

移栽机曲柄滑槽式栽植机构设计与试验

金鑫¹ 杜新武¹ 杨传华² 姬江涛¹ 王世光³ 颜华³

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154000;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了提高膜上移栽机的钵苗栽植直立度并减少破膜程度, 提出了一种曲柄滑槽式栽植机构, 阐述了移栽工作原理及结构组成, 并建立了机构的运动数学模型。基于该模型采用 Matlab 软件编写了栽植机构的仿真分析与优化程序, 分析了主要参数对机构运动轨迹特性的影响规律; 以钵苗栽植直立度较高且破膜程度较低为优化指标(即鸭嘴栽植点出、入土轨迹尽量垂直垄面, 且出、入垄面点和栽植点间距尽量小), 利用程序优选出了一组最优的机构参数组合: 在移栽机组作业速度 $v = 500\text{ mm/s}$ 时, $L_1 = 150\text{ mm}$ 、 $L_3 = 120\text{ mm}$ 、 $L_4 = 310\text{ mm}$ 、 $L = 680\text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 10^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$; 在此组合下栽植器鸭嘴端的绝对运动轨迹在出入垄面时呈显著“ γ ”型轮廓, 利于钵苗直立与穴口较小撕膜。提出了一种破膜程度检测方法, 以烟草钵苗为对象进行了整机田间试验, 结果表明: 钵苗栽植直立度较高, 优良率超过 93%, 较现有七杆式栽植机构提高 10 个百分点; 栽植器鸭嘴的破膜程度有效减小, 最低可降至 8%。

关键词: 栽植机构; 膜上移栽; 曲柄滑槽; 仿真; 试验

中图分类号: S225.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0083-08

Design and Experiment on Crank-chute Planting Mechanism of Transplanting Machine

Jin Xin¹ Du Xinwu¹ Yang Chuanhua² Ji Jiangtao¹ Wang Shiguang³ Yan Hua³

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154000, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the upright degree and reduce the damage in the process of transplanting for the film transplanting machine, a crank-chute planting mechanism was designed and the mathematical model of this mechanism was built. The optimization program of mechanism was programmed on the base of the model with the Matlab software, and the influence law of the key parameters of this mechanism on the trajectory of the planting point was analyzed. The upright degree was chosen as the optimization indicator, which is, the insert point and the leaving point is perpendicular to the soil ridge as much as possible and these two points should be close to the planting point as much as possible. With the optimization program, a group of optimal parameters of this mechanism were obtained, that means, the velocity of the machine, which was 500 mm/s, the length of different bars including $L_1 = 150\text{ mm}$, $L_3 = 120\text{ mm}$, $L_4 = 310\text{ mm}$, $L = 680\text{ mm}$, different angles including $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_3 = 15^\circ$, $\theta = 20^\circ$, and with these parameters the trajectory of the planting point was γ , which was beneficial to the seedling to be upright and had less damage to the film. The experimental prototype was manufactured according to the optimal parameter, the field experiment was done with the tobacco seedlings chosen as the experiment object, the experiment result showed that the upright degree was above 93%, and the damage rate of the planting mechanism on the film can be diminished to 8%.

Key words: planting mechanism; film transplanting; crank-chute; simulation; experiment

收稿日期: 2016-01-10 修回日期: 2016-02-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(51505130)、黑龙江省自然科学基金项目(E2015042)、河南省教育厅高校科研项目(15A416003)和河南科技大学高级别培育基金项目(2016GJB002)
作者简介: 金鑫(1986—),男,讲师,博士,主要从事经济作物种苗高速栽插与低损收获技术研究,E-mail: jx.771@sina.com
通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: jjt0907@163.com

引言

覆膜移栽具有保温、保墒,提高栽后秧苗成活率等优点,是我国西、北方旱地作物栽培的重要农艺技术^[1-2]。目前,我国膜上移栽机械以鸭嘴式移栽机为主,能够一次完成打穴、植苗作业,其中以转盘式、行星齿轮式和多连杆式栽植机构的研究与应用较多^[3-7];这几种栽植机构都是利用所带动的鸭嘴栽植器以封闭圆环形成的余摆线轨迹进行钵苗移栽作业,前两种栽植机构由于钵苗栽植过程中栽植轨迹扣环较大,致使栽植器在膜上移栽时容易对地膜形成较大损伤且栽后钵苗直立度合格率一般小于90%^[8-11];后一种栽植机构能满足较高的钵苗栽植直立度和较小破膜程度,直立度合格率一般可超过90%,但优良率小于85%,移栽频率超过45株/min后撕膜现象明显^[12-15]。

膜上移栽作业,保证钵苗栽植直立度是前提,如何解决鸭嘴破膜程度过大而降低覆膜生产栽培效果是又一关键问题^[16]。本文在上述研究基础上,设计一种结构简单、调整方便的曲柄滑槽式栽植机构,阐述其工作原理,建立机构的运动数学模型,并基于该模型开发辅助分析与仿真优化程序,找出主要参数对机构鸭嘴栽植器运动轨迹特性的影响规律,优化一组最佳参数组合,并通过田间试验验证栽植机构钵苗移栽的高直立度与低破膜程度。

1 曲柄滑槽式移栽机

1.1 整机结构与工作原理

如图1所示,设计的曲柄滑槽式钵苗移栽机主要由驱动机构、机架、拉线机构、苗盘托架、送苗装置、栽植机构、变速箱、座椅总成、覆土镇压装置等部件组成。移栽机由22.5 kW拖拉机带动,采用后三点悬挂,其动力由地轮提供,经链传动、直齿圆柱齿轮和锥齿轮传动(变速箱)将动力分别分配给送苗装置和栽植机构,保证了机走栽苗、停机停栽,减少了重复栽苗。

