

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.12.011

蔬菜移栽机曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置研究

袁挺 张宇 尹金亮 汪瀚 张志芹 谭豫之
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了实现蔬菜移栽机取投苗的稳定性和高效性,针对夹钵取投苗方式,设计了一种全自动曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置。取投苗装置与送盘装置、导苗装置及分苗装置配合完成自主送盘、取苗、投苗与分苗。用解析法对取投苗装置中的摆杆-导轨及曲柄摇杆进行了结构参数设计,用矢量方程法和 ADAMS 仿真对取投苗装置的运动过程进行计算分析,并利用高速摄像机拍摄取投苗装置的实际运动轨迹,与仿真结果进行对比,验证了设计的正确性和可行性。以辣椒钵苗为试验对象,选取取投苗速度、苗株高度及基质含水率为试验因素,以取苗成功率、伤苗率、投苗成功率及取栽成功率为评价指标进行正交试验。试验结果表明:在给定的因素水平下,整机单行取投苗速度 90 株/min、苗株高度 110 mm、基质含水率 50% 时,取投苗效果最佳,取苗成功率为 95.14%,伤苗率为 1.39%,投苗成功率 93.05%,取栽成功率 91.67%。

关键词: 蔬菜移栽机; 辣椒钵苗; 曲柄摇杆-导轨; 取投苗装置

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0116-10 OSID: 

Study on Seedling Taking and Throwing Device Based on Combined Struture of Crank Rocker and Guide Rail for Vegetable Transplanter

YUAN Ting ZHANG Yu YIN Jinliang WANG Han ZHANG Zhiqin TAN Yuzhi
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the stability and high efficiency of seedling taking and throwing of vegetable transplanter, a fully automatic seedling taking and throwing device based on a combined struture of crank rocker and guide rail was designed according to the seedling taking and throwing mode of bowl. The seedling taking and feeding device cooperated with the tray feeding device, seedling guiding device and seedling sorting device to complete the independent tray feeding, seedling taking, seedling throwing and seedling sorting. The structural parameters of rocker – rail and crank rocker in seedling feeding device were designed by analytic method, and the movement process of seedling feeding device was calculated and analyzed by vector equation method and ADAMS simulation, and the actual movement track of seedling feeding device taken by high-speed camera was compared with simulation result, which verified the correctness and feasibility of the design. Taking pepper bowl seedling as test object, seedling speed, plant height and matrix moisture content were selected as test factors, and orthogonal test was carried out with seedling success rate, seedling injury rate, seedling throwing success rate and success rate of planting as evaluation indexes. The results of the experiment showed that under the given factor level, when the single row of the whole machine seedling taking and throwing speed was 90 plants/min, the seedling height was 110 mm and the matrix moisture content was 50%, the seedling picking and throwing effect was the best. The seedling taking success rate was 95.14%, the damage seedling rate was 1.39%, the seedling throwing success rate was 93.05% and the success rate of planting was 91.67%.

Key words: vegetable transplanter; pepper seedling; crank rocker and guide rail; seedling taking and throwing device

0 引言

随着现代农业的发展,辣椒等经济型作物占我国蔬菜的种植比重逐渐增加,成为农民增收的重要途径。蔬菜钵苗育苗产业发展迅速,但钵苗移栽仍以人工及半自动移栽为主,劳动强度高、作业效率低、机械化程度不高,不利于规范化管理,不能满足现代蔬菜产业发展的需求^[1]。半自动移栽机缺少取投苗装置,不能实现钵苗的全自动移栽作业,所以蔬菜钵苗全自动移栽机的研究关键在于取投苗装置^[2]。

发达国家研制的取投苗装置较为成熟。欧美研制机型偏大型化及电气液化,日韩研制机型偏小型化及纯机械化^[3-4]。意大利 Ferrari 公司设计了一种顶夹结合式取苗装置,电气液结合驱动,取苗效率高,伤苗率低,作业规模大,但引进国内后出现堵苗现象,且只适用于硬质泡沫苗盘^[5]。日本井关农机株式会社研制了一种两针机械手回转取苗装置,纯机械结构,利用内部行星齿轮运动及半齿轮的间歇停顿特性与外部轨槽滑道复合形成特定取苗轨迹,结构紧凑,性能稳定,但机构复杂,轨槽滑道易磨损^[6-7]。国内对取投苗装置的研究取得了长足的进展^[8],提出了顶出式、迎苗夹取(主茎或基质)式、顶出夹取式及气力式^[9]等取苗方式^[10]。刘念聪等^[11]提出了全自动单摆式蔬菜钵苗取喂苗系统,该装置机构紧凑,对苗适应性好,取苗成功率高。谢守勇等^[12]提出了一种斜插夹钵式取苗装置,该装置结构简单,动作连贯,但主动杆转速不易过高。倪有亮等^[13]设计了纵/横向移盘机构、顶夹式取苗机构等,完成钵苗的隔穴顶出和夹取,但该机构取苗中使送盘装置平移需要较大动力。王蒙蒙等^[14]提出了一种曲柄摇杆式取苗机构,对苗盘的适应性强,伤苗率低,但需将苗顶出后再夹取。俞高红团队^[15-17]提出一种回转式蔬菜钵苗取苗机构,该机构复合了一个或两个以上相同的取苗机构,利用不完全共轭变性椭圆齿轮,配合齿轮箱其他零件,可实现一种特殊的非匀速间歇运动,实现高速取苗,但部分零件结构复杂。现有取投苗装置存在结构复杂、机构间协作性要求高等问题。

