

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.06.013

气动下压式高速取投苗装置与吊杯时空匹配关系研究

王超^{1,2} 张贺^{1,2} 宋建农³ 周建平^{1,2} 王海宁^{1,2} 廖道辉^{1,2}

(1. 新疆大学智能制造现代产业学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆农牧机器人及智能装备工程研究中心, 乌鲁木齐 830017;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为探索一种能实现高速取苗后无停顿快速投苗、同步接苗技术方案, 分析气动下压式高速取投苗装置高速取苗后不停顿快速投苗4个阶段运动过程, 得到穴盘苗运动时间。采用高速摄像机对自制高速取投苗装置无停顿快速投苗过程进行拍摄, 通过PCC软件进行捕捉分析和计算, 分析了穴盘苗在无停顿抛投过程中位移和时间关系。经同步接苗极限分析和交集运算得不同取苗频率吊杯同步接苗提前相位角范围, 获得了高速取投苗装置高速取苗、无停顿快速投苗与吊杯同步接苗时空匹配关系。在高速移栽样机上开展吊杯同步接苗试验, 试验结果表明, 当取苗频率为180株/min时, 吊杯同步接苗成功率为96.4%。研究结果为高速取投苗装置与吊杯时空匹配关系提供基础数据。

关键词: 高速取苗; 气动下压式; 无停顿快速投苗; 时空匹配

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0133-10

OSID:



Limit of Synchronous Seedling Reaching of Pneumatic Ejecting Type High-speed Transplanter

WANG Chao^{1,2} ZHANG He^{1,2} SONG Jiannong³ ZHOU Jianping^{1,2} WANG Haining^{1,2} LIAO Daohui^{1,2}

(1. School of Intelligent Manufacturing Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2. Xinjiang Agricultural and Animal Husbandry Robot and Intelligent Equipment Engineering Research Center, Urumqi 830017, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore a technology solution capable of achieving high-speed seedling retrieval followed by uninterrupted rapid seedling deployment and synchronized seedling reception, an analysis was conducted on the four-stage movement process of rapid seedling deployment after high-speed seedling retrieval by using a pneumatic down-press type high-speed seedling retrieval and deployment device, obtaining the movement time of tray seedlings. High-speed photography was used to capture the process of uninterrupted rapid seedling deployment by the research group's custom-built high-speed seedling retrieval and deployment device, with PCC software utilized for capture analysis and calculation, examining the relationship between displacement and time during the continuous seedling throw and deploy process. Through limit analysis and intersection operation of synchronous seedling reception, the range of advance phase angles for hanging cup synchronous seedling reception at different seedling retrieval frequencies was determined, achieving the spatio-temporal matching relationship between high-speed seedling retrieval and deployment device, high-speed seedling retrieval, uninterrupted rapid seedling deployment, and hanging cup synchronous seedling reception. Verification experiments of the hanging cup synchronous seedling reception effect were conducted on a high-speed transplanter prototype, with results showing a success rate of 96.4% for hanging cup synchronous seedling reception at a retrieval frequency of 180 seedlings/min, providing foundational data for the spatio-temporal matching relationship between the high-speed seedling retrieval and deployment device and the hanging cup.

Key words: high-speed seedling ejecting; pneumatic ejecting type; rapid seeding feeding without pause; spatio-temporal matching

收稿日期: 2023-10-23 修回日期: 2024-04-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区天池英才项目(51052300546)、国家重点研发计划项目(2016YFD0700302)和国家自然科学基金项目(32301717)

作者简介: 王超(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: cauwangchao@cau.edu.cn

通信作者: 周建平(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高端农牧装备与特种机器人研究, E-mail: linkzhou@163.com

0 引言

育苗移栽技术具有提高蔬菜作物成活率、缩短生长周期、提高产量与品质等优势^[1-3],使用移栽机作业可以降低劳动强度、提高作业效率和栽植作业质量^[4-6],研究人员研发了各类半自动移栽机械,广泛应用于辣椒、番茄等作物移栽作业^[7],取得了良好效果^[8-10],随着移栽作物种植规模化和农村劳动力短缺趋势,发展自动化高速移栽是育苗移栽技术的必然趋势。