送苗装置平行于车架安装,由36个苗杯组成分苗机构实现分苗,同时苗杯底面距鸭嘴上升的顶端位置约150 mm,便于接苗。当移栽机组前进时,钵苗随同苗杯在特定的封闭轨道上匀速运动,与此同时栽植机构也在传动部件作用下带动鸭嘴栽植器上下往复运动。当载有钵苗的苗杯运动到栽植落苗口时,栽植机构前端的鸭嘴栽植器也上升至顶端,苗杯底部在弹簧和重力的作用下开启,钵苗自由下落至鸭嘴栽植器内,并随其一起向下运动。当鸭嘴栽植器打孔入土一定深度后,在拉线机构

的作用下张开,钵苗被植入穴内,随后鸭嘴栽植器被向上提升一定高度后闭合,紧接着由一对向内倾斜的镇压轮对钵苗周围土壤进行压实,完成一次移栽过程。

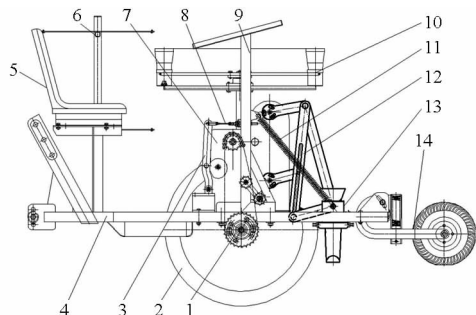


图1 曲柄滑槽式钵苗移栽机结构图

Fig. 1 Structure diagram of pot seedlings transplanter in crank-chute style

1. 驱动链轮 2. 地轮 3, 8. 拉线机构 4. 机架 5. 座椅总成
6. 苗盘架 7. 变速箱 9. 托盘架 10. 送苗装置 11. 拉簧
12. 栽植机构 13. 鸭嘴栽植器 14. 镇压装置

1.2 关键参数分析

1.2.1 关键参数

(1) 栽植频率 f

单位时间内移栽机栽植钵苗的株数,一般以株/min为单位,决定了移栽作业的效率。

(2) 栽植株距 S

栽后相邻两株钵苗间距,由移栽对象农艺种植要求决定,以烟草为例,株距一般设定为400~500 mm。

(3) 栽植机构旋转角速度 ω_z

栽植机构两曲柄在单位时间转过的角度,转过一周即完成一次投苗,单位 rad/s。

(4) 机组前进速度 v

决定了移栽机作业速度,单位 mm/s。

(5) 链传动比 i

栽植机构旋转角速度与地轮旋转角速度之比,即 $i = \omega_z / \omega_d$;它们之间的关系决定了钵苗移栽作业的质量与效率。

1.2.2 栽植频率、株距与机组前进速度的关系

栽植频率 f 、株距 S 与机组前进速度 v 的关系为

$$v = \frac{fS}{60} \quad (1)$$

一般鸭嘴式钵苗移栽机为半自动移栽机,喂苗由人工直接将钵苗投入栽植器中,栽植频率受到人工熟练程度和疲劳极限的限制,加之喂苗区较短且缓冲时间少,栽植频率只能达到30~40株/min;在曲柄滑槽式移栽机上设计了一种送苗装置(图2),将36个苗杯安装在一根齿形链上,钵苗先投入苗杯,再由苗杯喂入鸭嘴栽植器,延长了人工投苗的

时间,缓冲了人工疲劳,栽植频率提高至 55 ~ 65 株/min。

本文曲柄滑槽式钵苗移栽机栽植机构设计的栽植频率为 60 ~ 62 株/min,结合豫西地区烟苗膜上移栽的农艺要求,栽植株距 S 调节范围为 450 ~ 500 mm,由式(1)可确定机组前进速度 v 为 470 ~ 530 mm/s。

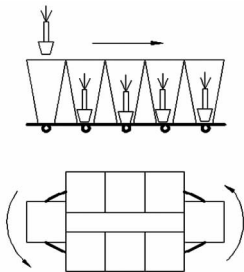


图 2 送苗装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of seedling-feeding mechanism

1.2.3 链传动比、栽植株距与地轮半径的关系

栽植机构的动力是由地轮通过链传动所传递的,其关系为

$$i = \frac{\omega_z}{\omega_d} = \frac{2\pi R_d}{S} \tag{2}$$

$$S = \frac{2\pi R_d}{i} \tag{3}$$

由式(2)、(3)可知,链传动比 i 取决于栽植株距 S 和地轮半径 R_d 。地轮半径 R_d 不可调整,设计采用 $R_d = 280$ mm,大于烟草种植垄高要求(200 ~ 250 mm);将不同农艺的种植株距要求 450 ~ 500 mm 代入式(3),得链传动比 i 可在 3.5 ~ 4.0 变化;设定移栽频率为 60 ~ 62 株/min,即栽植机构旋转角速度 ω_z 为 6.2 ~ 6.5 rad/s,代入式(2)即可求得地轮旋转角速度 ω_d 为 1.6 ~ 1.9 rad/s。