本文结合以上分析,提出一种结构简单、取投苗动作连贯、动力要求小及取投苗轨迹简单的全自动曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置。以取投苗位置为参数要求,通过理论研究和仿真分析,进行取投苗装置设计和参数优化,结合样机试验和相关分析,以期获得一种结构合理、取投苗性能优稳快、使用方便的全自动取投苗装置,为蔬菜钵苗移栽机的全自动

化提供技术支撑。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置安装在自制的试验平台上,如图 1 所示。试验平台主要由分苗装置、导苗装置、送盘装置、取投苗装置与机架等部分组成。穴盘倾斜放置到送盘装置上,取投苗装置与送盘装置配合完成取苗作业,与导苗装置及分苗装置协调完成投苗作业。取投苗装置主要由曲柄摇杆-导轨机构、取苗横向移位机构及 6 个取苗爪等组成,具体结构如图 2 所示。取苗爪结构如图 3 所示。

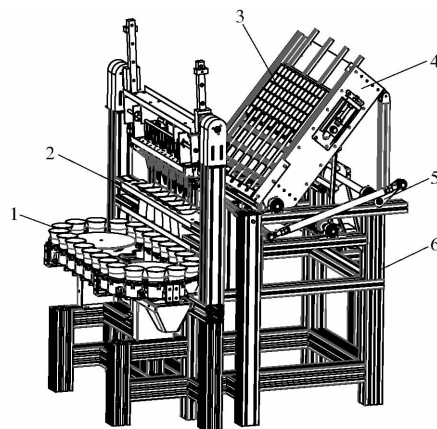


图 1 试验平台结构图

Fig. 1 Structure diagram of test platform

1. 分苗装置 2. 导苗装置 3. 苗盘 4. 送盘装置 5. 取投苗装置 6. 机架

1.2 工作过程及工作原理

取投苗试验平台的作业流程如图 4 所示。送盘装置依次将每行穴盘苗送至取苗位。取苗爪在初始位置是张开状态。取苗步进电机通过主动曲柄带动从动摇杆连续前后往复摆动。取苗爪的轨迹是由直线导轨轨道在从动摇杆摆动拉动下的直线运动和直线导轨轨道随导轨滑块以 T 型轴轴心为圆心的圆周转动复合而成,如图 5 所示,曲柄摇杆-导轨机构即可同时带动成排 6 个取苗爪完成运动至取苗点、插入基质、取出钵苗、运送钵苗及运动至投苗点等一系列连贯动作,不需添加辅助机构。取苗时,从动摇杆向后摆动,当取苗爪的末端与苗盘上表面即将接触时,取苗气缸回缩,取苗爪开始收紧逐渐抓入钵苗基质约 30 mm 深,完成整排钵苗的半排间隔抓苗^[2,18];在主动曲柄的连续带动下,从动摇杆向前摆动至前极限位置,将钵苗拔出穴盘送至导苗装置正上方,取苗气缸伸出带动苗针架推苗、完成投苗。随后横移气缸回缩带动取苗爪向右平移一个穴盘位完成整排取投苗。分苗装置转动,依次将钵苗落入栽

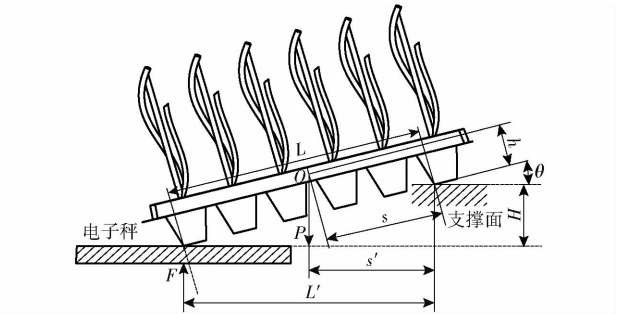


图 7 重心确定受力分析图

Fig. 7 Force analysis diagram for center of gravity determination

根据辣椒苗高度与试验基质含水率的不同,可得出不同情况下的支撑力 F 与 P 值。因为此时穴苗盘是平衡的,使用结构静力学理论,计算得出 h 取值范围为 30.15 ~ 69.25 mm。

在倾斜的送盘装置上放置苗盘时,操作要求是将苗盘的最下面的穴盘格卡在仿形杆上,其受力分析如图 8 所示,穴苗盘随着送盘装置倾斜角 β 增大只产生绕着支撑点 A 的转动而不产生滑动。

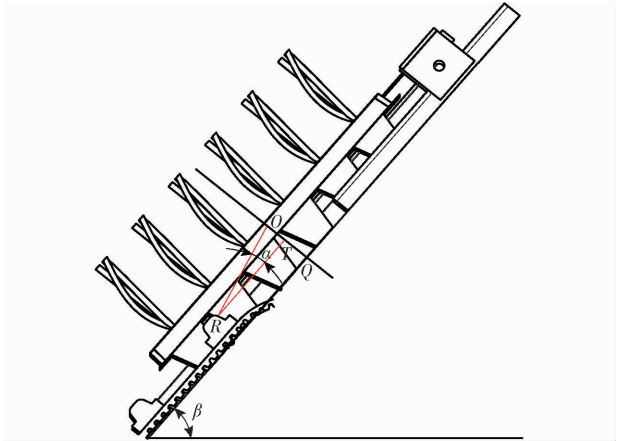


图 8 苗盘放置示意图

Fig. 8 Schematic of seedling tray placement

如图 8 所示, $h = l_{OQ}$, l_{TQ} 和 l_{RT} 已知, l_{RT} 垂直 l_{OQ} 于 T , 由三角形相关定理计算可得 $\alpha = 31.25^\circ$, 若要保证苗盘不绕点 R 旋转倾覆, 则 OR 不能与水平面垂直, 则 $\beta < 58.75^\circ$ 。为防止钵苗脱落, 需 $\beta < 75.3^\circ$ ^[1]。综上, β 取 50° 。

