随着曲

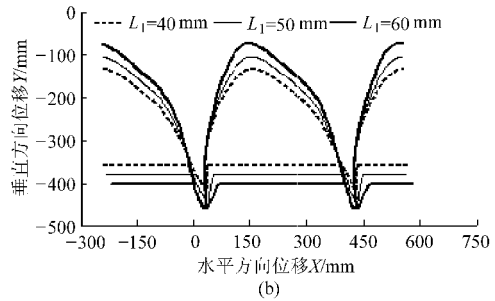
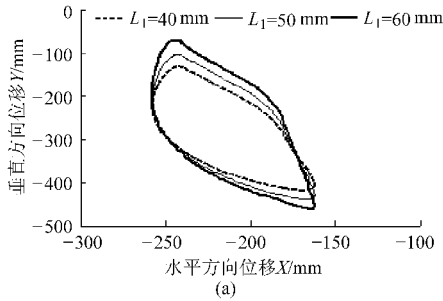


图 3  $L_1$  与移栽轨迹的关系

Fig. 3 Relations between  $L_1$  and transplanting curve

(a) 静轨迹 (b) 动轨迹

#### 4.2 相位差 $\theta_{41}$

相位角  $\theta_{41}$  和移栽轨迹的关系如图 4 所示。当  $L_1 = 50 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 18 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 240 \text{ mm}$ 、 $L_6 = 70 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 250 \text{ mm}$ 、 $L_8 = 55 \text{ mm}$ 、 $L_9 = 200 \text{ mm}$ 、 $X_C = 115 \text{ mm}$ 、 $Y_C = 55 \text{ mm}$ 、 $X_G =$

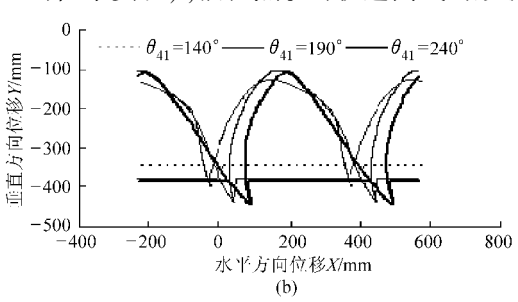
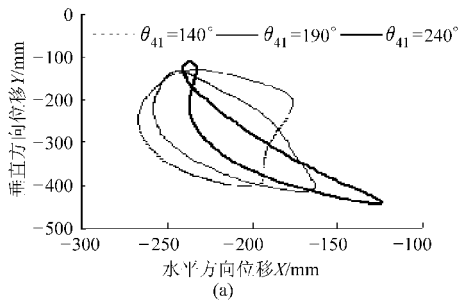


图 4  $\theta_{41}$  与移栽轨迹的关系

Fig. 4 Relations between  $\theta_{41}$  and transplanting curve

(a) 静轨迹 (b) 动轨迹

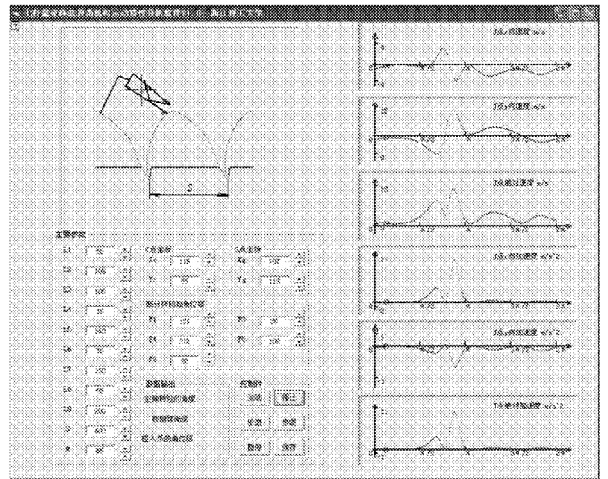


图 2 蔬菜移栽放苗七杆机构辅助分析程序界面

Fig. 2 Interface of aided analytical program of seven-bar linkage vegetable seedling transplanting mechanism

