

## 基于 Matlab 的油菜移栽机栽植机构运动学建模与分析

罗江河<sup>1,2</sup>, 孙松林<sup>1,2\*</sup>, 肖名涛<sup>1,2</sup>, 李军政<sup>1,2</sup>, 高翔宇<sup>1,2</sup>, 全伟<sup>1,2</sup>, 杨彪<sup>1,2</sup>, 张五金<sup>1,2</sup>, 寻真福<sup>1,2</sup>

(1.湖南农业大学工学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省现代农业机械装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 针对自制油菜移栽机栽植机构作业质量差的问题, 利用 Matlab 语言建立了栽植机构的运动模型, 分析机构参数对作业性能的影响。结果表明, 大、小曲柄的长度及 2 曲柄的夹角和摇杆的长度对机构的作业性能有重要影响。根据这些参数对作业轨迹曲线的影响趋势, 找到一组较优化的机构参数。当轨迹高度为 181 mm、株距为 240 mm 时, 入土轨迹与出土轨迹的重合度好, 出土轨迹基本保持竖直, 在投苗点附近时, 栽植器的最大速度为 0.048 m/s, 其姿态保持与水平面垂直, 加速度的波动范围小, 能满足油菜移栽的要求。

**关 键 词:** 油菜移栽机; 栽植机构; 模型; Matlab; 参数分析

中图分类号: S223.99; O245 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2013)06-0693-06

## Planting mechanism kinematics modeling and analysis of rapeseed transplanting machine based on Matlab

LUO Jiang-he<sup>1,2</sup>, SUN Song-lin<sup>1,2\*</sup>, XIAO Ming-tao<sup>1,2</sup>, LI Jun-zheng<sup>1,2</sup>, GAO Xiang-yu<sup>1,2</sup>,  
QUAN Wei<sup>1,2</sup>, YANG Biao<sup>1,2</sup>, ZHANG Wu-jiang<sup>1,2</sup>, XUN Zhen-fu<sup>1,2</sup>

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Modern Agricultural Machinery and Equipment of Hunan Engineering Research Center, Changsha 410128, China)

**Abstract:** This paper, aiming at the poor quality of planting mechanism in homemade rape transplanter, has used MATLAB language to device movement model for rape plantating mechanism, and analysed the impacts of mechanism parameters on its performance, among the parameters are the length of cranks and rockers as well as the angle between cranks that have great effects. According to the influence trend of parameters on locus curve, a set of optimal mechanism parameters have been found with the help of movement model. When the trajectory height is 181 mm and planting distance is 240 mm with unearthed trace basically upright, there is a great contact ratio between the penetration and unearthed trace. Around the dropping seedling point, the transplanter can reach the maximum speed of 0.048 meter per second, keeping perpendicular with horizontal plane, with small changes of acceleration, which are able to fully satisfy the requirements of the transplantation of rape.

**Key words:** rape transplanter; planting mechanism; model; Matlab; parametric analysis

油菜种植分直播与移栽 2 种。南方冬油菜多采取移栽方式种植, 可以解决与前茬作物的接茬矛盾, 管理比较精细, 有利于培育壮苗, 移栽后的油菜根系发达, 不易倒伏, 有利于充分发挥油菜的个体优势, 利于高产, 还可以有效避免苗期霜冻、干

旱等自然灾害<sup>[1-6]</sup>。

油菜移栽机的核心部件是栽植机构, 它直接决定了整个移栽机的工作性能<sup>[7]</sup>。对栽植机构性能的评价<sup>[8]</sup>主要考察立苗率和直立度、接苗与投苗的稳定性、是否不拖苗、不带苗。从栽植轨迹来看, 入

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD20B08)

作者简介: 罗江河(1988—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事农业机械设计与研究, feiyang130726@163.com; \*通信作者, hnnssl@163.com

土轨迹与出土轨迹的重合度好,即在株距一定的情况下,能够实现零速投苗,同时挖出洞穴口小,出土轨迹的垂直度要高,即保证移栽后幼苗的直立度;要提高栽植器接苗与投苗的稳定性,就必须保证栽植器在投苗与接苗时的基本姿态与水平面垂直;栽植机构的栽植轨迹与栽植器鸭嘴的开启时间要配合恰当,不出现拖苗的现象。基于这些要求,针对自制油菜移栽机栽植机构出现的立苗率不高及直立度不够,接苗及落苗的稳定性差,有时出现拖带苗的问题,笔者分析了栽植机构各杆件对栽植轨迹的影响,并对机构参数进行了优化。