欧美和日本等发达国家研制出适用于不同蔬菜半自动移栽机、自动移栽机^[11-13]。目前,我国适应普通穴盘自动取苗、基质块苗移栽等技术装备已逐渐完善,同时在蔬菜生产中探索了无人协同作业方法^[14]。袁挺等^[15]设计了一种全自动曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置。俞高红等^[16-17]对蔬菜穴盘苗密植移栽机多行取苗机构进行设计与试验,提高了运动准确性。颜华等^[18]设计了一套栽植静轨迹无级可调的往复式鸭嘴栽植装置,可以满足不同株距小穴口的栽植要求。周海丽等^[19]设计了一种具有扶苗和推苗作用多杆植苗机构,能较好地完成植苗作业。崔志超等^[20]设计了一种双排链式栽植装置,具有较高的稳定性。吊杯是膜上栽植机构主要形式,取苗、投苗与吊杯接苗时空协调匹配关系影响吊杯接苗效果与作业效率^[21]。李祥等^[22]研究了自动移栽机运动结构空间布局、时空协调关系,提出了吊杯准确接到穴盘苗条件,给出了吊杯接苗角及安装角计算公式。胡建平等^[23]运用传感器获取分苗杯位置和数量,同时用编码器获取分苗杯运动位移,两者互相配合能够得到穴盘苗最佳投苗点。金旭等^[24]对喂苗机构与栽植器时空位置关系进行试验,优化喂苗机构与栽植器时空位置、运动协调关系。曾繁地等^[25]采用高速摄影和图像后处理技术,对穴盘苗从喂苗机构落苗口到栽植器运动轨迹进行分析,探究了栽植器接苗时穴盘苗分布区域。

为了推动自动高速移栽技术发展,需统筹高速取苗-高速投苗-高速栽植及其时空匹配关系开展系统研究,本文在气动下压式高速移栽机(以下简称高速移栽机)上,对不同时序及取苗频率下高速取苗后无停顿快速投苗与吊杯同步接苗极限进行分析,采用高速相机研究穴盘苗取出后经漏斗到达同步接苗前后极限位置运动规律,开展试验验证和评估无停顿投苗-同步接苗性能,以期为高速移栽作业探索一种高速取苗-无停顿快速投苗-同步接苗时空匹配技术方案。

1 高速移栽机整机结构与工作原理

1.1 整机结构

高速移栽机主要由高速取投苗装置、悬挂架、栽植机构、镇压轮等组成,如图1所示,其中高速取投苗装置包括供盘装置、送盘机构、气动取苗机构、投苗漏斗,配套使用36孔组合式穴盘。栽植机构主要包括偏心圆盘驱动机构和吊杯栽植器。牵引动力三点悬挂机构连接悬挂架牵引高速移栽机前进,地轮传动驱动栽植机构、送盘机构同步运转,控制系统对供盘装置和气动取苗机构进行速度自适应控制^[26]。

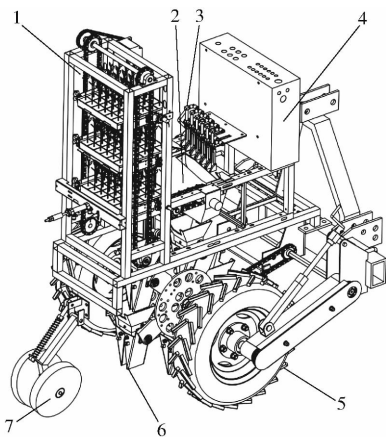


图1 气动下压式高速移栽机结构图

Fig. 1 Structure diagram of pneumatic ejecting type high-speed transplanter

1. 供盘装置 2. 送盘机构 3. 气动取苗机构 4. 控制柜 5. 地轮 6. 栽植机构 7. 镇压轮

1.2 工作原理

高速移栽机通过有序供盘、连续送盘、高速取投苗一体化、同步接苗零速栽植、镇压等工序(图2)实现全自动高速移栽作业。取苗时序与吊杯运动正时

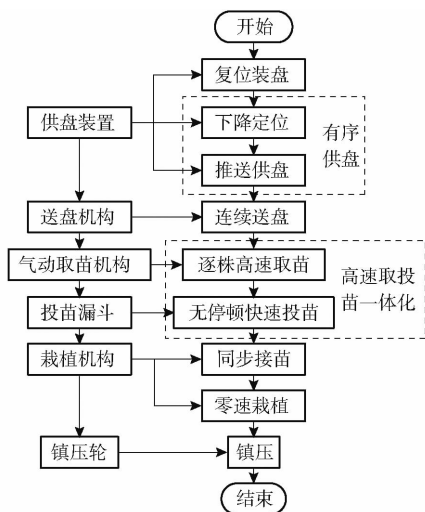


图2 气动下压式高速移栽机工作流程图

Fig. 2 Working flowchart of pneumatic ejecting type high-speed transplanter

同步关系影响接苗准确性,另外需要根据取苗频率(机器前进速度)调整吊杯提前相位角,因此设计了同步接苗正时调整链轮,以保证栽植机构在不同前进速度下,与气动取苗机构高速取苗时序的正时匹配,整机动力传动路线如图 3 所示,具体工作原理见图 4。