2.2 取投苗装置结构设计

若仅采用曲柄摇杆机构进行取投苗时,则需要顶苗机构的辅助^[14]。当取苗末端在取苗点垂直穴盘且近似直线运动夹取钵苗时具有较好的取苗效果;当钵苗处于竖直状态时具有较好的投苗效果^[20-21]。根据上述取苗轨迹的设计要求,提出曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置,主要由摇杆-导轨部件及曲柄摇杆部件等组成。

2.2.1 摇杆-导轨部件结构设计

如图 9 所示,取投苗时, DE 带动 FEG 进行运

动。取苗时,为了减小取苗末端对钵苗基质的损伤,此时点 E 的速度必须垂直于穴苗盘表面,且不能有其它方向的分量,故此时 FE 与 DE 垂直,即 $\alpha_2 = 90^\circ$ 。从钵苗的运动及分苗装置的布置尺寸考虑,选取 DE 的摆角为 90° ,即 $\varphi = 90^\circ$ 。

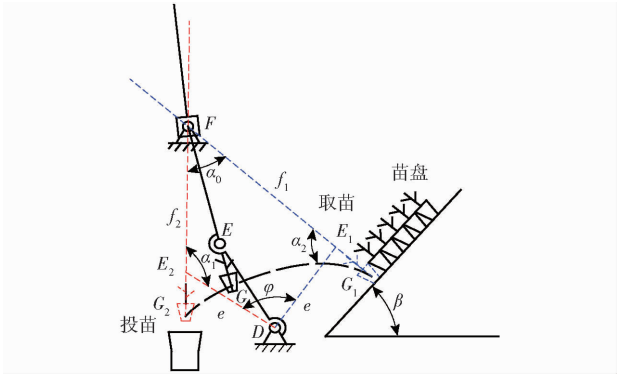


图 9 摇杆-导轨部件结构简图

Fig. 9 Structural diagram of rocker slide rail components

在直角梯形 FE_1DE_2 中有

$$\begin{cases} f_1^2 + e^2 - 2f_1e\cos\alpha_1 = f_1^2 + e^2 \\ f_1^2 + e^2 - 2f_1e\cos\alpha_0 = 2e^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 e ——上摇杆长度, mm
 f_1 、 f_2 ——导轨有效作业长度, mm
 α_1 ——投苗位摇杆和滑轨夹角, ($^\circ$)
 α_0 ——滑轨完成一次取投苗摆动角, ($^\circ$)

基于送盘装置的安装位置及 EG_1 的长度确定上摇杆的长度 e , 分析如下: 取苗时, 作取苗位置穴盘底部中心 K 到固定机架 JL 的垂线 KL 垂直于点 L , 作铰链点 E_1 到机架 JL 的垂线 E_1N 垂直于点 N 。作 NI 垂直 E_1J 于点 I 。如图 10 所示。

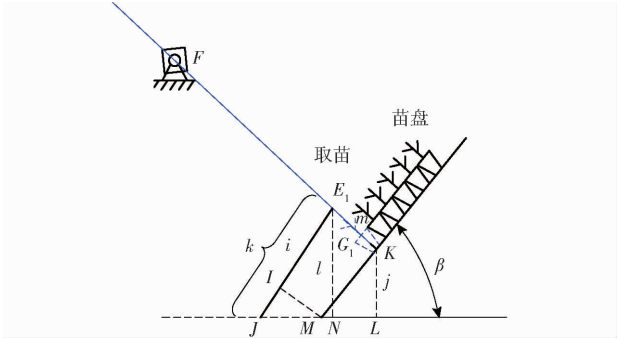


图 10 取苗位置上中摇杆长度分析图

Fig. 10 Length analysis diagram of middle and upper rocker at seedling taking position

运用数学三角函数理论对图 10 进行分析得

$$\begin{cases} i = j/\cos\beta \\ l = j + m\cos\beta \\ k = l/\cos\beta \\ i \leq e \leq k \end{cases} \quad (2)$$

式中 i ——取苗位上的穴盘钵穴底部中心到穴盘

架顶点 M 的直线距离, mm

j ——取苗位上的穴盘钵穴底部中心到机架的垂直距离, mm

k —— E_1J 长度, mm

m ——铰链点 E_1 到取苗位上的穴盘钵穴底部中心的距离, mm

计算可得 $195.2\text{ mm} \leq e \leq 303.7\text{ mm}$ 。考虑到结构的紧凑性, 选择 $e = 210\text{ mm}$ 。将 e 代入式(1)中, 即可求得导轨取苗有效作业长度 $f_1 = 334\text{ mm}$, 导轨投苗有效作业长度 $f_2 = 274\text{ mm}$ 。此时确定了摇杆的固定点 D 和滑轨中滑块的安装位置 F 。

