

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.010

小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验

俞高红^{1,2} 李成虎¹ 汪应萍¹ 赵雄^{1,2} 王磊^{1,2} 郑剑³

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 杭州杭氧透平机械有限公司, 杭州 310004)

摘要: 针对现有植苗机构用于小株距蔬菜移栽时出现的轨迹不合理、穴口太大及秧苗直立性差等问题,提出一种适用于蔬菜小株距高密度移栽的史蒂芬森(Stephenson)型六连杆植苗机构。首先,建立史蒂芬森型六连杆植苗机构运动学模型,基于 Visual Basic 6.0 开发植苗机构辅助分析优化设计软件,分析了不同机构参数对植苗轨迹姿态的影响,并通过优化人机交互的方式得到一组满意的机构参数;其次,对植苗机构进行结构设计,三维建模并进行虚拟样机仿真,搭建试验台并进行空转试验得到实际植苗轨迹,将理论轨迹、虚拟仿真轨迹和实际植苗轨迹进行对比,三者轨迹基本一致,验证了该植苗机构设计的合理性。最后开展了植苗试验,在转速 20 ~ 40 r/min 下进行植苗试验时,植苗平均合格率 91.7%,移栽后钵苗株距控制在 110 mm 左右,直立度接近于 90°,满足小株距高密度移栽要求,验证了植苗机构具有较好的可行性和实用性。

关键词: 蔬菜植苗机构; 小株距; 密植移栽; 人机交互; 虚拟仿真; 植苗试验

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0096-10

OSID:



Design and Experiment of Transplanting Mechanism for High Density Vegetables with Small Plant Spacing

YU Gaohong^{1,2} LI Chenghu¹ WANG Yingping¹ ZHAO Xiong^{1,2} WANG Lei^{1,2} ZHENG Jian³

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China

3. Hangzhou Hangyang Turbine Machinery Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: Aiming at the problems of unreasonable trajectory, too large hole and poor uprightness of seedlings when the existing seedling planting mechanism is used for transplanting vegetables with small plant spacing, a Stephenson six-bar seedling planting mechanism suitable for transplanting vegetables with small plant spacing and high density was proposed. Firstly, the kinematics model of Stephenson six-bar seedling planting mechanism was established. Based on Visual Basic 6.0, the auxiliary analysis and optimization design software of seedling planting mechanism was developed. The influence of different mechanism parameters on seedling trajectory attitude was analyzed, and a set of satisfactory mechanism parameters were obtained by optimizing human-computer interaction. Secondly, the structural design of the seedling planting mechanism was carried out. The three-dimensional modeling and virtual prototype simulation were carried out. The test bench was built and the idle test was carried out to obtain the actual seedling planting trajectory. The theoretical trajectory, virtual simulation trajectory and actual seedling planting trajectory were compared. The three trajectories were basically the same, which verified the rationality of the design of the seedling planting mechanism. Finally, the seedling planting test was carried out. When the seedling planting test was carried out at different speeds of 20 ~ 40 r/min, the average qualified rate of seedling planting was 91.7%. After transplanting, the seedling spacing was controlled at about 110 mm, and the verticality was close to 90°, which met the requirements of small spacing and high density transplanting, and verified that the seedling planting mechanism had good feasibility and practicability.

Key words: vegetable seedling planting mechanism; small plant spacing; high-density transplanting; human computer interaction; virtual simulation; seedling planting test

收稿日期: 2022-08-15 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171899)和温州市科技局基础性科研项目(N20220001)

作者简介: 俞高红(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事移栽装备设计、机构运动学和农业机器人研究,E-mail: yugh@zstu.edu.cn

0 引言

我国约有 60% 以上的蔬菜品种采用育苗移栽的种植方式^[1-2],但大多数绿叶蔬菜由于种植的行距和株距都较小,没有适用的密植移栽机,目前主要采用人工移栽^[3-4],其劳动强度大、作业效率低,难以实现大面积种植和规范化管理^[5-6]。

蔬菜机械化移栽技术比较成熟的欧美国家融合机电液与控制技术研发了大型自动化移栽装备^[7-8],如意大利法拉利公司设计的 Futura 型多行移栽机和澳大利亚 HD144 型六行自动蔬菜移栽机,但该类移栽机由多套机构协作完成移栽动作,整体结构庞大、价格昂贵,且主要用于大行距和大株距的多行蔬菜秧苗移栽,种植后蔬菜达不到密植要求,不适用于小株距密植移栽作业^[9-12]。日本投放市场的小型自动移栽装备主要用于单株取苗单行或双行作业^[13],移栽行距一般为 450 ~ 650 mm,株距为 260 ~ 800 mm,同样不符合蔬菜高密度种植的小行距小株距农艺要求。我国目前虽已研发出部分移栽装备,但机器种类不全、自动化程度不高,且都仅适用于大株距、大行距移栽,尚缺乏用于小株距多行密植的高效移栽装备。

育苗机构是蔬菜移栽机的最终执行机构,直接影响着蔬菜钵苗的育苗质量。近年来,国内针对育苗机构进行了大量研究,陈建能等^[14-15]提出基于非圆齿轮行星轮系传动的育苗机构,虽可实现高速移栽,但其钵苗株距为 330 mm,回程轨迹还有些前倾。迟明路等^[16]对吊篮式移栽机钵苗株距的调节进行研究,但只有通过改变吊杯个数才可进行株距调节,过程过于繁琐。胡建平等^[17]提出一种等速齿轮行星轮系栽植嘴式育苗机构,仅能够满足 3 种固定株距移栽要求,其蔬菜苗栽植直立度优良率只有 81%。俞高红等^[18-19]设计了一种植钵苗株距达到 450 mm 的育苗机构,其钵苗直立度优良率 85%,钵苗效率可达 100 株/(行·min)。上述育苗机构均仅适用于大行距、大株距的蔬菜移栽。李鹏斌等^[20]针对贵州地区辣椒种植宜机收簇生品种小株距膜上移栽农艺要求,对井关 PVHR2 型移栽机的七杆育苗机构进行优化,将最小株距由 300 mm 减小为 150 mm。但该机构需要两个自由度,结构复杂,且该机器移栽行数仅为 2 行,不满足高密度蔬菜钵苗需求。

本文以结构简单且能够实现复杂运动轨迹姿态的斯蒂芬森型六杆机构作为核心驱动机构,设计一种满足小株距高密度蔬菜移栽的育苗机构。

1 育苗机构工作原理与运动学建模

1.1 育苗机构工作原理

该机构由斯蒂芬森型六杆机构、栽植嘴、凸轮、凸轮摆杆和收缩绳等组成。图 1 为斯蒂芬森型六杆机构与栽植嘴机构简图,其中斯蒂芬森六杆机构通过四杆机构和五杆机构^[21]复合而成,曲柄 1 与曲柄 5 固定于点 A 作为一个曲柄输入原动件,摇杆 3 和摇杆 7 固定于点 E 作为摇杆,且点 A 和点 E 均固定在机架上,其余杆件相互铰接,通过各杆件之间的联动,从而带动栽植嘴做循环运动,栽植嘴固定于点 I。栽植嘴的张开由凸轮、凸轮摆杆以及收缩绳之间配合来控制^[22]。凸轮安装在曲柄 1 和曲柄 5 公共的点 A 上。收缩绳内部钢丝一端固定在栽植嘴上,另外一端固定在凸轮摆杆上;栽植嘴的闭合通过连接在前后栽植嘴上的弹簧收缩来实现。栽植嘴开合机构简图如图 2 所示。育苗机构转动方向与其前进方向一致。当栽植嘴运动到接苗位置时,钵苗便自由下落到栽植嘴中;栽植嘴运动到植苗位置时,栽植嘴进入土壤并张开,钵苗随着栽植嘴的张开离开栽植嘴,进入土穴。