## 1 油菜移栽机栽植机构的工作原理

如图1所示,栽植机构通过曲柄 $AB$ 和曲柄 $ED$ 共同驱动,在摆杆 $OG$ 、连杆 $BC$ 和摇杆 $DF$ 的约束下完成预定轨迹,使得移栽机能够实现零速投苗,同时在接苗与投苗时保持一定的姿态,在保证不拖苗、不带苗的情况下,提高幼苗的立苗率。当栽植器上升至最高点时,由喂苗器将幼苗投进栽植器的导苗筒中,栽植器在下降过程中,完成打孔,当到达最低点时,栽植器开启,幼苗在重力作用下落入孔内,当栽植器上升至完全脱离幼苗时关闭,完成1个栽植过程,再继续接受喂苗,开始下一个工作循环。

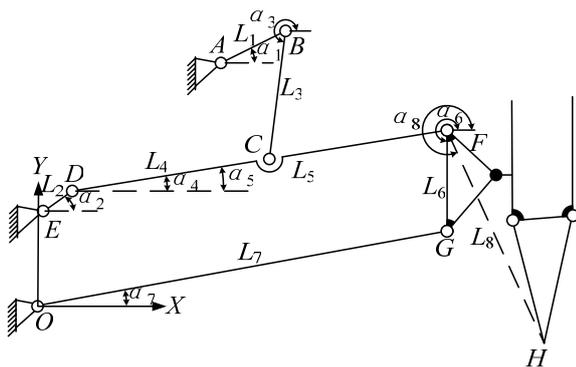


图1 栽植机构结构简图

Fig.1 Sketch of transplanting mechanism

## 2 油菜移栽机栽植机构的运动模型的建立

建立直角坐标系(图1)。为方便分析,杆件长度的单位均为mm,杆件的角位移为其与 $X$ 轴正方向

所形成的角( $^{\circ}$ );曲柄 $AB$ 的初始角度为 $0^{\circ}$ ,曲柄 $ED$ 初始相位角为 $\alpha_0$ ;曲柄 $AB$ 的长度为 $L_1$ ,角位移为 $\alpha_1$ ;曲柄 $ED$ 的长度为 $L_2$ ,角位移为 $\alpha_2$ ;连杆 $BC$ 的长度为 $L_3$ ,角位移为 $\alpha_3$ ;连杆 $DC$ 的长度为 $L_4$ ,角位移为 $\alpha_4$ ;摇杆 $DF$ 的长度为 $L_5$ ,角位移为 $\alpha_5$ ;连杆 $FG$ 的长度为 $L_6$ ,角位移为 $\alpha_6$ ;摆杆 $OG$ 的长度为 $L_7$ ,角位移为 $\alpha_7$ ;连杆 $FH$ 的长度为 $L_8$ ,角位移为 $\alpha_8$ 。

### 2.1 建立栽植机构的位移方程

$B$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_B = X_A + L_1 \times \cos \alpha_1 \\ Y_B = Y_A + L_1 \times \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (1)$$

$D$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_D = X_E + L_2 \times \cos \alpha_2 \\ Y_D = Y_E + L_2 \times \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

$C$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_C = X_B + L_3 \times \cos \alpha_3 = X_D + L_4 \times \cos \alpha_4 \\ Y_C = Y_B + L_3 \times \sin \alpha_3 = Y_D + L_4 \times \sin \alpha_4 \end{cases} \quad (3)$$

$F$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_F = X_D + L_5 \times \cos \alpha_5 \\ Y_F = Y_D + L_5 \times \sin \alpha_5 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\alpha_5 = \alpha_4$ 。

$G$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_G = X_F + L_6 \times \cos \alpha_6 = X_O + L_7 \times \cos \alpha_7 \\ Y_G = Y_F + L_6 \times \sin \alpha_6 = Y_O + L_7 \times \sin \alpha_7 \end{cases} \quad (5)$$