2 曲柄滑槽式栽植机构数学模型

2.1 曲柄滑槽式栽植机构

图 3 为曲柄滑槽式钵苗栽植机构的运动简图。从图中可以看出,该机构是由曲柄摇杆机构和曲柄滑块机构组合而成,主要构件有杆件、鸭嘴式栽植器(F)、铰链、滑块等。机构自由度为 2,其原动件是曲柄 AB 和曲柄 DC ,满足机构具有确定运动规律的条件。曲柄 AB 和曲柄 DC 均为匀速转动且方向和速度均相同, AD 为机架,连杆 BE 为从动件,鸭嘴栽植器(F)通过相应构件与连杆 BE 固结(为便于观察,该构件省略未画出),两者的相对位置在作业时不发生变化, M 点为鸭嘴端点。 M 点与连杆 BE 的相对位置可由 BM 连线与连杆 BE 的夹角 θ 及 M 点到 B 点的距离 L 确定,因此在曲柄滑槽式栽植机构带

动下鸭嘴栽植器端点的运动学特性等效为连杆 BE 平面上质点 M 的运动学特性。在曲柄 AB 和曲柄 DC 共同驱动下,连杆 BE 作平面运动,当鸭嘴栽植器转到最上方时,喂苗杯中待移栽的钵苗依靠自身重力下落至栽植器内,机构再转过约 180°后栽植器入土、打穴、鸭嘴夹张开,钵苗被导入到挖出的苗穴中,完成栽植过程。

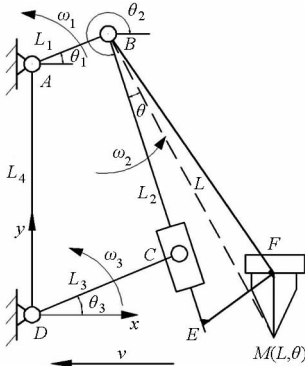


图 3 曲柄滑槽式移栽机构运动简图

Fig. 3 Motion diagram of crank-chute type planting mechanism

该机构使鸭嘴栽植器具有一定的运动轨迹(本文提出一种理想的“ γ ”型栽植轨迹,鸭嘴栽植器出、入土轨迹线与垄面垂直且近似为一条直线),通过优化机构的结构和运动参数,可使鸭嘴栽植器运动轨迹接近“ γ ”型栽植轨迹,进而改善钵苗的入土姿态和形成的穴口大小,使栽后的钵苗直立度较高且破膜程度小,从而满足膜上钵苗移栽的农艺要求。该曲柄滑槽式栽植机构能够适应高度为 50 ~ 140 mm 钵苗的移栽,实现了膜上打孔移栽且不伤苗。

2.2 曲柄滑块移栽机构数学模型

建立图 3 所示平面直角坐标系,以 D 点为坐标原点,竖直机架 AD 为 y 坐标轴(设定向上为正方向),垂直于机架的水平方向为 x 轴(设定正方向与机组前进速度方向相反)。

- 图中
- L_1 ——曲柄 AB 长度, mm
 - L_2 ——连杆 BC 长度, mm
 - L_3 ——曲柄 DC 长度, mm
 - L_4 ——机架 AD 长度, mm
 - L —— M 点距点 B 长度, mm
 - ω_1 ——曲柄 AB 角速度, rad/s
 - ω_2 ——连杆 BE 角速度, rad/s
 - ω_3 ——曲柄 DC 角速度, rad/s
 - θ_1 ——曲柄 AB 初始相位, (°)
 - θ_2 ——连杆 BE 角位移, (°)
 - θ_3 ——曲柄 DC 初始相位, (°)
 - θ —— BE 与 BM 夹角, (°)

2.2.1 栽植机构位移方程

根据机构运动简图(图 3),得出机构的封闭矢量方程

$$L_1 + L_2 = L_3 + L_4 \tag{4}$$

对式(4)分别取虚部和实部并整理得

$$\begin{cases} L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) + L_2 \cos\theta_2 = L_3 \cos(\theta_3 + \alpha) \\ L_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + L_2 \sin\theta_2 = L_3 \sin(\theta_3 + \alpha) - L_4 \end{cases} \tag{5}$$

式中 α ——主副曲柄转过角度, (°)

整理式(5)可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{L_3 \sin(\theta_3 + \alpha) - L_4 - L_1 \sin(\theta_1 + \alpha)}{L_3 \cos(\theta_3 + \alpha) - L_1 \cos(\theta_1 + \alpha)} \tag{6}$$

$$L_2^2 = (L_3 \sin(\theta_3 + \alpha) - L_4 - L_1 \sin(\theta_1 + \alpha))^2 + (L_3 \cos(\theta_3 + \alpha) - L_1 \cos(\theta_1 + \alpha))^2 \tag{7}$$

因此连杆 BC 长度 L_2 是曲柄转角的函数,随着曲柄的转动而时刻发生变化。由几何关系可知,鸭嘴栽植器端点 M 的位移方程为

$$\begin{cases} x_m = L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) + L \cos(\theta + \theta_2) \\ y_m = L_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + L \sin(\theta + \theta_2) + L_4 \end{cases} \tag{8}$$

考虑机组前进速度 v 时,则 M 点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = x_m - vt \\ y = y_m \end{cases} \tag{9}$$

2.2.2 栽植机构速度和加速度方程

将所得位移方程式(8)、(9)分别对时间求一阶导数和二阶导数,加以整理后,可得出栽植机构鸭嘴栽植点 M 的速度和加速度方程。

机组静止时栽植点 M 的速度方程为

$$\begin{bmatrix} v_{mx} \\ v_{my} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1 + \alpha) & -L \sin(\theta + \theta_2) \\ L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) & L \cos(\theta + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