2.2.2 曲柄摇杆部件结构设计

为了使上摇杆的摇动角达到 90° , 并且保证摆动的连续性及控制的简便性, 选择曲柄摇杆机构作为动力机构(图 11)。

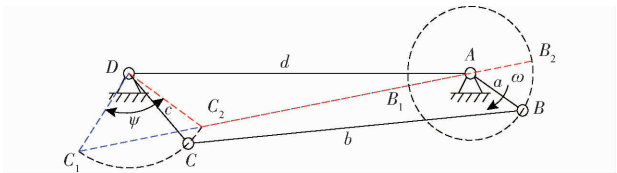


图 11 曲柄摇杆部件结构简图

Fig. 11 Structural diagram of crank rocker components

摇杆 CD 和上摇杆 DE 为刚性连接, 则可以确定摇杆 CD 的摆角为 $\psi = 90^\circ$; 为了缩短末端夹苗距离, 减少对基质的冲击损伤, 故采用无急回特性曲柄摇杆机构^[22], 速度比系数 $K = 1$, 最小传动角为 $\gamma_{\min} = 44^\circ$ 。

在无急回特性曲柄摇杆机构中^[2], 极位夹角等于 0° 。有

$$\begin{cases} a^2 + d^2 = b^2 + c^2 \\ a = c \sin \frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

最小传动角为

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{b^2 + c^2 - (d - a)^2}{2bc} \quad (4)$$

式中 a ——主动曲柄 AB 长度, mm

b ——连杆 BC 长度, mm

c ——从动摇杆 CD 长度, mm

d ——两固定点 A 、 D 之间距离, mm

考虑到机器安装的尺寸布局, 设定 $c = 165\text{ mm}$, 将 $\gamma_{\min} = 44^\circ$ 、 $\psi = 90^\circ$ 代入式(3)、(4), 得到 $a = 116.7\text{ mm}$, $b = 625.8\text{ mm}$, $d = 636.5\text{ mm}$ 。机架与地面平行。

2.3 取投苗装置运动学分析

在取投苗的取苗行程时, 为了保证抓取成功率与减少钵苗基质损伤, 要求在取苗点的速度接近 0; 在接近投苗点时, 为了保证钵苗投苗的稳定性, 水平加速度需接近 0; 在投苗位置, 为了保证钵苗竖直落

入分苗杯, 水平速度和加速度均需接近 0。对取投苗装置进行运动分析, 如图 12 所示。

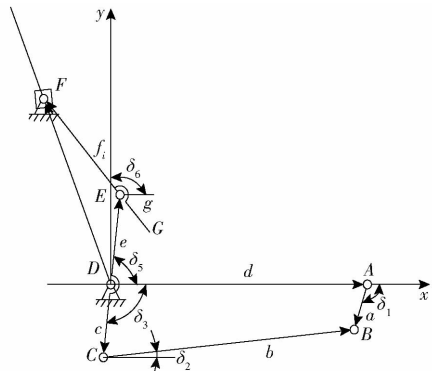


图 12 取投苗装置运动分析

Fig. 12 Motion analysis of seedling taking and feeding device

由图 12 可得曲柄摇杆机构矢量方程为

$$\mathbf{l}_{DA} + \mathbf{l}_{AB} = \mathbf{l}_{DC} + \mathbf{l}_{CB} \quad (5)$$

在 x 轴和 y 轴上的投影为

$$\begin{cases} d + a \cos \delta_1 = c \cos \delta_3 + c \sin \delta_2 \\ a \sin \delta_1 = c \sin \delta_3 + b \sin \delta_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 δ_1 ——主动曲柄 AB 位置角, $(^\circ)$

δ_2 ——连杆 BC 位置角, $(^\circ)$

δ_3 ——从动摇杆 CD 位置角, $(^\circ)$

由式(6)求出滑轨方位角 δ_3 为

$$\delta_3 = 2 \arctan \frac{Y \pm \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X - Z} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} X = -d - a \cos \delta_1 \\ Y = -a \sin \delta_1 \\ Z = \frac{X^2 + Y^2 + c^2 - b^2}{2c} \end{cases} \quad (8)$$

式(6)对时间求导得

$$\begin{cases} a \omega_1 \sin \delta_1 = c \omega_3 \sin \delta_3 + b \omega_2 \sin \delta_2 \\ a \omega_1 \cos \delta_1 = c \omega_3 \cos \delta_3 + b \omega_2 \cos \delta_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 ω_1 ——主动曲柄角速度, rad/s

ω_2 ——连杆角速度, rad/s

ω_3 ——从动摇杆角速度, rad/s

由式(9)求得摇杆角速度 ω_3 和角加速度 a_3 为

$$\omega_3 = \omega_1 \frac{a \sin(\delta_2 - \delta_1)}{c \sin(\delta_2 - \delta_3)} \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{a \sin(\delta_1 - \delta_2) + a \omega_1^2 \cos(\delta_1 - \delta_2)}{c \sin(\delta_3 - \delta_2)} - \frac{b \omega_3^2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2) - c}{c \sin(\delta_3 - \delta_2)} \quad (11)$$

对于摇杆-导轨机构的矢量方程为

$$\mathbf{l}_{DE} + \mathbf{l}_{EF} = \mathbf{l}_{DF} \quad (12)$$

在 x 轴和 y 轴上的投影方程为

$$\begin{cases} e \cos \delta_5 + f_i \cos \delta_6 = x_F \\ e \sin \delta_5 + f_i \sin \delta_6 = y_F \end{cases} \quad (13)$$

式中 δ_5 ——上摇杆 DE 位置角, ($^\circ$)
 δ_6 ——导轨 EF 位置角, ($^\circ$)
 x_F ——旋转点 F 横坐标
 y_F ——旋转点 F 纵坐标
 f_i ——导轨上点 E 、 F 之间距离