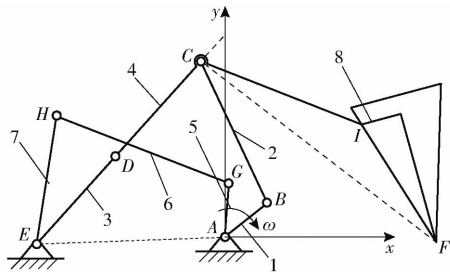


图 1 斯蒂芬森型六杆育苗机构简图
Fig. 1 Stephenson type six bar mechanism and planting mouth
1、5. 曲柄 2、4、6. 连杆 3、7. 摇杆 8. 栽植嘴

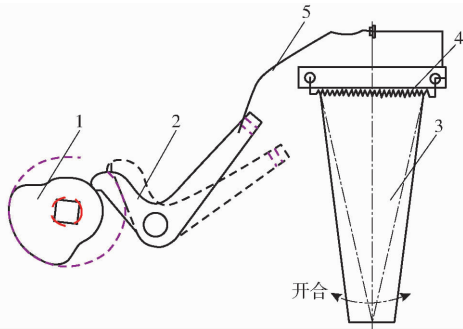


图 2 栽植嘴开合机构简图
Fig. 2 Sketch of opening and closing mechanism of planting mouth
1. 凸轮 2. 凸轮摆杆 3. 栽植嘴 4. 弹簧 5. 收缩绳

本文设计的斯蒂芬森型六杆育苗机构适用于小青菜这类株距小且种植密度高的蔬菜钵苗,通过建立育苗机构运动学模型、开发辅助分析与优化软件

得到满足相应农艺要求的植苗轨迹与姿态,利用多杆高次曲线得出植苗所需要的轨迹,可以改变参数调整植苗轨迹。并开展结构设计、三维建模、虚拟仿真、样机试验等工作,以验证植苗机构设计的合理性与实用性。

1.2 植苗机构运动学模型

如图 3 所示,以植苗机构曲柄 AB 和 AG 的旋转中心点 A 为原点、水平方向为 X 轴、垂直方向为 Y 轴。规定 X 轴作为始边,逆时针方向为正方向,且使用右手坐标系。即在三角函数计算时,按右手坐标原则建立各三角函数间的关系,判断各运动参数的矢量方向。

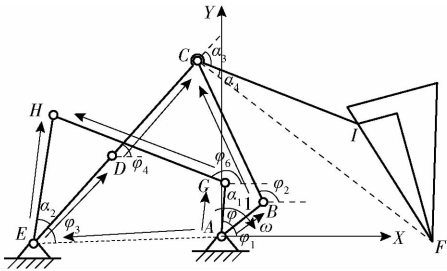


图 3 植苗机构矢量方程图

Fig. 3 Vector diagram of seedling planting mechanism

由图 3 建立矢量方程

$$\boldsymbol{l}_{AB} + \boldsymbol{l}_{BC} = \boldsymbol{l}_{AE} + \boldsymbol{l}_{ED} + \boldsymbol{l}_{DC} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{l}_{AG} + \boldsymbol{l}_{GH} = \boldsymbol{l}_{AE} + \boldsymbol{l}_{EH} \tag{2}$$

由式(1)可得

$$\begin{cases} L_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \cos\varphi_2 = X_E + L_3 \cos\varphi_3 + L_4 \cos\varphi_4 \\ L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \sin\varphi_2 = X_E + L_3 \sin\varphi_3 + L_4 \sin\varphi_4 \end{cases} \tag{3}$$

- 式中 L_1 ——曲柄 AB 长度
 L_2 ——连杆 BC 长度
 L_3 ——摇杆 DE 长度
 L_4 ——杆 CD 长度
 φ ——曲柄 AB 和 AG 间夹角
 φ_1 ——曲柄 AB 初始角位移
 φ_2 ——杆 BC 角位移
 φ_3 ——摇杆 ED 和 EH 角位移
 φ_4 ——杆 CD 角位移
 X_E ——点 E 水平位移

由式(2)可得

$$\begin{cases} L_5 \cos(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) + L_6 \cos\varphi_6 = X_E + L_7 \cos(\varphi_3 + \alpha_2) \\ L_5 \sin(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) + L_6 \sin\varphi_6 = X_E + L_7 \sin(\varphi_3 + \alpha_2) \end{cases} \tag{4}$$

- 式中 L_5 ——曲柄 AG 长度
 L_6 ——连杆 GH 长度
 L_7 ——摇杆 EH 长度
 α_1 ——曲柄 AB 和 AG 间夹角

α_2 ——摇杆 ED 和 EH 间夹角

φ_6 ——杆 GH 角位移

可得栽植嘴尖点 F 位移方程为

$$\begin{cases} X_F = L_1 \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \cos\varphi_2 + L_{CF} \cos(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \\ Y_F = L_1 \sin(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \sin\varphi_2 + L_{CF} \sin(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \end{cases} \tag{5}$$

式中 L_{CF} ——点 C 和点 F 间距离

α_3 ——杆 CD 和 CF 间夹角

α_4 ——CI 与 CF 间夹角

将式(3)对时间 t 求导,可得

$$\begin{cases} -L_1 \dot{\varphi} \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2 \sin\varphi_2 = -L_3 \dot{\varphi}_3 \sin\varphi_3 - L_4 \dot{\varphi}_4 \sin\varphi_4 \\ L_1 \dot{\varphi} \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \dot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 = L_3 \dot{\varphi}_3 \cos\varphi_3 + L_4 \dot{\varphi}_4 \cos\varphi_4 \end{cases} \tag{6}$$

式中 $\dot{\varphi}$ ——曲柄 AB 和 AG 角速度

$\dot{\varphi}_2$ ——杆 BC 角速度

$\dot{\varphi}_3$ ——摇杆 ED 和 EH 角速度

$\dot{\varphi}_4$ ——杆 CD 角速度

将式(4)对时间 t 求导,可得

$$\begin{cases} -L_5 \dot{\varphi} \sin(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) - L_6 \dot{\varphi}_6 \sin\varphi_6 = \\ \quad -L_7 \dot{\varphi}_3 \sin(\varphi_3 + \alpha_2) \\ L_5 \dot{\varphi} \cos(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) + L_6 \dot{\varphi}_6 \cos\varphi_6 = \\ \quad L_7 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 + \alpha_2) \end{cases} \tag{7}$$