机组前进时栽植点 M 的运动速度方程为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{mx} - v \\ v_{my} \end{bmatrix} \tag{11}$$

栽植点 M 的加速度方程为

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1 + \alpha) & -L \sin(\theta + \theta_2) \\ L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) & L \cos(\theta + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) & L \cos(\theta + \theta_2) \\ L_1 \sin(\theta_1 + \alpha) & L \sin(\theta + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中 a_2 ——连杆 BE 角加速度, rad/s^2

3 主要参数对曲柄滑槽式栽植机构运动特性影响分析

3.1 栽植机构辅助分析与仿真程序

综合上述分析可知,栽植器鸭嘴端的运动轨迹和入土、落苗、出土时的位置及姿态严重影响着移栽机的栽植效果及破膜程度。以所建立的运动数学模型为基础,利用 Matlab 编写了曲柄滑槽式栽植机构辅助分析及仿真程序,通过人机对话窗口(如图 4 所示),调整各杆杆长及初始相位角、栽植器的安装位置和移栽频率等主要参数进行仿真计算,可获得不同参数条件下栽植器鸭嘴端移栽运动轨迹、速度和加速度曲线。

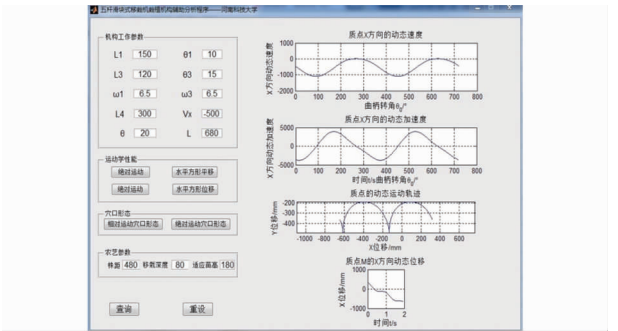


图 4 曲柄滑槽式栽植机构辅助分析程序界面

Fig. 4 Interface of aided analytical program of crank-chute type transplanting mechanism

3.2 参数影响分析

利用所建立的栽植机构人机对话辅助分析程序,选取主要参数:曲柄 AB 长度 L_1 、曲柄 DC 长度 L_3 、机架 AD 长度 L_4 、曲柄 AB 和曲柄 DC 的相位差 θ_{31} 、栽植器安装位置角 θ 进行仿真分析,分析其对栽植器鸭嘴端运动轨迹的影响。

3.2.1 曲柄 AB 长度 L_1

在移栽机组前进速度 $v = 500 \text{ mm/s}$ 的情况下,曲柄 AB 长度 L_1 对栽植点 M 的移栽轨迹影响如图 5 所示。当 $L_3 = 100 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 380 \text{ mm}$ 、 $L = 680 \text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 15^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 时,随着曲柄 AB 长度 L_1 的增大,栽植器鸭嘴端点 M 的轨迹曲线弓起高度逐渐增大,入土深度(垄面到轨迹线最低点距离)增加,同时在出入垄面上下形成的轨迹形状变化明显,由环扣型逐渐变演为“ γ ”型,出入土点间的位置距离在逐渐缩小靠近。落苗处的垂直度逐渐明显。

3.2.2 曲柄 DC 长度 L_3

在移栽机组前进速度 $v = 500 \text{ mm/s}$ 的情况下,曲柄 DC 长度 L_3 对栽植点 M 的移栽轨迹影响如图 6 所示。当 $L_1 = 120 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 380 \text{ mm}$ 、 $L = 680 \text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 15^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 时,随着曲柄 DC 长度 L_3 的增长,栽植器鸭嘴端点 M 的轨迹曲线高度基本不

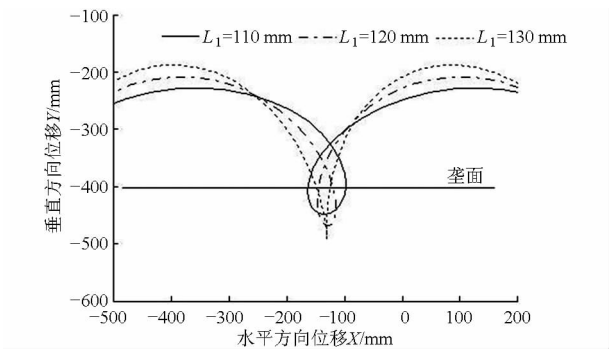


图5 L_1 对栽植点 M 移栽轨迹的影响

Fig.5 Influence relation between L_1 and locus curve of planting point M

变,鸭嘴入土深度也基本不变,但入土倾角(轨迹线入土部分与垄面夹角)逐渐增大,轨迹形状由“V”型逐渐变演为“ γ ”型,出、入土点间的位置靠拢趋势明显。

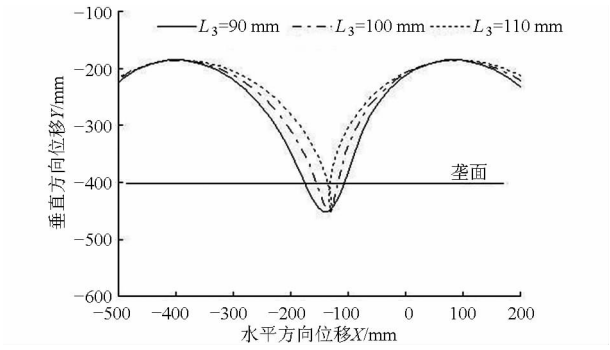


图6 L_3 对栽植点 M 移栽轨迹的影响

Fig.6 Influence relation between L_3 and locus curve of planting point M

3.2.3 机架 AD 长度 L_4

在移栽机组前进速度 $v = 500 \text{ mm/s}$ 的情况下,机架 AD 长度 L_4 对栽植点 M 的移栽轨迹影响如图7所示。当 $L_1 = 120 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 90 \text{ mm}$ 、 $L = 680 \text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 15^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 时,随着机架 AD 长度 L_4 的增长,栽植器鸭嘴端点 M 的轨迹曲线形状、高度几乎没有变化,但整体向垄面正上方逐渐提起,使得移栽深度有所减小。