$H$ 点的位移方程:

$$\begin{cases} X_H = X_F + L_8 \times \cos \alpha_8 \\ Y_H = Y_F + L_8 \times \sin \alpha_8 \end{cases} \quad (6)$$

采用Matlab语言,根据栽植机构的运动模型,即可实现栽植机构栽植点的运动仿真,其中解(3)式时,根据 $\alpha_3 \approx 270^{\circ}$ 特性,利用fzero函数避免了在求解 $\alpha_3$ 时的正负问题,即可求出唯一解。同理,可解(5)式。再利用Matlab强大的数值分析能力,在求出 $H$ 点的位移坐标之后,对(1)~(6)式求一阶导数和二阶导数,得出栽植点的速度及加速度曲线。

### 3 栽植机构运动学特性的影响因素

栽植机构的性能主要体现在栽植轨迹及栽植器的姿态 2 个方面<sup>[8]</sup>，其中栽植动轨迹影响栽植质量，静轨迹影响接苗质量，栽植器的姿态影响移栽后幼苗的直立度。利用所建立的运动模型及 Matlab 的辅助分析得出： $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_7$  和  $\alpha_0$  对栽植器的轨迹及姿态的影响较大，其余参数的影响较小。对影响较大的几个参数进行分析。

#### 3.1 曲柄 AB 的长度 $L_1$

当  $X_O=0\text{ mm}$ 、 $Y_O=0\text{ mm}$ 、 $X_E=-6\text{ mm}$ 、 $Y_E=80\text{ mm}$ 、 $X_A=95.4\text{ mm}$ 、 $Y_A=208.5\text{ mm}$ 、 $L_2=20\text{ mm}$ 、 $L_3=100\text{ mm}$ 、 $L_4=150\text{ mm}$ 、 $L_5=260\text{ mm}$ 、 $L_6=80\text{ mm}$ 、 $L_7=259\text{ mm}$ 、

$L_8=282\text{ mm}$ 、 $\alpha_0=-10^\circ$  时，随着  $L_1$  的增加，静轨迹曲线的轮廓上下两端逐渐向外扩张，上端向左上端凸出，下端逐渐变尖，轨迹高度增加，但曲线的形状基本保持不变(图 2-a)。栽植器的入土轨迹与出土轨迹都有重合点，打出的孔穴大小基本保持不变。 $L_1$  缩短时，轨迹高度变矮，当轨迹高度过低，会出现栽植器拖带苗的现象，但  $L_1$  过长时，整个轨迹高度变高，同时整个栽植器上下摆动的幅度增加，震动性也会增加(图 2-b)。即  $L_1$  的选取在保证轨迹的高度不出现拖苗的情况下，尽量缩短。曲柄 AB 对栽植器的夹角(图 2-c)(栽植器与竖直平面的夹角，下同)影响不大，最大的夹角为  $18.2^\circ$ 。综上分析，曲柄 AB 的长度  $L_1$  对栽植轨迹的高度影响较大。

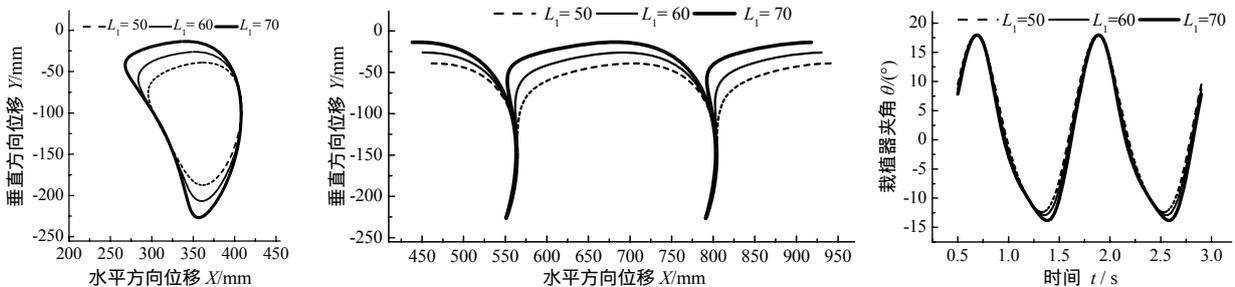


图 2  $L_1$  变化时栽植点的静轨迹、动轨迹及栽植器夹角

Fig.2 The static curve, dynamic curve of transplanting point and the transplanter angle with the changing of crank AB