由式(13)求出导轨的位置角 δ_6 及 f_i 为

$$\delta_6 = \arctan \frac{y_F - e \sin \delta_5}{x_F - e \cos \delta_5} \tag{14}$$

$$f_i = \sqrt{(x_F - e \cos \delta_5)^2 + (y_F - e \sin \delta_5)^2} \tag{15}$$

其中 $\delta_5 = \pi - \delta_3$ (16)

式(14)对时间求导得导轨的角速度为

$$\omega_6 = \frac{\omega_5 e}{f_i^2} (e - x_F \cos \delta_5 - y_F \sin \delta_5) \tag{17}$$

其中 $\omega_5 = \omega_3$ (18)

式中 ω_5 ——上摇杆角速度, rad/s

ω_6 ——导轨角速度, rad/s

式(17)对时间求导得导轨的角加速度为

$$a_6 = \frac{e}{f_i^2} a_5 (e - x_F \cos \delta_5 - y_F \sin \delta_5) + \frac{e \omega_5^2}{f_i^2} (x_F \sin \delta_5 - y_F \cos \delta_5) \tag{19}$$

由图 12 得到取投苗末端点 G 的坐标为

$$\begin{cases} x_G = e \cos \delta_5 - g \cos \delta_6 \\ y_G = e \sin \delta_5 - g \sin \delta_6 \end{cases} \tag{20}$$

式中 g ——铰链点 E 到取投苗末端终点 G 的长度, mm

则取投苗末端终点 G 的速度和加速度为

$$\begin{cases} v_{Gx} = -e \omega_5 \sin \delta_5 + g \omega_6 \sin \delta_6 \\ v_{Gy} = -e \omega_5 \cos \delta_5 - g \omega_6 \cos \delta_6 \\ v_G = \sqrt{v_{Gx}^2 + v_{Gy}^2} \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} a_{Gx} = -e (a_5 \sin \delta_5 - \omega_5^2 \cos \delta_5) + g (a_6 \sin \delta_6 - \omega_6^2 \cos \delta_6) \\ a_{Gy} = -e (a_5 \cos \delta_5 - \omega_5^2 \sin \delta_5) - g (a_6 \cos \delta_6 - \omega_6^2 \sin \delta_6) \\ a_G = \sqrt{a_{Gx}^2 + a_{Gy}^2} \end{cases} \tag{22}$$

其中 $a_5 = a_3$ (23)

2.4 取投苗装置运动学仿真分析

为了验证取投苗装置是否符合取投苗运动要求, 将取投苗模型导入 ADAMS 中进行虚拟仿真, 对模型各个部件进行质量赋予、重力设置及各个连接点约束设定, 设置起始点为投苗位置, 设置主动曲柄的转速为 15 r/min, 即取苗末端 4 s 完成一次取投苗行程(在 2 s 处进行取苗), 此时整机取投苗速度为 90 株/min, 得到图 13 所示的取投苗末端速度、加速

度曲线。

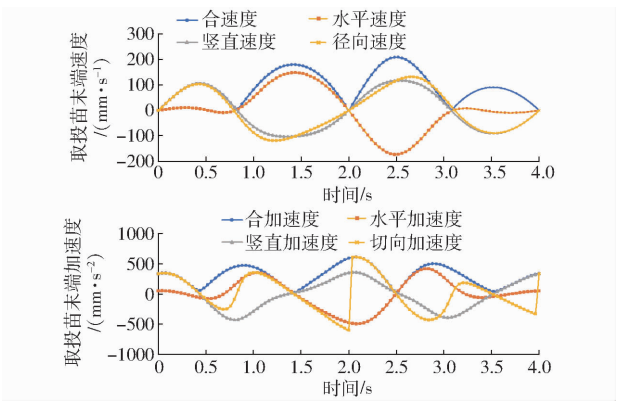


图 13 取投苗末端运动学仿真速度与加速度曲线

Fig. 13 Velocity and acceleration curves of kinematic simulation at end of seedling feeding

如图 13 所示, 取苗速度在取苗点为 0, 有利于取苗成功; 在投苗位置附近, 水平加速度较小, 有利于增大钵苗运输的稳定性^[23]; 在投苗点处, 末端水平速度较小且水平加速度较小, 有利于钵苗竖直投苗精度, 提高投苗成功率; 在取苗处的切向加速度为 0, 但其他各个加速度较大, 这是由曲柄摇杆机构本身的运动特性引起的^[14], 会对基质产生一定的损伤, 需要在试验中对损伤程度进行探究。

3 取投苗轨迹验证

在取投苗装置的设计中, 试验取投苗轨迹是否跟仿真设计轨迹一致, 影响到整个装置的工作性能和作业质量^[24]。将取投苗装置三维模型导入 ADAMS 中虚拟仿真, 选用末端取苗针尖点进行标记追踪, 设置整体取投苗速度为 90 株/min, 得到图 14 所示的取投苗末端运动轨迹。

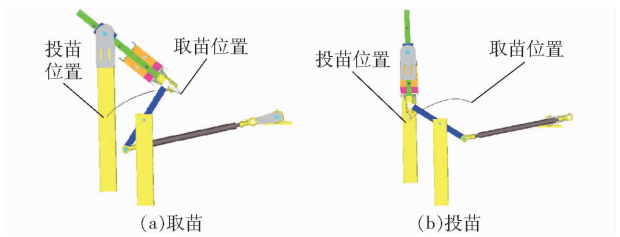
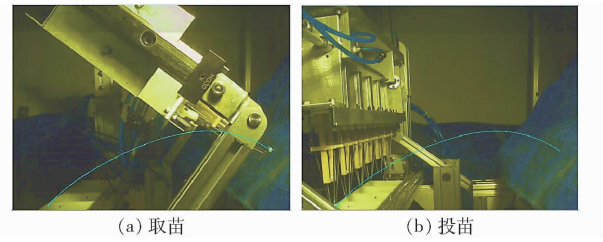