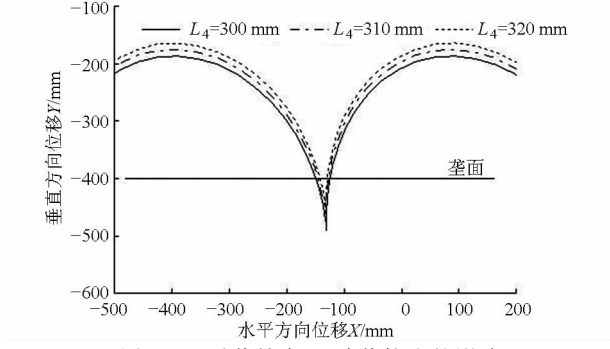


图7 L_4 对栽植点 M 移栽轨迹的影响

Fig.7 Influence relation between L_4 and locus curve of planting point M

3.2.4 曲柄 AB 和曲柄 DC 的相位差 θ_{31}

在移栽机组前进速度 $v = 500 \text{ mm/s}$ 的情况下,曲柄 AB 和曲柄 DC 的相位差 θ_{31} 对栽植点 M 的移栽轨迹影响如图8所示。当 $L_1 = 120 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 90 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 320 \text{ mm}$ 、 $L = 680 \text{ mm}$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 时,随着曲柄 AB 和曲柄 CD 的相位差 θ_{31} 增大(保持 θ_3 的初始相位角不变,而减小曲柄 AB 的初始相位角 θ_1 来实现),栽植器鸭嘴端点 M 轨迹曲线形状变化不大,但逐渐产生前倾趋势,轨迹高度和栽植深度均减小,出、入土点间的距离基本不变。

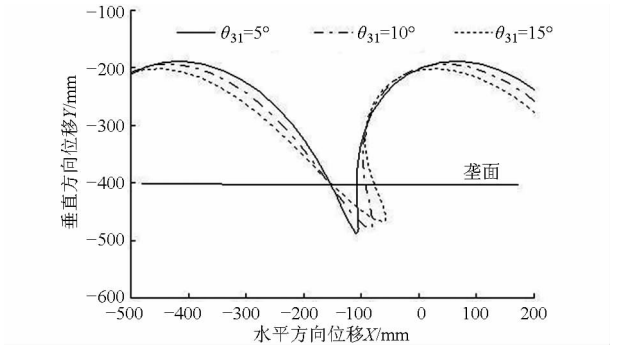


图8 θ_{31} 对栽植点 M 移栽轨迹的影响

Fig.8 Influence relation between θ_{31} and locus curve of planting point M

3.2.5 鸭嘴栽植器安装位置角 θ

栽植点 M 与铰接点 B 连线 MB 和连杆 BE 的夹角 θ ,反映出栽植器部件相对于连杆 BE 的位置,并定义 θ 为栽植器安装位置角。在移栽机组前进速度 $v = 500 \text{ mm/s}$ 的情况下,栽植器安装位置角 θ 对栽植点 M 的移栽轨迹影响如图9所示。当 $L_1 = 120 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 90 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 320 \text{ mm}$ 、 $L = 680 \text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 10^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 时,随着安装位置角 θ 的增大,栽植器鸭嘴端点 M 的移栽轨迹曲线“ γ ”型特征逐渐明显,轮廓形状基本不变,整体向右上方偏移,出、入土点间的间距先减小后增大且栽植深度逐渐变小。

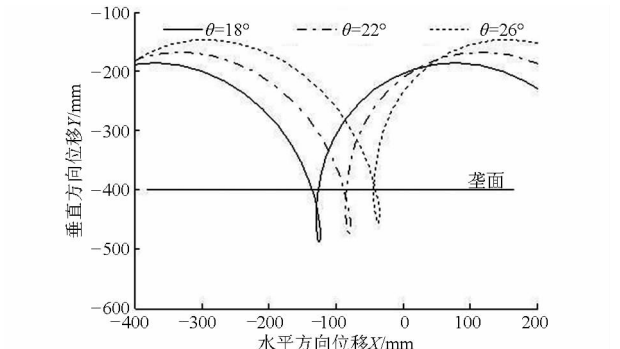


图9 θ 对栽植点 M 移栽轨迹的影响

Fig.9 Influence relation between θ and locus curve of planting point M

4 参数优选分析

为了使设计的曲柄滑槽式钵苗栽植机构具有优

良的综合作业效果,需实现以下目标:

(1)栽植器鸭嘴端点 M 运动轨迹的入土段和出土段轨迹线近似重合,最大偏差小于 5 mm,且与垄面夹角大于 85° 。

(2)栽植器鸭嘴端点 M 运动轨迹的出、入土点和投苗点,3 点重合且误差小于 2 mm。

(3)钵苗入土栽植过程需要一段稳定的“零速投苗”时段,即鸭嘴在水平方向的绝对位移在某一小段时间内近似相等。

根据对栽植器鸭嘴端的运动特性分析和所编写的栽植机构辅助分析与仿真优化程序,在设定移栽机组前进速度 $v=500\text{ mm/s}$ 的情况下,对曲柄滑槽式栽植机构参数进行人机对话优选分析。得到了一组较优参数组合为: $L_1=150\text{ mm}$ 、 $L_3=120\text{ mm}$ 、 $L_4=310\text{ mm}$ 、 $L=680\text{ mm}$ 、 $\theta_1=10^{\circ}$ 、 $\theta_3=15^{\circ}$ 、 $\theta=20^{\circ}$ 。在此组合下,栽植器鸭嘴端栽植点 M 的运动轨迹如图 10 所示,其在水平方向的速度和绝对位移如图 11、12 所示。

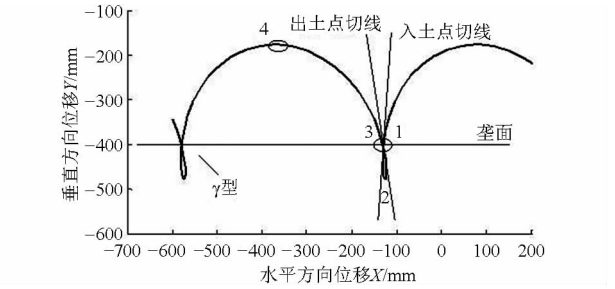


图 10 M 点运动轨迹
Fig. 10 Motion curve of point M

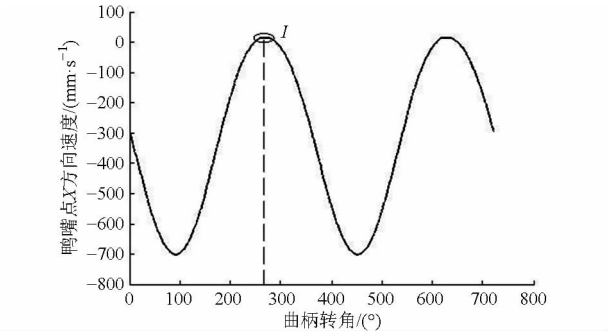


图 11 M 点水平方向速度曲线
Fig. 11 Horizontal direction dynamic speed of point M

在此较优参数组合下,鸭嘴栽植器的栽植轨迹高度为 306 mm,栽植深度为 79 mm,移栽株距为 480 mm,栽植频率为 62.5 株/min。鸭嘴端点 M 绝对运动轨迹在出入垄面时呈显著的“ γ ”型轮廓。从图 10 中可以看出,栽植器在入土点 1 处几乎垂直入土,然后沿近似垂直弧 $\widehat{12}$ 段向最低点继续运动,当曲柄位置角约为 270° ,即图 11 中所示位置 I 时,栽植器鸭嘴端出现水平零速点,在此点附近可使得栽苗稳定。在点 2 处栽植钵苗后,又沿近似垂直弧 $\widehat{23}$ 段

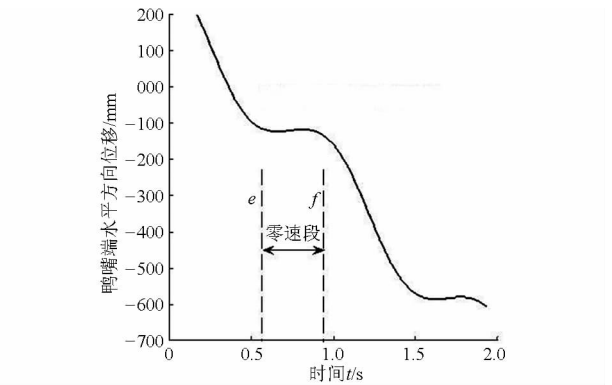


图 12 M 点水平方向位移曲线
Fig. 12 Horizontal displacement of point M

上升至点 3,近垂直角度出土离开垄面,并且运动到轨迹顶部点 4 处时,轨迹曲线变得较为平缓,有利于栽植器的接苗。点 1、3 为重合点,且与栽苗点 2 的水平坐标相等,即表明栽植器不会挂带已栽钵苗,并且对穴口地膜破坏程度也较小。

图 12 曲线表明,该曲柄滑槽式移栽机构鸭嘴栽植点 M 的每个栽植周期内在机组前进方向上水平绝对位移出现一段近似横线(虚线 ef 段,约 0.4 s),即表明该机构能为鸭嘴栽植器提供一个“零速时间段”,使得栽植器水平方向位移量趋近于零,保证了秧苗移栽后的直立度,而且还能够克服投苗后鸭嘴横向移动带苗、撕裂刮伤地膜的情况,实现了零速移栽。由以上分析可知,在较优参数组合下该栽植机构较好地满足了移栽机膜上移栽作业性能要求。

5 田间试验

为了考察设计的曲柄滑槽式栽植机构膜上移栽作业质量与减控地膜损伤效果,于 2015 年 5 月 8 日在河南省宜阳县进行了整机田间试验(图 13)。



图 13 样机试验现场
Fig. 13 Scene of prototype experience

5.1 试验材料

试验选取烟草钵苗为移栽对象。采用 160 穴泡沫盘漂浮育苗,苗龄期为 60 d,基质为圆锥状,基质底部直径为 10 mm,基质顶部直径为 20 mm,基质高度为 40 mm,钵苗平均高度为 120 mm。