式中 $\dot{\varphi}_6$ ——杆 GH 角速度

综上可以解得点 F 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_F = -L_1 \dot{\varphi} \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2 \sin\varphi_2 - \\ \quad L_{CF} \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \\ \dot{Y}_F = L_1 \dot{\varphi} \cos(\varphi_1 + \varphi) + L_2 \dot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 - \\ \quad L_{CF} \dot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \end{cases} \tag{8}$$

将式(6)对时间 t 求导,可得

$$\begin{cases} -L_1 \ddot{\varphi} \cos(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \ddot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 - L_2 \dot{\varphi}_2 \sin\varphi_2 = \\ \quad -L_3 \ddot{\varphi}_3 \cos\varphi_3 - L_3 \dot{\varphi}_3 \sin\varphi_3 - L_4 \ddot{\varphi}_4 \cos\varphi_4 - L_4 \dot{\varphi}_4 \sin\varphi_4 \\ -L_1 \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi_1 + \varphi) - L_2 \dot{\varphi}_2^2 \sin\varphi_2 + L_2 \ddot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 = \\ \quad -L_3 \dot{\varphi}_3^2 \sin\varphi_3 + L_3 \ddot{\varphi}_3 \cos\varphi_3 - L_4 \dot{\varphi}_4^2 \sin\varphi_4 + L_4 \ddot{\varphi}_4 \cos\varphi_4 \end{cases} \tag{9}$$

式中 $\ddot{\varphi}_2$ ——杆 BC 角加速度

$\ddot{\varphi}_3$ ——摇杆 ED 和 EH 角加速度

$\ddot{\varphi}_4$ ——杆 CD 角加速度

将式(7)对时间 t 求导,可得

$$\begin{cases} -L_5 \ddot{\varphi} \cos(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) - L_6 \ddot{\varphi}_6 \cos\varphi_6 - L_6 \dot{\varphi}_6 \sin\varphi_6 = \\ \quad -L_7 \ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 + \alpha_2) - L_7 \dot{\varphi}_3 \sin(\varphi_3 + \alpha_2) \\ -L_5 \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi_1 + \varphi + \alpha_1) - L_6 \dot{\varphi}_6^2 \sin\varphi_6 + L_6 \ddot{\varphi}_6 \cos\varphi_6 = \\ \quad -L_7 \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 + \alpha_2) + L_7 \ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 + \alpha_2) \end{cases} \tag{10}$$

式中 $\ddot{\varphi}_6$ ——杆 GH 角加速度

综上可得点 F 加速度方程为

$$\begin{cases} \ddot{X}_F = -L_1\ddot{\varphi}^2\cos(\varphi_1 + \varphi) - L_1\ddot{\varphi}\sin(\varphi_1 + \varphi) - \\ L_2\ddot{\varphi}_2^2\cos\varphi_2 - L_2\ddot{\varphi}_2\sin\varphi - L_{CF}\ddot{\varphi}_4^2\cos(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) - \\ L_{CF}\ddot{\varphi}_4\sin(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \\ \ddot{Y}_F = -L_1\ddot{\varphi}^2\sin(\varphi_1 + \varphi) + L_1\ddot{\varphi}\cos(\varphi_1 + \varphi) - \\ L_2\ddot{\varphi}_2^2\sin\varphi_2 + L_2\ddot{\varphi}_2\cos\varphi - L_{CF}\ddot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) + \\ L_{CF}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4 - \alpha_3 - \alpha_4) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\ddot{\varphi}$ ——曲柄 AB 和 AG 角加速度

2 机构参数分析与优化

2.1 辅助分析与优化软件开发

由于史蒂芬森型六杆机构设计过程中参数调整存在多个目标函数优化问题,为便于机构参数分析和优化,根据建立的运动学模型基于 Visual Basic 6.0 开发了小株距高密度育苗机构辅助分析软件,其界面如图 4 所示,用户只需输入育苗机构各个构件的相关数据,即可计算并显示育苗机构栽植嘴尖点 F 的运动轨迹,并可以进行绝对运动和相对运动模拟仿真。根据育苗要求和设计目标判断并及时更改机构参数,直至调整出最佳的育苗轨迹。

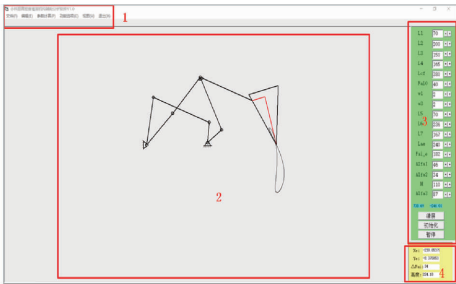


图 4 小株距高密度育苗机构辅助分析软件初始界面

Fig. 4 Initial interface of auxiliary analysis software for small plant spacing and high density seedling planting mechanism

2.2 育苗机构参数对育苗轨迹的影响

由于机构各个参数均会影响育苗轨迹,故调整轨迹时需综合考虑各个参数的影响。本文预先确定一组符合数学模型的参数,再用控制变量法分析各机构参数对育苗轨迹的影响趋势及规律。

图 5 为其他参数不变的情况下,不同长度 L_1 得到不同的育苗轨迹与不同育苗姿态角。不同长度 L_1 分别对应育苗姿态角为 98° 、 91° 、 84° 。由图 5 可得,随着 L_1 的增大,育苗轨迹整体高度变大,相对运动轨迹顶部变圆滑,绝对运动轨迹底部环扣变大,栽植嘴育苗姿态与 X 轴正向夹角变小。

图 6 为其他参数不变的情况下,不同长度 L_2 得

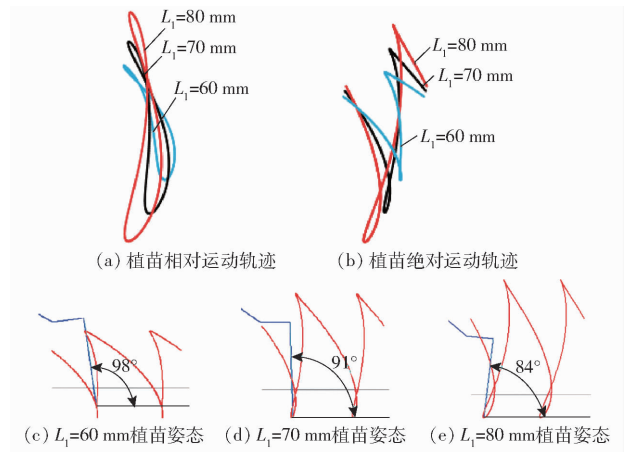


图 5 曲柄 AB 长度 L_1 对轨迹及育苗姿态的影响

Fig. 5 Effects of crank AB length L_1 on trajectory and seedling posture

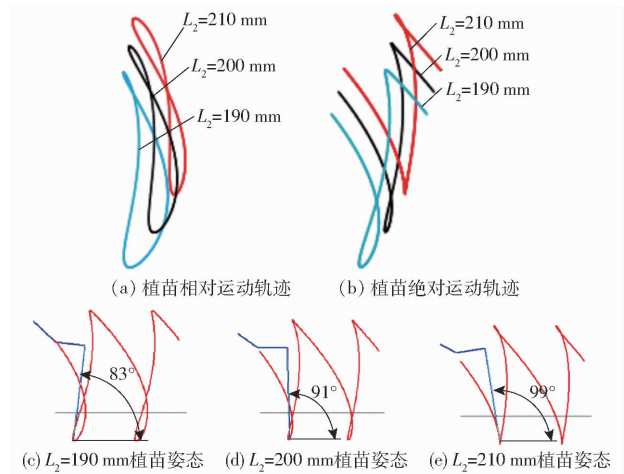


图 6 连杆 BC 长度 L_2 对轨迹及育苗姿态的影响

Fig. 6 Effects of connecting rod BC length L_2 on trajectory and seedling posture