图 14 取投苗仿真轨迹

Fig. 14 Simulation track of seedling taking and throwing

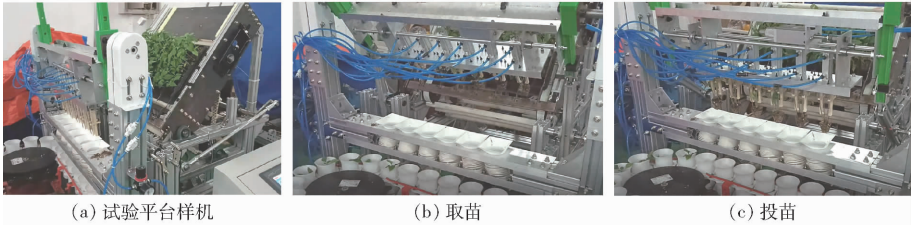
搭建取投苗装置样机, 设定整体取投苗速度 90 株/min, 驱动步进电机转速 15 r/min。使用 Phantom v 9.1 高速摄像机进行运动视频录制, 设置采样频率为 100 f/s, 采用补光灯 (JINBEI EF-200 型) 进行补光。在 Phantom 配套 PCC 3.6 软件对图像进行分析, 获得取投苗末端的实际运动轨迹如图 15 所示, 可以看出实际运动轨迹基本可以复现仿真轨迹, 验证了取投苗装置设计的正确性和可行性。



(a) 取苗 (b) 投苗

图 15 取投苗高速摄像机拍摄轨迹

Fig. 15 Shooting track of seedling taking and throwing high-speed camera



(a) 试验平台样机 (b) 取苗 (c) 投苗

图 16 样机及取投苗试验

Fig. 16 Seedling taking and feeding test

4.2 试验因素及指标

根据旱地栽植机械行业标准(JB/T 10291—2013)中相关技术要求进行试验方案设计,自动移栽机的移栽效率大于等于 90 株/min,属于高速移栽。根据机器实际情况,试验中取投苗速度分别设置为 90、120、150 株/min,均为整机单行移栽频率。在辣椒苗的取投苗过程中,如果苗龄过大、苗株过高、叶展过宽,会产生枝叶缠绕、挂苗等现象^[25-26],影响取投苗成功率;而植株较小又不符合实际栽植要求,经过实地调查,110~160 mm 辣椒苗适于实际种植,故试验辣椒苗高分别设定为 110、130、160 mm,对应的苗龄为 33、40、48 d。钵苗含水率影响基质之间的粘结力、钵体的力学特性、钵体与苗盘之间的粘附力等^[27],经过多次预试验,发现若基质含水率过高(大于 70%),基质粘结力不足,取苗成功率过低;基质含水率过低(小于 20%),钵苗易发生脱水,种植存活率较低^[27],故试验基质含水率分别设定为 40%、50%、60%。

以取投苗速度、苗株高度和基质含水率为影响因素,以取苗成功率 S_1 、伤苗率 S_2 、投苗成功率 S_3 、取栽成功率 S_4 为考察指标,进行三因素三水平正交试验。表 1 为因素水平表。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素		
	取投苗速度	苗株高度	基质含水率
	A/(株·min ⁻¹)	B/mm	C/%
1	90	110	40
2	120	130	50
3	150	160	60

4 取投苗试验

4.1 试验条件

为了进一步测试样机平台的实际取投苗性能,如图 16 所示,于 2021 年 9—12 月在学院地下室进行实际作业试验。试验对象选用辣椒苗,壮苗(长势良好、高度均匀且钵体充实完整的钵苗)率为 100%,苗盘规格为 6×12 的 72 穴标准穴盘,基质为泥炭、珍珠岩、蛭石,体积比为 3:1:1。

取苗成功率 S_1 为

$$S_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\%$$
 (24)

伤苗率 S_2 为

$$S_2 = \frac{N_2}{N} \times 100\%$$
 (25)

投苗成功率 S_3 为

$$S_3 = \frac{N_3}{N} \times 100\%$$
 (26)

取栽成功率 S_4 为

$$S_4 = \frac{N_4}{N} \times 100\%$$
 (27)

式中 N_1 ——钵苗完整的(定性认为取出后基质块保持原有形状且茎叶无可见损伤的钵苗为完整钵苗,根据观察实时取苗现场及观察取苗摄像得出)从穴盘中取出来的数量,株
 N_2 ——从分苗装置落下的钵苗产生茎叶破损、折断及基质散坨损失超 20% 的数量,株
 N_3 ——将钵苗完整投入分苗装置的数量,株
 N_4 ——从分苗装置落下的合格钵苗数量,株
 N ——试验钵苗壮苗总数,株

4.3 试验方法

正交试验方案如表 2 所示。按照表中数据依次改变装置的取投苗速度、苗株高度和基质含水率。每组试验 144 株(2 盘),10 组试验,9 组正交试验,1 组优选验证试验。每组试验均完成取苗、投苗等流程,每组试验均进行摄像。每组试验结束后根据摄像及现场试验结果记录统计试验数据,并进行方