#### 3.2 曲柄 ED 的长度 $L_2$

当  $X_O=0\text{ mm}$ 、 $Y_O=0\text{ mm}$ 、 $X_E=-6\text{ mm}$ 、 $Y_E=80\text{ mm}$ 、 $X_A=95.4\text{ mm}$ 、 $Y_A=208.5\text{ mm}$ 、 $L_1=60\text{ mm}$ 、 $L_3=100\text{ mm}$ 、 $L_4=150\text{ mm}$ 、 $L_5=260\text{ mm}$ 、 $L_6=80\text{ mm}$ 、 $L_7=259\text{ mm}$ 、 $L_8=282\text{ mm}$ 、 $\alpha_0=-10^\circ$  时，随着  $L_2$  的增加，静轨迹向左右 2 个方向扩宽，上端变矮变宽，下端由尖变圆(图 3-a)。入土轨迹与出土轨迹逐渐靠拢，然后又

分离；打出的孔穴由大变小，然后又变大；出土轨迹的倾角由大变小； $L_2$  对整个栽植轨迹高度的影响不大(图 3-b)。栽植器的夹角变化范围由小变大，而且变化明显(图 3-c)。综上分析，曲柄 ED 的长度  $L_2$  对零速投苗有影响，对打出的孔穴的宽度影响较大，对出土轨迹的垂直度也有影响，同时也影响了栽植器在栽植周期中的夹角变化范围。

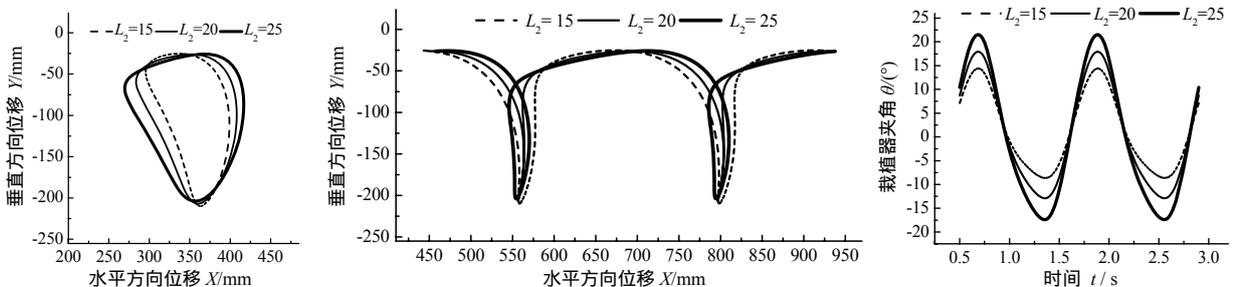


图 3  $L_2$  变化时栽植点的静轨迹、动轨迹及栽植器夹角

Fig.3 The static curve, dynamic curve of transplanting point and the transplanter angle with the changing of crank ED

### 3.3 摆杆 OG 的长度 $L_7$

当  $X_O=0$  mm、 $Y_O=0$  mm、 $X_E=-6$  mm、 $Y_E=80$  mm、 $X_A=95.4$  mm、 $Y_A=208.5$  mm、 $L_1=60$  mm、 $L_2=20$  mm、 $L_3=100$  mm、 $L_4=150$  mm、 $L_5=260$  mm、 $L_6=80$  mm、 $L_8=282$  mm、 $\alpha_0=-10^\circ$  时，随着  $L_7$  的增加，整个曲线逐渐向右上移，轨迹的上端宽度逐渐变窄，整个栽轨的高度变化不大(图 4-a)。栽植点的入土点向右移，栽插深度逐渐变浅；入土轨迹与出土轨迹逐渐靠拢直至重合，然后又分离，打出的孔穴大小由大