到不同育苗轨迹与不同育苗姿态角。不同长度 L_2 分别对应育苗姿态角为 83° 、 91° 、 99° 。由图 6 可得,随着 L_2 增大,育苗相对运动轨迹整体往右上角偏移,轨迹顶部变圆滑,绝对运动轨迹底部变尖且环扣变小,育苗时栽植嘴与 X 轴正向夹角变大。

图 7 为其他参数不变情况下,不同长度 L_3 得到不同育苗轨迹与不同育苗姿态角。不同长度 L_3 分别对应育苗姿态角为 96° 、 91° 、 84° 。由图 7 可得,随着 L_3 的增大,相对运动轨迹整体下移,高度变大,顶部变尖,底部变圆滑;绝对运动轨迹底部环扣变大,育苗时栽植嘴与 X 轴正向夹角变小。

图 8 为其他参数不变的情况下,不同长度 L_4 得到大小不一的育苗轨迹与不同育苗姿态角。不同长度 L_4 分别对应育苗姿态角为 97° 、 91° 、 85° 。由图 8 可得,随着 L_4 增大,育苗相对运动轨迹整体下移,轨迹顶部变尖,高度变大,底部变圆滑,绝对运动轨迹底部环扣变大,育苗时栽植嘴与 X 轴夹角变小。

图 9 为其他参数数据不变的情况下,不同长度

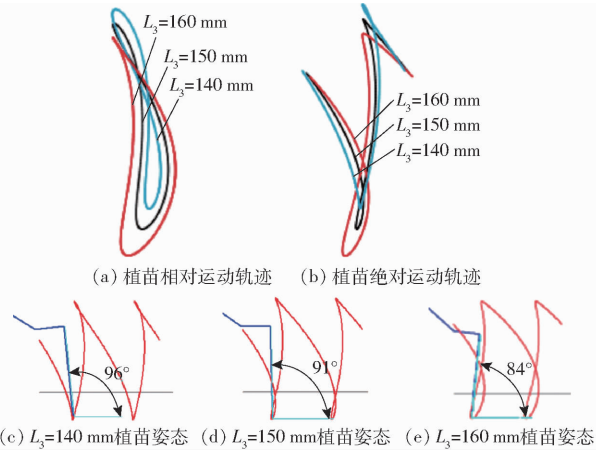


图 7 摇杆 DE 长度 L_3 对轨迹的影响

Fig. 7 Effects of rocker DE length L_3 on trajectory and seedling posture

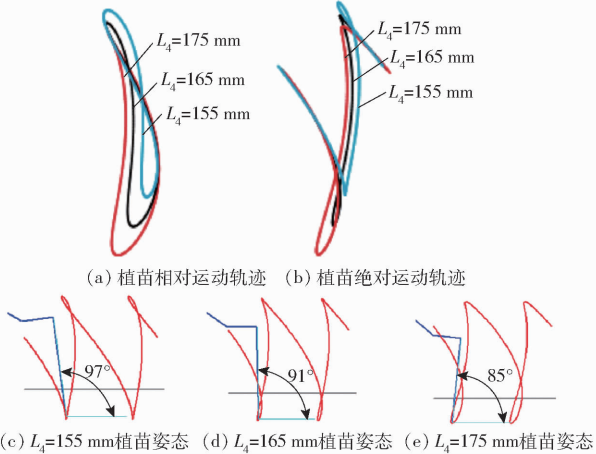


图 8 连杆 CD 长度 L_4 对植苗轨迹及植苗姿态的影响

Fig. 8 Effects of connecting rod CD length L_4 on trajectory and seedling posture

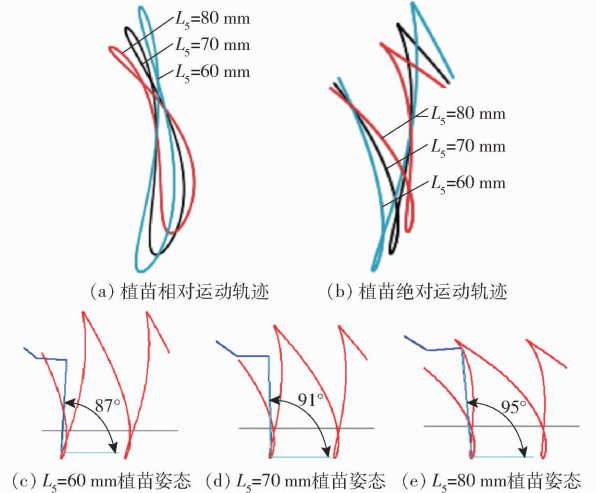


图 9 曲柄 AG 长度 L_5 对植苗轨迹及姿态的影响

Fig. 9 Effects of crank AG length L_5 on seedling trajectory and posture

L_5 得到不同的植苗轨迹与不同植苗姿态角。不同长度 L_5 分别对应植苗姿态角为 87° 、 91° 、 95° 。由图 9 可得,随着 L_5 的增大,植苗相对运动轨迹高度变小,

轨迹整体向后倾斜,底部变圆滑,绝对运动轨迹底部环扣变大,植苗时栽植嘴与 X 轴正向夹角变大。

图 10 为其他参数不变的情况下,不同长度 L_6 得到不同植苗轨迹与不同植苗姿态角。不同长度 L_6 分别对应植苗姿态角为 96° 、 91° 、 87° 。由图 10 可得,随着 L_6 的增大,植苗相对运动轨迹向左下方偏移,高度变大,顶部变尖,底部变圆滑,绝对运动轨迹底部环扣变大,植苗时栽植嘴与 X 轴正向夹角变小。

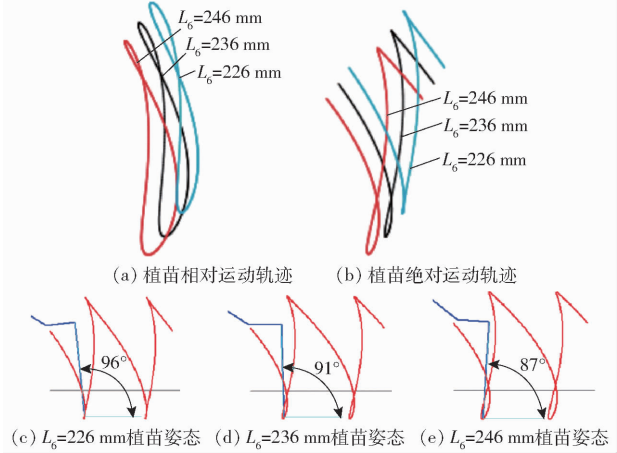


图 10 连杆 GH 长度 L_6 对植苗轨迹及植苗姿态的影响

Fig. 10 Effects of length L_6 of connecting rod GH on seedling trajectory and seedling posture