5.2 试验设备

东方红 300 型拖拉机:工作挡位 II 挡、III 挡、IV

挡分别对应牵引速度 375、577、789 mm/s。

卷尺：量程 0 ~ 100 m；标杆、量角器和计时器。

5.3 评价指标

直立状态：根据旱地栽植机械行业标准 JB/T 10291—2013《旱地移栽机械》，以烟苗主茎与地面夹角 α 来判定， $\alpha \leq 45^\circ$ 为倒伏， $\alpha > 45^\circ$ 为合格， $\alpha > 70^\circ$ 为优良。

破膜程度：对于膜上移栽，烟苗周围土壤被地膜覆盖越多，土壤暴露的范围越少，对烟苗后期在田间的生长越有利。为了更好地体现地膜保墒、保温作用，膜上移栽时应尽量减小栽植器对地膜的破坏。查阅相关文献，并未见关于鸭嘴式移栽机膜上移栽时栽植器对地膜损伤程度的评价方法。本文提出一种破膜程度评价指标，并给出一种简单测定方法，如图 14 所示。图 14a 虚线长度 l 为鸭嘴栽植器入土部分最长弦线， h 是入土深度；图 14b 中 s 是作业结束后所留膜孔纵向最长距离。规定膜孔纵向最长距离 s 和栽植器入土部分最长弦线 l 的长度差与最长弦线 l 的百分比，作为地膜破坏程度评价指标，记为

$$p = \frac{s - l}{l} \times 100\% \tag{13}$$

p 值越接近于零，说明地膜损伤程度越小， p 值越大说明地膜损伤程度越大。

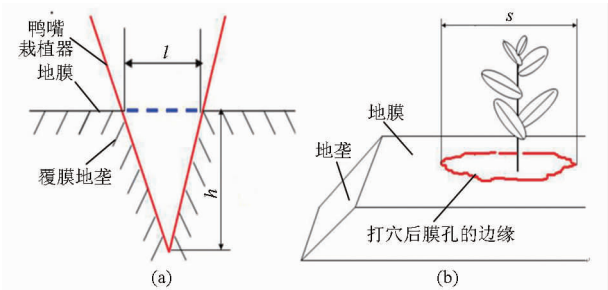


图 14 薄膜破损程度检测示意图

Fig. 14 Schematic diagram of damage degree of film

5.4 试验方法

试验前先进行起垄覆膜，垄截面为近似等腰梯形，顶宽 300 mm、底宽 600 mm、高 200 mm。覆膜垄长 20 m，前 3 m 试验准备区，种间 15 m 为测区，2 m 为调整区，各区域由标杆区分。试验时拖拉机以Ⅲ挡运行，控制机组前进速度 $v = 500$ mm/s；进行 3 组试验，每组栽植 30 株苗，记录相关试验数据并进行相应处理。

5.5 试验结果

曲柄滑槽式钵苗移栽机田间试验结果如表 2 所示，其中破膜程度是 30 次入土的均值。

试验结果表明：在机构最佳参数组合下，机组前进速度 $v = 500$ mm/s 时，设计的曲柄滑槽式栽植机构能够实现较高直立度的钵苗栽植，栽后钵苗直立度优良率超过 93%；其栽植器鸭嘴的破膜程度同样

表 2 移栽试验结果

Tab. 2 Test results of transplanting

前进速度/ (mm·s ⁻¹)	栽植频率/ (株·min ⁻¹)	倒伏 株数	合格 株数	优良 株数	合格 率/%	优良 率/%	破膜程 度/%
516	62	1	1	28	96.7	93.3	14
502	61	0	2	28	100	93.3	8
510	61	0	1	29	100	96.7	11

较小，最低可降至 8%；在移栽频率约 60 株/min 时，该钵苗直立度优良率较现有几种典型烟草移栽机（YZ-2 型、2ZBZ-2A 型等）及多种栽植机构均有一定提升^[16-20]，其中较目前研究的七杆式钵苗栽植机构钵苗直立度优良率提高 10 个百分点（文献中为 83.3%）^[1,20]；依据本文破膜程度测试方法，对比前期凸轮-摆杆式栽植机构试验，破膜程度平均提升 11.5 个百分点（前期试验破膜程度 22.5%）；因此该栽植机构能够较好满足膜上移栽的农艺要求，且有效减小地膜破损。

6 结论

(1) 设计了一种结构简单、便于调整的曲柄滑槽式栽植机构，并基于该机构设计了一种悬挂式钵苗移栽机。该机由地轮、拉线机构、送苗装置、栽植机构、变速箱、座椅总成、覆土镇压装置等部件组成，地轮提供动力，一次作业可完成膜上打穴、栽苗、覆土等功能，移栽频率 55 ~ 65 株/min。

(2) 建立了曲柄滑槽式栽植机构的运动数学模型，基于该模型采用 Matlab 软件开发了机构辅助分析与仿真优化程序，通过人机对话方式，获得了机构主要参数对鸭嘴栽植器运动轨迹特性影响的规律：曲柄 AB 长度、曲柄 DC 长度、机架 AD 长度和两曲柄的相位差对栽植器的运动轨迹轮廓、栽植深度、地膜穴口大小以及栽植段轨迹的垂直度都有不同程度影响，尤其是曲柄 AB 和曲柄 CD 的长度变化对鸭嘴栽植器破膜穴口的大小影响较大，决定了地膜的损伤程度。