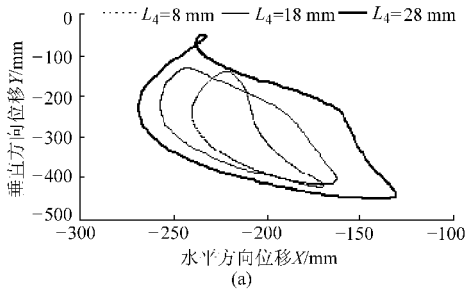
柄 OA 长度  $L_1$  增大,插植点 J 的轨迹曲线轮廓(特别是高度方向)逐渐增大,但其形状在中间基本不变(均通过相同的 2 个点),挖出的穴口大小(在动轨迹中表示菜畦垄面水平线与动轨迹相交两点之间的距离)基本不变。 $L_1$  的选取主要取决于供苗盘的高度。

$107 \text{ mm}$ 、 $Y_G = 115 \text{ mm}$ 、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400 \text{ mm}$ 、 $N = 65 \text{ 株/min}$  时,随着相位差  $\theta_{41}$  的增大(通过保证曲柄 OA 的初始相位角  $\varphi_1$  的值不变,而增大曲柄 CD 的初始相位角  $\varphi_4$  的值来实现),插植点 J 的轨迹曲线的形状和大小发

生了很大的变化,可以产生腰果形、8字形、海豚形、面包形、月牙形等多种类型的移栽轨迹。 $\theta_{41}$ 是改变插植点  $J$  轨迹的重要参数,其选取主要取决于供苗盘的高度、插植嘴的轨迹和姿态。

#### 4.3 曲柄 $CD$ 长度 $L_4$

曲柄  $CD$  长度  $L_4$  和移栽轨迹的关系如图 5 所示。当  $L_1 = 50$  mm、 $L_2 = 105$  mm、 $L_3 = 105$  mm、 $L_5 =$



240 mm、 $L_6 = 70$  mm、 $L_7 = 250$  mm、 $L_8 = 55$  mm、 $L_9 = 200$  mm、 $X_C = 115$  mm、 $Y_C = 55$  mm、 $X'_C = 107$  mm、 $Y'_C = 115$  mm、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400$  mm、 $N = 65$  株/min 时,随着曲柄  $CD$  长度  $L_4$  的增大,插植点  $J$  的轨迹曲线变高变宽,挖出的穴口变小。 $L_4$  的选取主要取决于供苗盘的高度和穴口的大小。

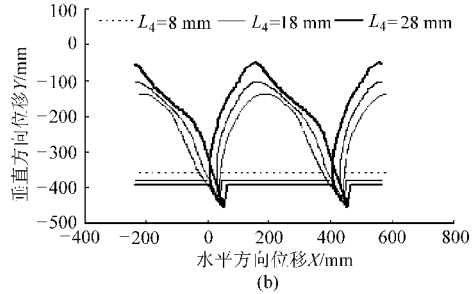


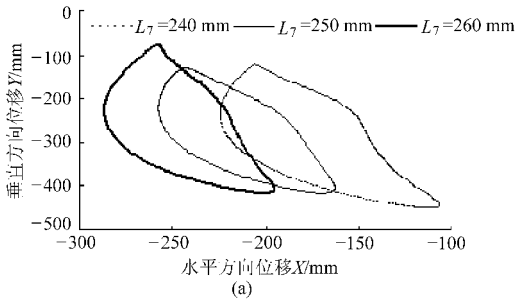
图 5  $L_4$  与移栽轨迹的关系

Fig. 5 Relations between  $L_4$  and transplanting curve

(a) 静轨迹 (b) 动轨迹

#### 4.4 摇杆 $FG$ 长度 $L_7$

摇杆  $FG$  长度  $L_7$  和移栽轨迹的关系如图 6 所示。当  $L_1 = 50$  mm、 $L_2 = 105$  mm、 $L_3 = 105$  mm、 $L_4 = 18$  mm、 $L_5 = 240$  mm、 $L_6 = 70$  mm、 $L_8 = 55$  mm、 $L_9 = 200$  mm、 $X_C = 115$  mm、 $Y_C = 55$  mm、 $X'_C = 107$  mm、