图 11 为其他参数数据不变的情况下,不同长度 L_7 得到不同的植苗轨迹与不同植苗姿态角。不同长度 L_7 分别对应植苗姿态角为 89° 、 91° 、 92° 。由图 11 可得,随着 L_7 的增大,植苗相对运动轨迹整体上移,轨迹高度变大,顶部变圆滑,底部变尖,绝对运动轨迹环扣变小,栽植嘴姿态与 X 轴正向夹角变大。

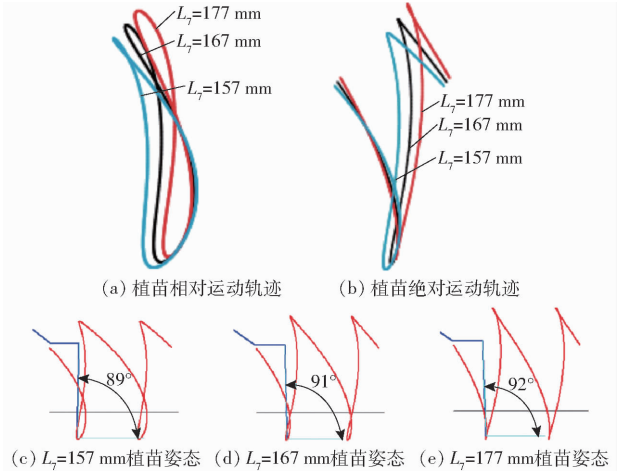


图 11 摇杆 EH 长度 L_7 对植苗轨迹及植苗姿态的影响

Fig. 11 Effects of rocker EH length L_7 on trajectory and seedling posture

针对小青菜这类小株距种植的蔬菜,小株距高密度植苗机构的株距行距均为 110 mm,机构作业栽

植深度至少 60 mm。育苗机构整机移栽速度约 300 株/min,在设计过程中,需要考虑轨迹及姿态的设计范围,设计要求如下:育苗机构移栽的蔬菜秧苗高度为 100 ~ 120 mm。为满足前后开合栽植嘴不伤苗的要求,育苗机构的轨迹高度应大于 220 mm。为使育苗机构合格进行育苗,即机构与地面形成相对零速度带,在育苗绝对运动轨迹最低处需形成一个高度约 60 mm 的环扣。育苗时栽植嘴姿态要求尽可能垂直于地面。在辅助分析软件输入理想参数: $L_1 = 70\text{ mm}$ 、 $L_2 = 200\text{ mm}$ 、 $L_3 = 150\text{ mm}$ 、 $L_4 = 150\text{ mm}$ 、 $L_5 = 70\text{ mm}$ 、 $L_6 = 236\text{ mm}$ 、 $L_7 = 167\text{ mm}$ 。此时育苗株距为 110 mm,图 12 为此参数下的栽植嘴姿态,此时栽植嘴姿态角为 91° ,栽植嘴在育苗位置的姿态近乎垂直于地面,且育苗轨迹底部环扣足够小,满足小株距育苗设计要求。

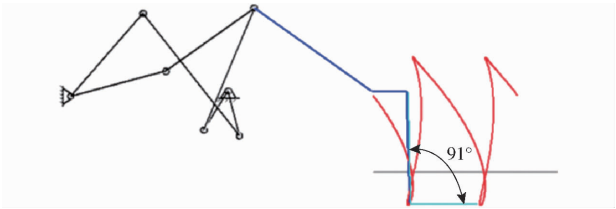


图 12 优化后的栽植嘴姿态

Fig. 12 Optimized planting mouth posture

图 13 为最终参数下的相对运动轨迹及绝对运动轨迹。

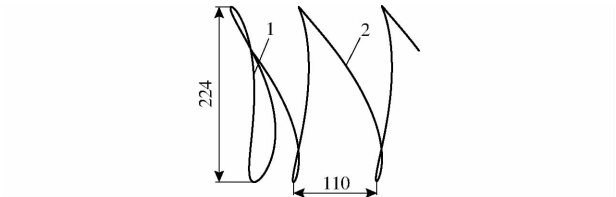


图 13 优化后的育苗理论轨迹示意图

Fig. 13 Optimized seedling trajectory schematic of seedling planting track

1. 相对运动轨迹 2. 绝对运动轨迹

3 小株距高密度育苗机构结构设计

3.1 整体结构设计

设计的小株距高密度育苗机构如图 14 所示。为满足小株距高密度移栽要求,整个育苗机构由左右两侧对称布置的史蒂芬森型六杆机构与一组 8 个栽植嘴部件组成,8 个育苗栽植嘴部件排列于左右史蒂芬森型六杆机构之间并通过转动板连接。由于 8 个栽植嘴相互固接并同步运动,故运动轨迹一致,育苗机构栽植嘴行距设置为 110 mm,并通过优化杆件尺寸实现株距为 110 mm。本文只分析单个栽植嘴及单套史蒂芬森型六杆机构。

其中单侧育苗机构由 1 组四杆机构和 1 组五杆

机构复合而成的史蒂芬森型六杆机构、育苗栽植嘴、凸轮、凸轮摆杆等组成,如图 15 所示。

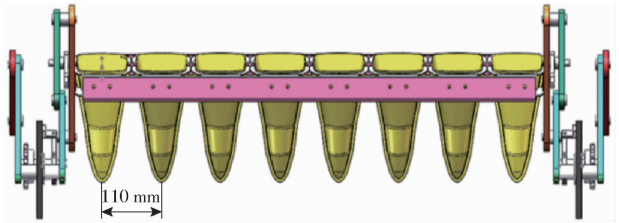


图 14 育苗机构整体设计图

Fig. 14 Overall design of seedling planting mechanism

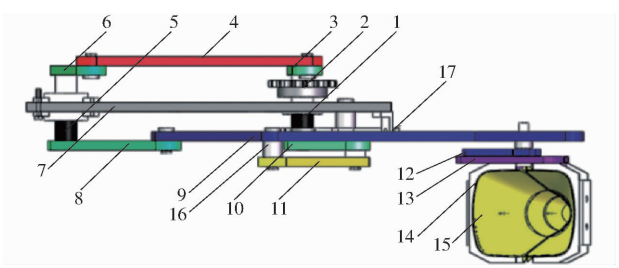


图 15 育苗机构结构图

Fig. 15 Structure diagram of seedling planting mechanism

1. 曲柄轴 2. 链轮 3. 曲柄 4. 连杆 5. 转轴 6. 摇杆 7. 机架板 8. 摇杆 9. 连杆 10. 曲柄 11. 连杆 12. 开口后杆 13. 开口前杆 14. 栽植嘴支架板 15. 栽植嘴 16. 凸轮 17. 凸轮摆杆

3.2 育苗机构凸轮设计

通过图解法^[23]设计育苗机构所需凸轮的轮廓线,如图 16 所示,栽植嘴从开始育苗到育苗完全结束,凸轮处于推程状态,推程角为 70° ;育苗结束到栽植嘴上升至安全高度,凸轮保持远休止状态,此时栽植嘴保持完全张开,远休止角为 80° ;之后凸轮进入回程状态,回程运动角为 35° ;栽植嘴接苗到栽植嘴开始育苗,栽植嘴保持闭合,凸轮处于近休止状态,近休止角为 175° 。图 17 为凸轮设计图。