变小，然后又由小变大；出土后的轨迹由近似水平，逐渐变成左低右高，轨迹变化趋于柔和(图 4-b)。栽植器的夹角变化范围基本保持不变，但是整个曲线向上移动，说明栽植器的最大夹角的大小在发生变化，由大变小，然后又变大(图 4-c)。综上分析，摆杆 OG 的长度  $L_7$  影响着栽植器的零速投苗，对打出的孔穴大小影响较大，也影响着栽植器的栽插深度，同时也影响了栽植器在栽植周期内的最大倾角，即影响着栽植器在落苗与接苗时的基本形态。

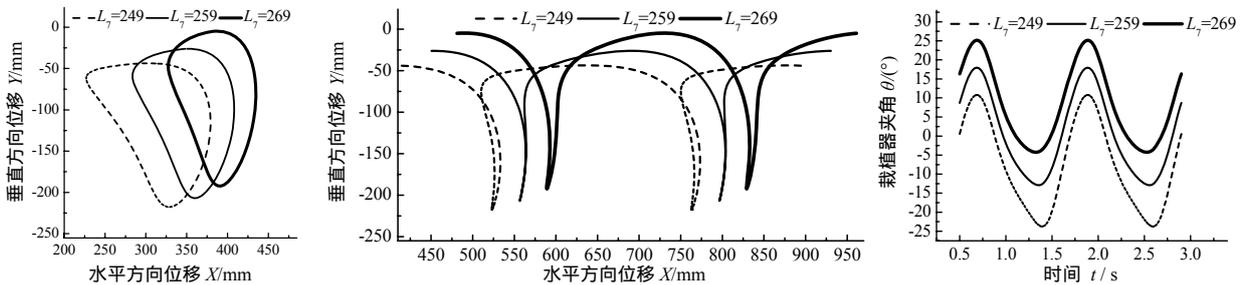


图 4  $L_7$  变化时栽植点的静轨迹、动轨迹及栽植器夹角

Fig.4 The static curve, dynamic curve of transplanting point and the transplanter angle with the changing of pendulum rod OG

### 3.4 曲柄 ED 的初始相位角 $\alpha_0$

当  $X_O=0$  mm、 $Y_O=0$  mm、 $X_E=-6$  mm、 $Y_E=80$  mm、 $X_A=95.4$  mm、 $Y_A=208.5$  mm、 $L_1=60$  mm、 $L_2=20$  mm、 $L_3=100$  mm、 $L_4=150$  mm、 $L_5=260$  mm、 $L_6=80$  mm、 $L_7=259$  mm、 $L_8=282$  mm 时，随着  $\alpha_0$  的逐渐缩小，曲线的左上端逐渐回缩，右上端逐渐凸起，下端逐渐向左移，整个轨迹逐渐变得细长，但是其高度基本保持不变(图 5-a)。出土轨迹与入土轨迹的重合长度在缩短，即打出的孔穴在最低点时基本保持不变，

在接近土壤表面时，其穴口有增大趋势；出土轨迹的倾角逐渐变小，即出土轨迹的垂直度逐渐变差；出土后的轨迹由近似水平逐渐变得左低又高，曲线的变化趋势越来越柔和(图 5-b)。整条曲线逐渐向左移动，栽植器的夹角变化范围有逐渐缩小的趋势，但是栽植器的最大夹角基本保持不变(图 5-c)。综上分析，曲柄 ED 的初始相位角  $\alpha_0$  影响着栽植轨迹的出土轨迹曲线的夹角，对穴口的形状有一定的影响，也对栽植器在落苗与接苗时的基本形态有一定的影响。