(3) 通过参数优选分析，得出栽植机构的一组较优参数组合，即移栽机组前进速度 $v = 500$ mm/s 时， $L_1 = 150$ mm、 $L_3 = 120$ mm、 $L_4 = 310$ mm、 $L = 680$ mm、 $\theta_1 = 10^\circ$ 、 $\theta_3 = 15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ ；此时，栽植器鸭嘴端点的绝对运动轨迹在出入垄面时呈显著的“ γ ”型轮廓，不会挂带已栽钵苗，对穴口地膜破坏程度较小，同时还具有栽苗“零速时间段”。

(4) 以烟草钵苗为对象，进行移栽机田间试验，结果表明在机组前进速度约为 500 mm/s 时，钵苗移栽直立度较高，优良率超过 93%；栽植器破膜程度较低，不超过 15%，满足膜上移栽作业的农艺要求。

参考文献

- 1 于晓旭,赵匀,陈宝成,等.移栽机械发展现状与展望[J].农业机械学报,2014,45(8):44-53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese)
- 2 贺智涛,郑治华,刘剑君,等.膜上移栽机的发展现状及存在的问题[J].农机化研究,2014,36(9):252-255.
HE Zhitao, ZHENG Zhihua, LIU Jianjun, et al. Development status of up-film transplanting mechanism and the problems[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 252-255. (in Chinese)
- 3 郝淼.钵苗移栽机构仿真分析和结构优化[D].长春:吉林大学,2013.
HAO Miao. Simulation analysis and optimization of a seedling transplanting mechanism[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 4 张为政,王君玲,张祖立.悬杯式蔬菜移栽机的设计[J].农机化研究,2011,33(8):104-106.
ZHANG Weizheng, WANG Junling, ZHANG Zuli. Design of cantilever cup vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(8): 104-106. (in Chinese)
- 5 刘磊,陈永成,毕新胜,等.吊篮式移栽机栽植器运动参数的研究[J].石河子大学学报:自然科学版,2008,26(4):504-506.
LIU Lei, CHEN Yongcheng, BI Xinsheng, et al. Reserch on the ZZM-2 transplanting machine with the nacelle[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2008, 26(4): 504-506. (in Chinese)
- 6 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.
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. (in Chinese)
- 7 江江涛,靳鑫,杜鑫武,等.膜上移栽机栽植器运动学分析与性能测试[J].国际农业工程学报,2015,24(2):30-38.
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.
- 8 靳鑫,李淑君,颜华,等.烟草移栽机工作参数优化以实现更高直立度的块茎苗[J].国际农业工程学报,2012,21(2):50-56.
JIN Xin, LI Shujun, YAN Hua, et al. Optimization of working parameters of tobacco transplanter to achieve higher erectness of block seedlings[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2012, 21(2): 50-56.
- 9 封俊,秦贵,宋卫堂,等.移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J].农业机械学报,2002,33(5):48-50.
FENG Jun, QIN Gui, SONG Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48-50. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 董锋,耿端阳,汪遵元.带式喂入钵苗栽植机研究[J].农业机械学报,2000,31(2):42-45.
DONG Feng, GENG Duanyang, WANG Zunyuan. Study on block seedling transplanter with belt feeding mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 42-45. (in Chinese)
- 12 王文明,窦卫国,王春光,等.2ZT-2型甜菜移栽机移植系统的参数分析[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)
- 13 张国忠,许绮川,潘玉龙,等.影响机械移栽钵苗栽直率的因素分析[J].华中农业大学学报,2004,23(4):463-468.
ZHANG Guozhong, XU Qichuan, PAN Yulong, et al. Experimental study of effect factors on standing seedling rate transplanted by machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(4): 463-468. (in Chinese)
- 14 江江涛,何 Yakai, 杜 Mengmeng, et al. Design of the up-film transplanter and kinematic analysis of its planting devices[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, 2013:312-316.
- 15 金鑫,李树君,杨学军,等.膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J].农业机械学报,2012,43(增刊):29-34.
JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization for pot seedling planting mechanism based on up-film transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 29-34. (in Chinese)
- 16 那明君,董欣,历雪,等.烟草钵苗移栽机鸭嘴式移栽部件移栽质量试验[J].农机化研究,2015,37(11):208-211.
NA Mingjun, DONG Xin, LI Xue, et al. Experimental study on transplanting quality with duckbill type transplanting parts of tobacco transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 208-211. (in Chinese)
- 17 刘敏,张明,绪言,等.2ZBZ-2A型移栽机栽植机构运动学分析与试验[J].农机化研究,2015,37(11):31-36.
LIU Min, ZHANG Ming, XU Yan, et al. Kinematics analysis and experiment on transplanting apparatus of 2ZBZ-2A transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 31-36. (in Chinese)
- 18 胡建平,张建兵,何俊艺,等.移栽机行星轮转臂式栽植器运动分析与试验[J].农业机械学报,2013,44(10):57-61.
HU Jianping, ZHANG Jianbing, HE Junyi, et al. Motion analysis and experiment for planting mechanism with planetary gears of transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 57-61. (in Chinese)
- 19 李旭英,王玉伟,鲁国成,等.吊杯式栽植器的优化设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(14):58-64.
LI Xuying, WANG Yuwei, LU Guocheng, et al. Optimization design and test of dibble-type transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 58-64. (in Chinese)
- 20 郑治华.膜上高速移栽机构试验研究[D].洛阳:河南科技大学,2014.
ZHENG Zhihua. Experimental research of up-film transplanting mechanism[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)