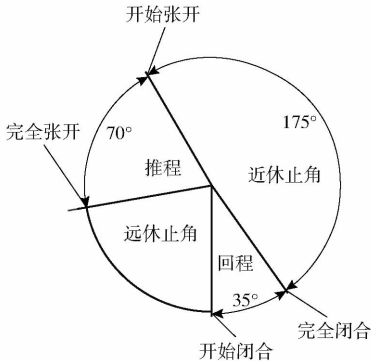


图 16 凸轮转角位置图

Fig. 16 Position of cam angle

4 仿真与试验

4.1 育苗机构虚拟样机仿真

基于 ADAMS 仿真软件对单个小株距高密度植

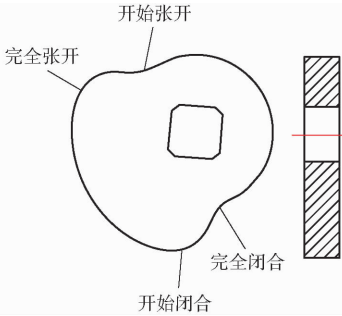


图 17 凸轮设计图

Fig. 17 Cam design

苗机构进行运动学和动力学仿真^[24],由仿真软件获得绝对运动轨迹,设置平移驱动力速度为 110 mm/s,使得机构在自身运动的同时与地面做相对运动,如图 18 所示。仿真动轨迹与理论轨迹(图 12)对比如图 19 所示,理论轨迹与仿真轨迹接近,从而验证了植苗机构结构设计的正确性。

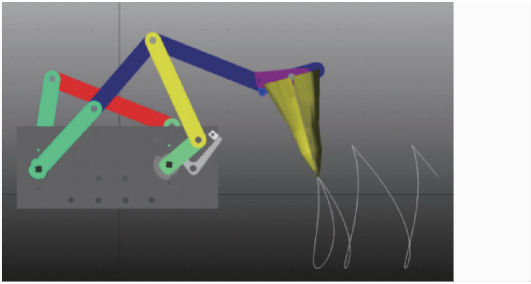


图 18 植苗仿真轨迹图

Fig. 18 Simulation track of seedling planting

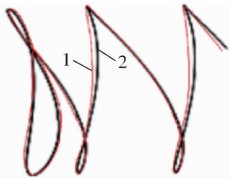


图 19 植苗理论轨迹与仿真轨迹对比

Fig. 19 Comparison diagram of theoretical and simulation tracks of seedling planting

1. 理论轨迹 2. 仿真轨迹

由图 20a 可知,栽植嘴在一个运动周期内做往复运动, X 方向位移先匀速上升,再匀速下降,中间接近水平,后又匀速反方向上升,再匀速下降,符合理论计算的轨迹;由图 20b 可知, Y 方向位移最高点与最低点间高度差约为 225 mm,与前文提到的理论轨迹高度 224 mm 接近,从而验证了机构的正确性。

由图 21a 可知, X 方向速度曲线在 0.2 ~ 0.3 s 速度为零与水平线有交点,由于栽植嘴与连杆 4 一起运动,此时栽植嘴处于水平最远端且相对于机架水平方向的速度为 0。由图 21b 可知,在同一时间间隔内速度为 0 与水平线也有一个交点,说明此时栽植嘴尖点 F 相对于机架竖直方向的速度也为 0。故在该时间范围内,可以实现零速度植苗。

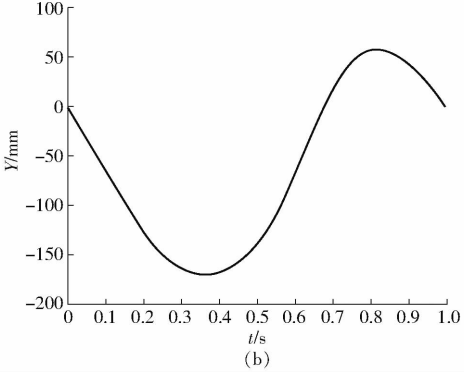
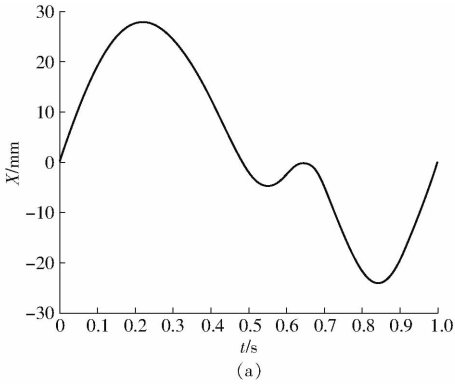


图 20 栽植嘴尖点 F 位移曲线

Fig. 20 Displacement curves of tip F of planting mouth

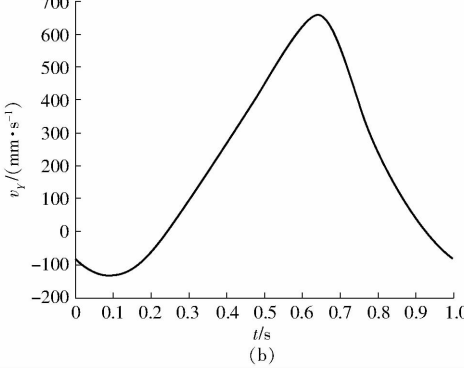
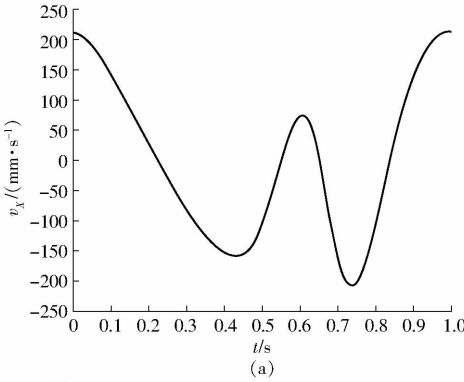


图 21 栽植嘴尖点 F 速度曲线

Fig. 21 F speed curves of planting tip

4.2 植苗机构空转试验

在单侧试验台进行植苗机构空转试验^[25]得到实际植苗轨迹,如图 22 所示,与图 19 中理论轨迹和仿真轨迹基本一致,图 23 为植苗机构在接苗位置时栽植嘴姿态角。图 24 为植苗机构在植苗位置时栽

植嘴姿态角,角度接近 90° 且栽植嘴姿态较好,能保证植苗后钵苗直立度。图 25 为植苗机构栽植嘴开口测量示意图,栽植嘴开口为 $60 \sim 70 \text{ mm}$,符合设计要求。