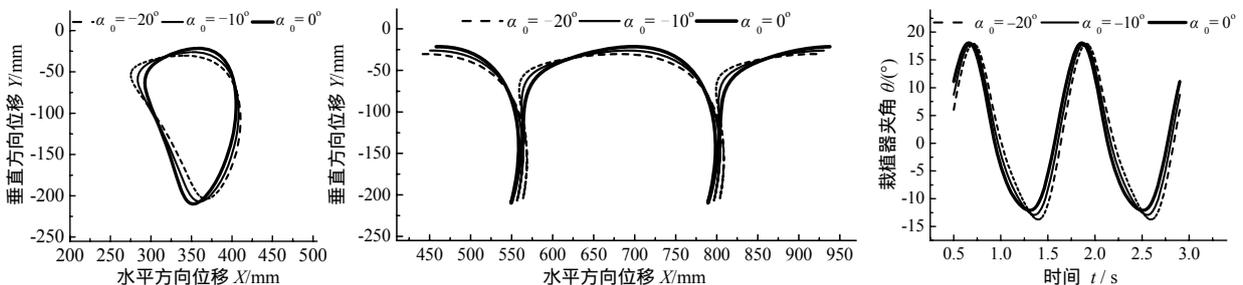


图 5  $\alpha_0$  变化时栽植点的静轨迹、动轨迹及栽植器夹角

Fig.5 The static curve, dynamic curve of transplanting point and the transplanter angle with the changing of crank ED's initial phase angle

## 4 参数优选实例与结果

为了使栽植机构具有良好的作业效果，对以栽

植点在落苗时的姿态(落苗时的栽植器的姿态直接决定了幼苗在落入土壤的初始状态，因而影响着幼苗在移栽后的直立度)、栽植点的轨迹高度(主要取

决于幼苗的高度和喂苗器的高度)、栽植点的出土轨迹与入土轨迹的重合度(影响挖出穴口的大小,穴口过大会影响幼苗的立苗率和直立度)和机构作业的稳定(取决于栽植器的速度和加速度)为目标<sup>[9-11]</sup>进行机构参数优化。通过以上几个参数对栽植器的轨迹和姿态的分析可知,影响栽植器轨迹和姿态的参数较多,且具有非线性和强耦合性,因此,必须结合这 4 个目标和上述运动模型以及栽植机构本身的约束条件(株距为 240 mm,栽插深度为 80 mm)进行参数优化。利用 Matlab 的数值分析能力通过对运动模型进行优化,得到一组优化参数为: $X_O=0$  mm、 $Y_O=0$  mm、 $X_E=-6$  mm、 $Y_E=80$  mm、 $X_A=95.4$  mm、

$Y_A=208.5$  mm、 $L_1=60$  mm、 $L_2=20$  mm、 $L_3=100$  mm、 $L_4=150$  mm、 $L_5=260$  mm、 $L_6=80$  mm、 $L_7=259$  mm、 $L_8=282$  mm、 $\alpha_0=-10^\circ$ 。

如图 6-a 所示,得出的静轨迹曲线形态上宽下窄,左上端与下端向外凸起,右上端圆滑过渡,整个曲线近似“豚”形,利于栽植器的接苗,图 6-b 显示,整个轨迹曲线的高度为 181 mm,株距为 240 mm,在栽插深度为 80 mm 的情况下,出土轨迹与入土轨迹基本保持重合状态,最大的间隙宽度为 1.35 mm,即实际作业时打出的孔穴大小基本上等于鸭嘴的大小,同时出土轨迹基本保持垂直状态,确保了幼苗移栽后的直立度。