$Y'_C = 115$  mm、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400$  mm、 $N = 65$  株/min 时,随着摇杆  $FG$  长度  $L_7$  的增大,插植点  $J$  的轨迹形状基本不变,但产生偏转,挖出的穴口大小基本不变。 $L_7$  的选取主要取决于插植嘴的姿态。

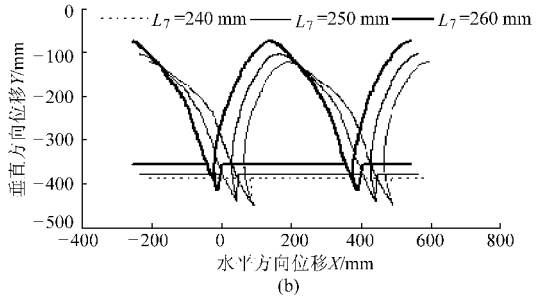


图 6  $L_7$  与移栽轨迹的关系

Fig. 6 Relations between  $L_7$  and transplanting curve

(a) 静轨迹 (b) 动轨迹

## 5 实例与结果分析

为了使放苗机构具有优良的作业效果,必须以钵苗移栽后的直立性(主要取决于穴口右边的边界线与垄面的垂直性,即栽植嘴的姿态)、插植嘴的轨迹高度(主要取决于供苗盘的高度,一般在 800 mm 左右)和机构作业的稳定性的(主要取决于插植嘴的速度和加速度)为目标进行优化机构参数。但从参数对运动特性影响分析可知,插植嘴的轨迹和姿态受到众多参数的影响,且其影响具有交互性和非线性,因此要得到最佳的机构参数,必须结合这 3 个目标和数学模型以及机构本身的约束条件建立优化模型进行参数优化,限于篇幅,本文不予讨论。

根据参数对运动特性影响分析和所编写的辅助分析和仿真软件,通过人机对话和农艺要求的判断,优化得到一组较优参数为: $L_1 = 50$  mm、 $L_2 = 105$  mm、 $L_3 = 105$  mm、 $L_4 = 18$  mm、 $L_5 = 240$  mm、 $L_6 = 70$  mm、 $L_7 = 250$  mm、 $L_8 = 55$  mm、 $L_9 = 200$  mm、 $X_C = 115$  mm、 $Y_C = 55$  mm、 $X'_C = 107$  mm、 $Y'_C = 115$  mm、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400$  mm、 $N = 65$  株/min。其运动轨迹如图 7 所示,静轨迹高度为 334.9 mm,穴口大小为 46.7 mm。动轨迹中其穴口右边的边界线与垄面几乎垂直,保证了钵苗移栽后的立苗率。一个周期中,插植点  $J$  的速度和加速度如图 8 所示, I 到 II 之间,对应主动曲柄转角为  $0^\circ$  到  $62^\circ$  左右,速度较小,便于接住钵

苗; II到III为 $62^\circ$ 到 $127^\circ$ , 插植嘴加速下降, 提高移栽效率; III到IV为 $127^\circ$ 到 $143^\circ$ , 插植嘴减速下降; IV到V为 $143^\circ$ 到 $163^\circ$ , 插植嘴加速下降, 此时速度达到最大, 插植嘴达到整个运动循环的最低点; V到VI

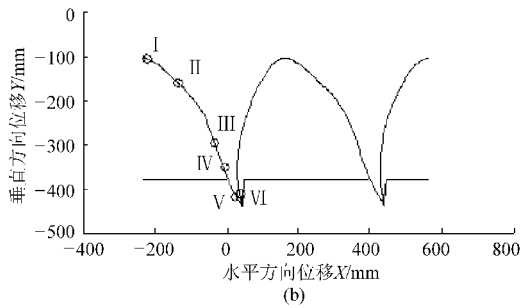
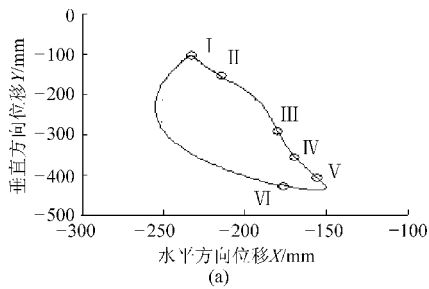