表 2 取投苗正交试验方案和结果

Tab.2 Orthogonal experiment scheme and results of seedling taking

序号	取投苗速度 $A/(\text{株}\cdot\text{min}^{-1})$	苗株高度 B/mm	基质含水 率 $C/\%$	取苗成功 数 $N_1/\text{株}$	伤苗数 $N_2/\text{株}$	投苗成功 数 $N_3/\text{株}$	取苗成功 率 $S_1/\%$	伤苗率 $S_2/\%$	投苗成功率 $S_3/\%$	取栽成功 率 $S_4/\%$
1	90	110	40	136	2	132	94.44	1.39	91.67	90.28
2	90	130	50	136	1	132	94.44	0.69	91.67	90.97
3	90	160	60	132	6	125	91.67	4.17	86.81	82.64
4	120	110	50	134	3	129	93.06	2.08	89.58	87.50
5	120	130	60	131	4	128	90.97	2.78	88.89	86.11
6	120	160	40	128	7	112	88.89	4.86	77.78	72.92
7	150	110	60	129	3	122	89.58	2.08	84.72	82.64
8	150	130	40	127	8	115	88.19	5.56	79.86	74.31
9	150	160	50	124	8	110	86.11	5.56	76.39	70.83

差分析和极差分析,确定影响因素的主次顺序,选出最佳因素参数组合,优选后进行试验验证。

4.4 试验结果与分析

由表 2 得知,3 种取投苗速度平均取栽成功率分别为 87.96%、82.18%、75.93%;3 种苗株高度平均取栽成功率分别为 86.81%、83.80%、75.46%;3 种基质含水率平均取栽成功率分别为 79.17%、83.10%、83.80%。对试验结果用 SPSS 进行极差及方差分析,如表 3、4 所示。对于取苗成功率,取投苗速度影响最大,苗株高度次之,基质含水率最小且不显著;对于伤苗率,三者影响均不显著;对于投苗成功率,取投苗速度影响较显著,苗株高度影响较显著,基质含水率影响不显著。综上得到最佳因素参数组合为 $A_1B_1C_2$,即取投苗速度 90 株/min、苗株高度 110 mm、基质含水率 50%。

表 3 极差分析

Tab.3 Range analysis

指标	因素	K_1	K_2	K_3	极差 R	优选
S_1	A	280.6	272.9	263.9	16.7	A_1
	B	277.1	273.6	266.7	10.4	B_1
	C	271.5	273.6	272.2	2.1	C_2
S_2	A	6.3	9.7	13.2	6.9	A_1
	B	5.6	9.0	14.6	9.0	B_1
	C	11.8	8.3	9.0	3.5	C_2
S_3	A	288.8	281.5	273.8	15.0	A_1
	B	287.9	285.3	270.9	17.0	B_1
	C	275.1	282.0	260.4	21.6	C_2
S_4	A	270.1	256.3	241.0	29.1	A_1
	B	249.3	260.4	241.0	19.4	B_2
	C	249.3	257.6	260.4	11.1	C_3

为验证正交试验结果的合理性,进行优选验证试验。优选验证试验结果显示:取苗成功数为 137 株,伤苗数为 2 株,投苗成功数为 134 株,即:取苗成功率为 95.14%,伤苗率为 1.39%,投苗成功率为 93.05%,取栽成功率为 91.67%,优选验证试验

表 4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
S_1	A	46.403	2	23.20	108.250	0.009 2
	B	18.754	2	9.38	43.750	0.022 3
	C	0.750	2	0.38	0.778	0.363 6
	误差	0.429	2	0.21		
	总和	66.337	8			
S_2	A	8.028	2	4.02	2.778	0.264 7
	B	13.825	2	6.91	4.778	0.173 4
	C	2.251	2	1.13	0.778	0.562 5
	误差	2.894	2	1.447		
	总和	27.006	8			
S_3	A	37.406	2	18.70	11.845	0.077 8
	B	55.913	2	27.96	17.706	0.053 5
	C	23.704	2	40.63	7.506	0.117 6
	误差	3.158	2	1.579		
	总和	120.181	8			
S_4	A	141.890	2	70.95	101.846	0.009 7
	B	114.883	2	31.72	82.462	0.012 0
	C	22.291	2	11.15	16.000	0.058 8
	误差	1.393	2	0.70		
	总和	280.457	8			

注: $P\leq 0.01$ 为极显著, $0.01 < P\leq 0.05$ 为显著, $0.05 < P\leq 0.1$ 为较显著, $P > 0.1$ 不显著。

的总体成功率高于正交试验,试验效果达到了预期。

取投苗速度是影响取投苗显著的因素。观察发现,取苗时,运动速度过快导致末端夹取钵苗时间过短夹紧程度不够;投苗时,运动速度过快导致钵苗下落时苗叶卡在苗夹中带偏的概率增大。苗株高度对取苗、投苗成功率的影响较显著,原因在于苗株较大时叶展较大,产生了两种挂苗现象:在取苗中,叶展较大钵苗茎叶之间产生缠绕,间隔取苗时将左右上下临近穴孔的钵苗带出。在投苗时茎叶卡到取苗末端缝隙里,无法投下,甚至影响下次取苗。试验中的伤苗率均低于 6%,说明取苗点产生的加速度不足以对基质产生较大损伤。

5 结 论

(1)设计了一种全自动曲柄摇杆-导轨组合式蔬菜钵苗取投苗装置,对取投苗过程进行了运动学理论分析和仿真分析,获取了取投苗运动仿真曲线和试验轨迹曲线,验证了设计的可行性和科学性。