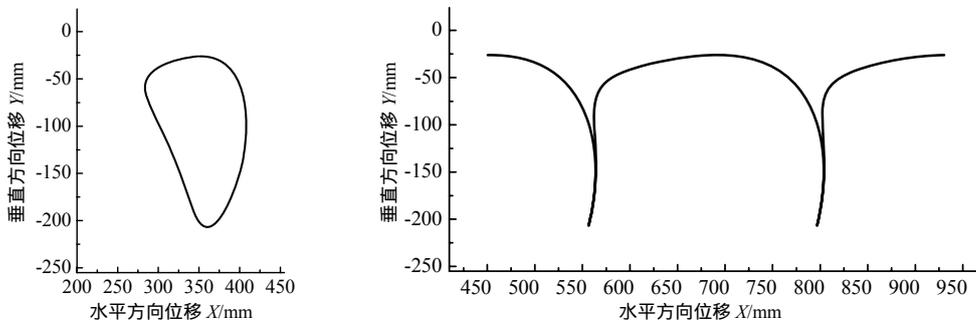


图 6 栽植点的轨迹曲线

Fig.6 Sketch of curve of planting point

如图 7 所示,当  $t=1$  s 及  $t=2.2$  s 时,栽植器在垂直方向的位移最小,即运行到最低点,从栽植作业的过程可知,当栽植器运动到最低点时,凸轮开始开启鸭嘴落苗,此时栽植器的姿态基本决定了幼苗下落到土壤的初始位置,通过曲线可知,此时栽植器的夹角约为  $0^\circ$ ,即保证了幼苗在下落到土壤里的初始直立度;当  $t=1.6$  s 时,栽植器接近最高点,其夹角为  $0^\circ$ ,方便了栽植器的接苗。如图 8 所示,当  $t=1$  s 时,其水平速度为 0.005 m/s,  $t=0.8\sim 1.2$  s 时,水平速度曲线的变化平缓,最大值为 0.12 m/s;当  $t=1\sim 1.2$  s 时,处于落苗期,此时水平速度的最大值为 0.048 m/s,基本保证了零速投苗。从垂直速度曲线变化情况可知,当  $t=0.5\sim 1$  s 时,栽植器加速下降,最大垂直速度为  $-0.71$  m/s;当  $t=1\sim 1.7$  s 时,栽植器加速上升,最大垂直速度达到 0.42 m/s,提高

了移栽的效率。从加速度曲线(图 8)变化情况可知,曲线有 3 个极大值,3 个极小值,当  $t=0.91$  s 时,加速度达到最大值为  $4.6$  m/s<sup>2</sup>;当  $t=1.22$  s 时,加速度最小,为  $0.51$  m/s<sup>2</sup>,可见其加速度的波动范围并不大,可以满足油菜幼苗移栽的要求。

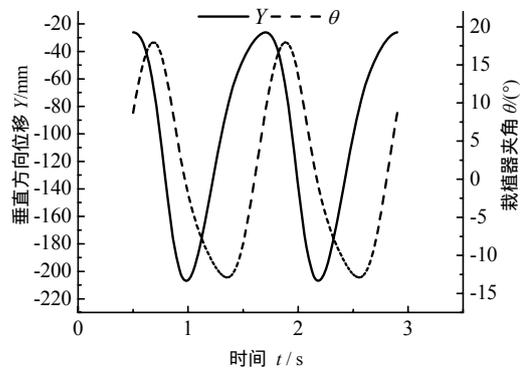


图 7 栽植器夹角的变化

Fig.7 The change of transplanter angle

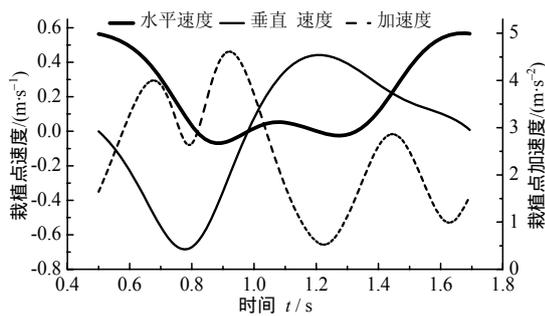


图8 栽植点的速度与加速度曲线

Fig.8 Sketch of velocity and acceleration curve of planting point

## 参考文献:

- [1] 殷艳,王汉中.我国油菜产业发展成就、问题与科技对策[J].中国农业科技导报,2012,14(4):1-7.
- [2] 汤修映,侯书林,朱玉龙,等.油菜移栽机械化技术研究进展[J].农机化研究,2010(4):224-227.
- [3] 罗海峰,汤楚宙,吴明亮,等.中国油菜生产机械化影响因素分析[J].湖南农业大学学报:社会科学版,2009,10(4):31-33.
- [4] 孙松林,罗锡文.中国油菜生产机械化影响因素的灰色关联分析[J].湖南农业大学学报:社会科学版,2009,10(5):27-30.
- [5] 吴崇友,易中懿.我国油菜全程机械化技术路线的选
- [6] 官春云,谭太龙,王国槐,等.湖南高产油菜的产量构成特点及主要栽培措施[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2011,37(4):351-355.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 陈建能,黄前泽,王英,等.钵苗移栽机椭圆齿轮行星系植苗机构运动学建模与分析[J].农业工程学报,2012,28(5):6-12.
- [11] 陈建能,王伯鸿,任根勇,等.蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析[J].农业机械学报,2010,41(12):48-53.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:张健