图7 插植点J运动轨迹

Fig. 7 Sketch of motion curve of point J

(a) 静轨迹 (b) 动轨迹

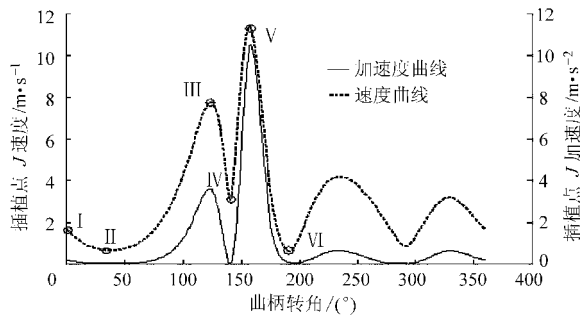


图8 一个周期中插植点J速度和加速度曲线

Fig. 8 Sketch of velocity and acceleration curve of point J in one cycle

## 6 结论

(1) 建立了分析模型并根据该模型编写了辅助分析及仿真软件, 它能实时模拟、分析机构的运动状

态, 为 $163^\circ$ 到 $194^\circ$ 左右, 插植嘴上升, 此时速度快速减小, 这样使蔬菜钵苗容易离开插植嘴, 因为速度由快到慢, 在惯性作用下钵苗被甩出; 接下来插植嘴上升, 完成一个循环。可见该机构参数满足移栽要求。

态, 采用人机对话方式可以分析机构参数变化对机构性能的影响, 可以起到参数优选的作用。

(2) 主动曲柄  $OA$  的长度对插植嘴的轨迹高度影响很大, 而对轨迹的形状影响不大; 主动曲柄  $CD$  的长度对插植嘴的轨迹高度和穴口的大小影响很大; 两主动曲柄的相位差对插植嘴的轨迹高度和轨迹形状影响都很大; 摇杆  $FG$  长度对插植嘴的轨迹高度和轨迹形状影响都不大, 但影响轨迹的角度(姿态)。

(3) 所给出的最终机构参数为:  $L_1 = 50 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 105 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 18 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 240 \text{ mm}$ 、 $L_6 = 70 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 250 \text{ mm}$ 、 $L_8 = 55 \text{ mm}$ 、 $L_9 = 200 \text{ mm}$ 、 $X_C = 115 \text{ mm}$ 、 $Y_C = 55 \text{ mm}$ 、 $X_C = 107 \text{ mm}$ 、 $Y_C = 115 \text{ mm}$ 、 $\varphi_1 = 121^\circ$ 、 $\theta_3 = 28^\circ$ 、 $\varphi_4 = 311^\circ$ 、 $\theta_8 = 105^\circ$ 、 $\theta_9 = 80^\circ$ 、 $S = 400 \text{ mm}$ 、 $N = 65 \text{ 株/min}$ , 能够满足蔬菜农艺要求。

## 参 考 文 献

- 王文明, 窦卫国, 王春光, 等. 2ZT-2型甜菜移栽机栽植系统的参数分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 69~73.  
Wang Wenming, Dou Weiguo, Wang Chunguang, et al. Parameter analysis of the planting process of 2ZT-2 beet transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 69~73. (in Chinese)
- 金诚谦, 吴崇友, 袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 196~198.
- 李其响, 阚建文, 孔卓. 滑道分钵轮式栽植器工作稳定性的仿真分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 39~41, 49.  
Li Qiyun, Zha Jianwen, Kong Zhou. Simulation analysis of working stability on a slide-way parting-bowl-wheel transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 39~41, 49. (in Chinese)
- 孙裕晶, 马成林, 周德义. 组合振动导苗筒式移栽机研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 141~142.
- 周德义, 孙裕晶, 马成林. 组合振动导苗筒式移栽机栽植株距随机误差分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 71~73.  
Zhou Deyi, Sun Yujing, Ma Chenglin. Analysis on random errors of seedling distance in row for trans-planter with combined guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 71~73. (in Chinese)
- 王君玲, 高玉芝, 李成华. 蔬菜移栽生产机械化现状与发展方向[J]. 农机化研究, 2004(2): 42~43.