(2)以取投苗速度、苗株高度和基质含水率为

影响因素,以取苗成功率 S_1 、伤苗率 S_2 、投苗成功率 S_3 、取栽成功率 S_4 为考察指标,进行了三因素三水平正交试验。以最佳的参数组合:取投苗速度 90 株/min、苗株高度 110 mm 和基质含水率 50% 进行了优选参数验证试验,试验结果为取苗成功率 95.14%、伤苗率 1.39%、投苗成功率 93.05%、取栽成功率 91.67%,试验效果良好。

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] 胡建平,常航,杨丽红,等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.
HU Jianping, CHEN Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 78-84. (in Chinese)

[3] JORG O J, SPORTELLI M, FONTANELLI M, et al. Design, development and testing of feeding grippers for vegetable plug transplanters[J]. AgriEngineering, 2021, 3(3): 669-680.

[4] ISLAM M N, IQBAL M Z, ALI M, et al. Kinematic analysis of a clamp-type picking device for an automatic pepper transplanter[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 627-643.

[5] FERRARI L C S N C, FERRAR L C M. A row distributor for the transplanting of small plants born in cubical sods of compressed peat or synthetical substratum of the dutch kind; EP0596841A1[P]. 1994-05-11.

[6] 俞高红,金也,常数数,等. 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, et al. 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)

[7] TSUGA K. Development of fully automatic vegetable transplanter[J]. Jarq Japan Agricultural Research Quarterly, 2000, 34(1):21-28.

[8] 文永双,张俊雄,袁挺,等. 蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 128-142.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, YUAN Ting, et al. Current situation and analysis of automatic pick-up technology for vegetable plug seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 128-142. (in Chinese)

[9] 王超,刘彩玲,李永磊,等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):35-43,51.
WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 35-43, 51. (in Chinese)

[10] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2022,53(9):1-20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1-20. (in Chinese)

[11] 刘念聪,杨程文,刘保林,等. 全自动单摆式蔬菜钵苗取喂苗系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 87-95.
LIU Niancong, YANG Chengwen, LIU Baolin, et al. Development of automatic single pendulum vegetable pot seedling picking and feeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 87-95. (in Chinese)

[12] 谢守勇,阳尚宏,刘军,等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 1-10.
XIE Shouyong, YANG Shanghong, LIU Jun, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 1-10. (in Chinese)

[13] 倪有亮,金诚谦,刘基. 全自动移栽机取送苗系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 10-19.
NI Youliang, JIN Chengqian, LIU Ji. Design and experiment of system for picking up and delivering seedlings in automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 10-19. (in Chinese)

[14] 王蒙蒙,蒙建农,刘彩玲,等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 49-57.
WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese)

[15] 童俊华,俞高红,朱赢鹏,等. 三臂回转式蔬菜钵苗取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 113-121.
TONG Junhua, YU Gaohong, ZHU Yingpeng, et al. Design and experiment of three-arms rotary vegetable plug seedling pick-up mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 113-121. (in Chinese)

[16] 俞高红,廖振飘,徐乐辉,等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植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)
- [17] 俞高红, 俞腾飞, 叶秉良, 等. 一种旋转式穴盘苗取苗机构的设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 67–76.
YU Gaohong, YU Tengfei, YE Bingliang, et al. Design of a rotary plug seedling pick-up mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 67–76. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 贾恒信, 李明波, 吕江涛. 基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统的研究及应用[J]. 衡器, 2012, 41(8): 5–9.
JIA Hengxin, LI Mingbo, LÜ Jiangtao. Research and application of object center of gravity measuring system based on torque balance theory[J]. Weighing Instrument, 2012, 41(8): 5–9. (in Chinese)
- [20] 那明君, 滕乐, 周振响, 等. 全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 54–61.
NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Zhenxiang, et al. Design and experiment of fully automatic slide-track type dryland pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 54–61. (in Chinese)
- [21] 崔巍, 赵亮, 刘立晶, 等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 79–84, 98.
CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 79–84, 98. (in Chinese)
- [22] 曹冲振, 赵春雨, 王凤芹, 等. 90°摆角无偏置曲柄摇杆机构及其应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 45–48.
CAO Chongzhen, ZHAO Chunyu, WANG Fengqin, et al. Unbiased crank and rocker mechanism with 90° tilt angle and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(3): 45–48. (in Chinese)
- [23] 蔡金平, 刘木华, 肖丽萍, 等. 变行距水稻钵苗移栽机移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 50–59.
CAI Jinping, LIU Muhua, XIAO Liping, et al. Design and experiment of transplanting device with variable row-spacing of rice potted seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 50–59. (in Chinese)
- [24] 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗臂凸轮机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 21–29.
YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Design and test on cam mechanism of seedling pick-up arm for vegetable transplanter for pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 21–29. (in Chinese)
- [25] 李华, 马晓晓, 曹卫彬, 等. 夹茎式番茄钵苗取苗机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 39–48.
LI Hua, MA Xiaoxiao, CAO Weibin, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism by stem clipping for tomato plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 39–48. (in Chinese)
- [26] 贺一鸣, 冯世杰, 颜波, 等. 油菜钵苗钵体的力学特性[J]. 农业工程, 2017, 7(4): 1–6.
HE Yiming, FENG Shijie, YAN Bo, et al. Mechanical properties of rape seedling pot[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(4): 1–6. (in Chinese)
- [27] 金鑫. 蔬菜穴盘苗自动移栽技术与装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
JIN Xin. Research on automatic transplanting technology and device for vegetable plug seedling[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)