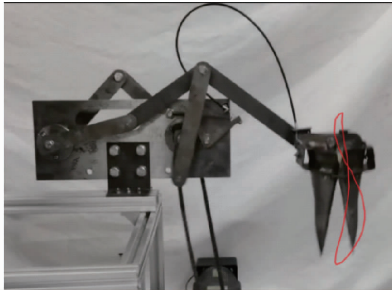


图 22 植苗机构实际植苗轨迹

Fig. 22 Actual trajectory of seeding planting mechanism

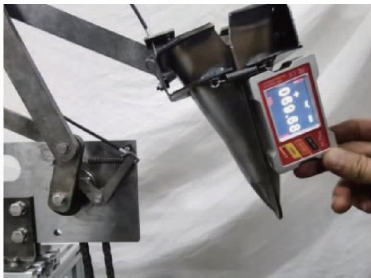


图 23 植苗机构接苗位置时角度测量

Fig. 23 Angle measurement of seeding position in seeding planting mechanism

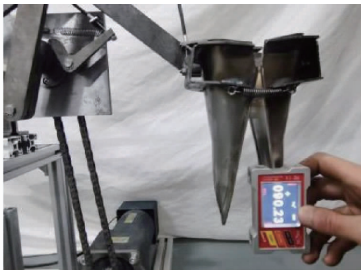


图 24 植苗机构植苗位置时角度测量

Fig. 24 Angle measurement of seeding planting position of seeding planting mechanism

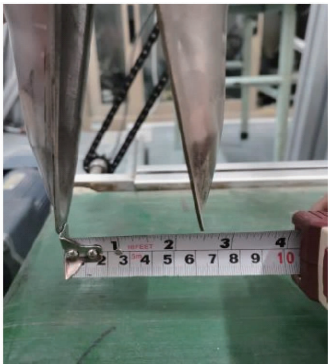


图 25 栽植嘴开口测量

Fig. 25 Measurement of opening size of planting mouth

4.3 植苗试验

在完成空转试验后进行了小株距高密度植苗机

构植苗试验,植苗试验搭建了简易方形土槽试验台^[26],试验台将方形土槽放置在传送带上,通过传送带的速度与植苗机构转速配合,即植苗机构不移动,土槽随着传送带移动,模拟田间的植苗情况^[27]。试验将钵苗盘放置在方便拾取的位置,确保试验过程中可以顺利完成取苗和投苗^[28]。且需随时观察机构的运动状态。图 26a 为栽植嘴持苗阶段姿态,图 26b 为栽植嘴入土阶段姿态,图 26c 为栽植嘴完全张开时姿态,图 26d 为栽植嘴植苗后秧苗姿态,从图 26d 可以看出,植苗后的秧苗具有较好的直立度且穴口较小。



图 26 鸭嘴栽植姿态

Fig. 26 Planting arm seedling posture

图 27a 为土槽试验平台,图 27b 为植苗机构在土槽中的植苗效果,可以看出,土槽中植苗后秧苗距离较均匀且穴口较小,为验证植苗机构株距是否符合设计要求,在植苗作业完成后对钵苗株距进行测量,由图 27c 可以看出,土槽中植苗后秧苗距离较均匀且穴

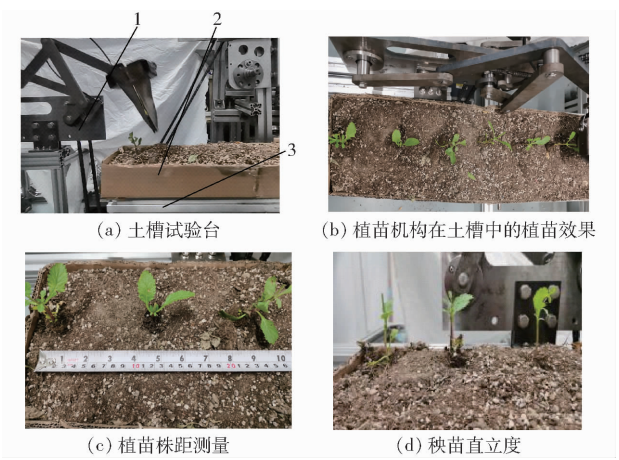


图 27 植苗机构试验

Fig. 27 Effect diagrams of soil tank test of seedling planting

1. 植苗机构 2. 方形土槽 3. 传送带

口较小,测量秧苗株距在 110 mm 左右,由图 27d 可以看出,秧苗直立性较好,符合植苗机构的设计要求,从而验证了植苗机构设计的正确性与可行性。

本植苗试验分别设置转速 20 ~ 40 r/min,在植苗试验前,记录每个转速下的钵苗总数。旱地蔬菜栽植主要性能指标包括漏栽率、重栽率、倒伏率、埋苗率、露苗率、伤苗率,植苗过程中,出现漏栽、重栽、倒伏、埋苗、露苗、伤苗均记为植苗失败。其他记合格植苗。植苗试验结束后,根据记录钵苗总数以及植苗失败数,计算出植苗试验合格数和合格率,结果如表 1 所示。

表 1 试验数据
Tab.1 Test data

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	钵苗总数/ 株	失败数/ 株	合格数/ 株	合格率/ %
20	128	9	119	92.9
30	128	11	117	91.4
40	128	12	116	90.6

从表 1 可以看出,在不同转速下的植苗合格率均不小于 90.6%,植苗平均合格率达到 91.7%,验证了小株距高密度植苗机构的可行性以及实用性。

由植苗机构植苗试验可得植苗失败的原因为:钵苗部分根系较少,未形成正常的土钵形状,在钵苗入土的时候,钵苗容易歪倒造成植苗失败。由于钵苗高度并不完全统一,带苗现象较多,导致在相同栽植嘴闭合高度,栽植嘴还未完全离开钵苗,降低了植苗合格率。栽植嘴弹簧力度不够,使得栽植嘴不能完全闭合,导致钵苗有可能在未到达植苗点就掉落。

提出对应的解决方案:在钵苗育苗阶段应严格控制合适的钵苗含水率,以保证钵苗基质成型稳定。通过修改植苗凸轮回程角,实现在凸轮回程阶段栽植嘴闭合高度抬高,栽植嘴张开时间延长,避免带苗现象从而提高植苗合格率。选用合适强度弹簧以控制栽植嘴闭合,使得栽植嘴在植苗凸轮推程阶段能够完全闭合,避免钵苗在未到达植苗点掉落现象的出现。

5 结论

(1)针对小株距蔬菜的高密度种植特点,提出了一种小株距高密度蔬菜植苗机构,以解决现有植苗机构用于小株距蔬菜移栽时出现的轨迹不合理、穴口太大及秧苗直立性效果差等问题。

(2)建立了植苗机构运动学模型,对各点的位移、速度及加速度进行了理论分析;并基于 Visual Basic 6.0 开发了植苗机构辅助分析软件,通过人机交互的方式对植苗机构进行参数优化,以得到满意的参数。

(3)对植苗机构进行了结构设计、虚拟仿真与空转试验,将理论轨迹、仿真轨迹和实际轨迹进行对比,三者轨迹基本一致,验证了该植苗机构的设计合理性。

(4)在转速 20 ~ 40 r/min 下进行植苗试验时,植苗平均合格率达到 91.7%,移栽后钵苗株距控制在 110 mm 左右,直立度接近于 90°,满足小株距高密度密植移栽要求,验证了该植苗机构具有较高的可行性和实用性。

参 考 文 献

[1] 周梅芳,俞高红,赵匀,等.椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗取苗机构的参数优化与试验[J].农业工程学报,2014,30(18): 13-21.
ZHOU Meifang, YU Gaohong, ZHAO Yun, et al. Parameter optimization and test on pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears for vegetable plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 13-21. (in Chinese)

[2] 刘存祥,李晓虎,岳修满,等.我国旱地移栽机的现状与发展趋势[J].农机化研究,2012,37(6): 249-252.
LIU Cunxiang, LI Xiaohu, YUE Xiuman, et al. Current situation and development trend of dry land transplanters in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 37(6): 249-252. (in Chinese)

[3] 辛竹琳,崔彦娟,杨小微,等.全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J].分子植物育种,2022,20(9): 3122-3132.
XIN Zhulin, CUI Yanjuan, YANG Xiaowei, et al. Current situation of global vegetable industry and research progress of vegetable breeding development path in China[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(9): 3122-3132. (in Chinese)

[4] 丁海凤,范建光,贾长才,等.我国蔬菜种业发展现状与趋势[J].中国蔬菜,2020(9): 1-8.
DING Haifeng, FAN Jianguang, JIA Changcai, et al. Development status and trend of vegetable seed industry in China[J]. Chinese Vegetables, 2020(9): 1-8. (in Chinese)

[5] 高芳,李洪昌.蔬菜机械化生产对秧苗植苗质量的影响研究[J].农机化研究,2018,40(12): 125-129.
GAO Fang, LI Hongchang. Research on the impact of vegetable mechanization on seedling quality[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 125-129. (in Chinese)

[6] 周福君,芦杰,杜佳兴.玉米钵苗移栽机圆盘式植苗机构参数优化及试验[J].农业工程学报,2014,30(1): 18-24.
ZHOU Fujun, LU Jie, DU Jiaxing. Parameter optimization and experiment of disc-type planting mechanism for corn bowl seedling

- transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 18–24. (in Chinese)
- [7] TATSUYA K, KOHNOSUKE T, MUNKEI T, et al. Developement of zigzag planting mechanism for rice transplanter [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1999, 61(1): 179–185.
- [8] BREWER H L. Conceptual modeling automated seeding transfer from growing trays to shipping modulus[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1043–1051.
- [9] HASSAN A E, HADDOCK W H. Packing of pine seedlings using soil failure criteria[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2): 695–698.
- [10] JIN X, LI S J, YANG X J, et al. Developments in research on seedling auto-picking device of vegetable transplanter[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 364: 375–379.
- [11] SATPATHMY S K, GARG I K. Effect of selected parameters on the performance of a semi-automatic vegetable transplanter [J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2008, 39(2): 47–51.
- [12] XUE X, LI L, XU C, et al. Optimized design and experiment of a fully automated potted cotton seedling transplanting mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 111–117.
- [13] BAE K Y, YANG Y S. Design of a non-circular planetary-gear-train system to generate an optimal trajectory in a rice transplanter[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(4): 361–372.
- [14] 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.
- CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Kinematic modeling and analysis of seedling planting mechanism of elliptic gear planetary system of pot seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 6–12. (in Chinese)
- [15] 陈建能, 黄前泽, 王英, 等. 钵苗移栽机非圆齿轮行星轮系植苗机构参数分析与反求[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 18–26.
- CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Parametric analysis and inversion of transplanting mechanism with planetary non-circular gears for potted-seedling transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 18–26. (in Chinese)
- [16] 迟明路, 李旭英, 田阳, 等. 吊杯式移栽机植苗株距调节的研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(2): 131–134.
- CHI Minglu, LI Xuying, TIAN Yang, et al. A study on the adjustment of the planting distance of the hanging cup transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 131–134. (in Chinese)
- [17] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 78–86.
- HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimal design and experiment of planetary gear planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 78–86. (in Chinese)
- [18] 俞高红, 廖振飘, 徐乐辉, 等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 38–44.
- YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable pot-seedling planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38–44. (in Chinese)
- [19] 俞高红, 金也, 常数数. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100–108.
- YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100–108. (in Chinese)
- [20] 李鹏斌, 颜华, 王品隆, 等. 移栽机小株距植苗机构杆件优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 72–78.
- LI Pengbin, YAN Hua, WANG Pinlong, et al. Optimization and test of small plant spacing planting mechanism rod for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 72–78. (in Chinese)
- [21] 王洪波, 张开兴, 刘贤喜, 等. 蔬菜移栽机五杆植苗机构的仿真与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 112–116.
- WANG Hongbo, ZHANG Kaixing, LIU Xianxi, et al. Simulation and experiment of five bar planting mechanism of vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 112–116. (in Chinese)
- [22] 扈明璐, 刘敏, 汪照, 等. 一种移栽机栽植器凸轮摆杆机构设计与运动学分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 85–90.
- HU Minglu, LIU Min, WANG Zhao, et al. Design and kinematic analysis of a cam rocker mechanism of a transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 85–90. (in Chinese)
- [23] 孙良, 郑广辉, 叶治政, 等. 基于图论的多杆式栽植机构构型综合与方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 67–74.
- SUN Liang, ZHENG Guanghui, YE Zhizheng, et al. Structural synthesis and innovative design of multi-link planting mechanism based on graph theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 67–74. (in Chinese)
- [24] 尹文庆, 刘海马, 胡飞, 等. 旱地植苗机八连杆植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 51–60.
- YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimal design and experiment of eight link planting mechanism of dryland planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51–60. (in Chinese)
- [25] 徐乐辉. 大株距旋转式行星轮系蔬菜钵苗植苗机构的优化设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- XU Lehui. Optimization design and experiment of vegetable pot seedling planting mechanism with large plant spacing rotating planetary gear train[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015. (in Chinese)

[27] 王进华,王泽群,贾晶霞,等. 饲料收获机矮秆割台拨禾轮导轨运动轨迹研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):152-155.
WANG Jinhua, WANG Zequn, JIA Jingxia, et al. Guide rail trajectory of mower table reel device for silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):152-155. (in Chinese)

[28] 刘巍,黄小毛,马丽娜,等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):83-88,135.
LIU Wei, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):83-88,135. (in Chinese)

[29] 李海同,吴崇友,沐森林,等. 基于 ANSYS-ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报,2020,36(14):96-105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(14):96-105. (in Chinese)

[30] 吴崇友,王积军,廖庆喜,等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):124-131.
WU Chongyou, WANG Jijun, LIAO Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(1):124-131. (in Chinese)

[31] 丁宁,李海涛,闫安,等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):196-202,290.
DING Ning, LI Haitao, YAN An, et al. Optimization and experiment on straw multi-stage continuous cold roll forming for molding parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 196-202,290. (in Chinese)

[32] 王伯凯,张鹏,曹明珠,等. 花生捡拾收获机秧蔓输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):126-137.
WANG Bokai, ZHANG Peng, CAO Mingzhu, et al. Design and experiment of pneumatic conveying device for seedlings of peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):126-137. (in Chinese)

(上接第 105 页)

[26] 王永维,何焯亮,王俊,等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机植苗性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):19-25.
WANG Yongwei, HE Zhuoliang, WANG Jun, et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):19-25. (in Chinese)

[27] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等. 高速变姿态接苗栽植嘴式植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):65-72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):65-72. (in Chinese)

[28] 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)