①连续送盘:送盘链连续输送苗盘,各行穴孔依次经过取苗单体顶苗器下方取苗位置。

②高速取投苗一体化:取苗单体按设计的高速取苗时序依次驱动顶苗器下压,将穴盘苗从穴孔中顶出后缩回复位^[27]。

③无停顿快速投苗:当穴盘苗茎叶完全穿孔下落后,在惯性和重力作用下通过投苗漏斗无停顿斜抛投出。

④同步接苗:吊杯同步“追赶”到达接苗位置相位角时,正好接住斜抛投出的穴盘苗,完成同步接苗。

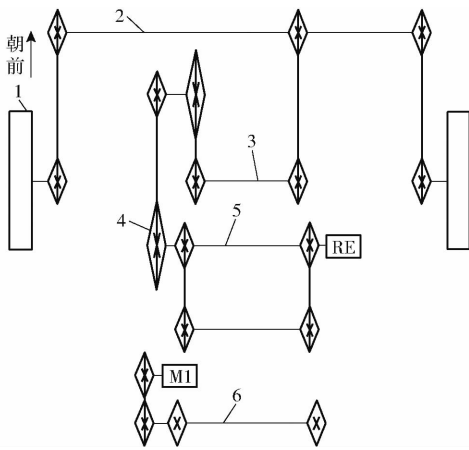


图 3 动力传动路线

Fig. 3 Power transmission route

1. 地轮
2. 六方轴
3. 栽植机构旋转轴
4. 接苗正时调整链轮
5. 送盘链轮主动轴
6. 供盘链轮主动轴

2 高速取投苗装置与吊杯时空匹配模型

2.1 栽植机构

栽植机构是影响穴盘苗栽植效率和质量的关键机构。崔巍等^[28]对鸭嘴式和吊杯式栽植机构进行了分析,结果表明回转吊杯式栽植机构结构更复杂、整体质量更大,不存在死点位置,运动冲击较小,栽植曲线合理,适用于高速移栽作业。于晓旭等^[29]认为回转式机构是移栽机构发展的趋势。因此,本文选择偏心圆盘吊杯式栽植机构(图 5)作为高速移栽机栽植机构,主要由偏心圆盘机构和吊杯组成。偏心圆盘机构通过驱动吊杯平动完成余摆线栽植轨迹实现瞬时零速移栽过程(图 6)。

图 6 中 Y_0 为点 P 与吊杯安装轴纵向距离,为 18 cm; θ_p 为吊杯相位角; ω 为吊杯回转角速度; R 为吊杯回转半径,为 22.5 cm; v_0 为移栽机前进速度;与点 P 相连的 3 条曲线分别为 $\lambda = 1$ 、 $\lambda = 0.8$ 、 $\lambda = 1.148$, 3 种情况下点 P 运动轨迹。

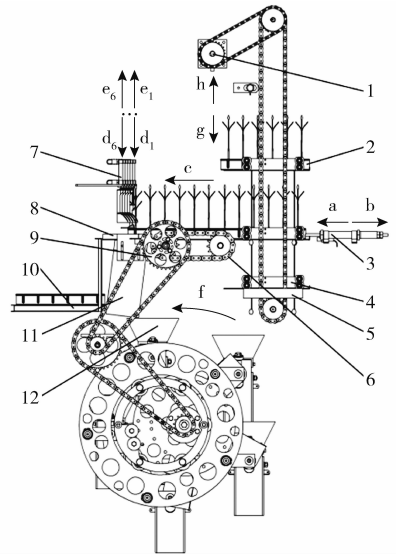


图 4 工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram

1. 供盘电机
 2. 苗盘
 3. 推盘气缸
 4. 托盘
 5. 托盘堆积架
 6. 送盘链
 7. 气动取苗机构
 8. 送盘底板
 9. 正时链轮
 10. 空盘回收架
 11. 投苗漏斗
 12. 吊杯
- a. 推送供盘 b. 供气气缸复位 c. 连续送盘 d. 下压取苗 e. 取苗气缸复位 f. 吊杯回转 g. 托盘下降 h. 托盘上升复位

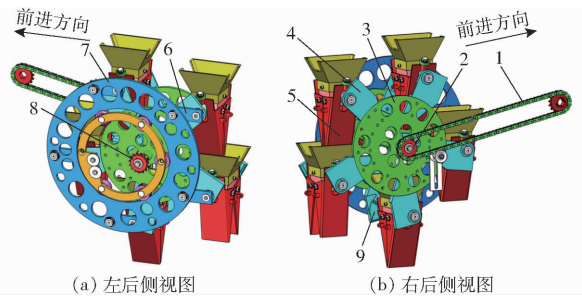


图 5 偏心圆盘吊杯式栽植机构示意图

Fig. 5 Schematics of eccentric disc hanging cup planting mechanism

1. 传动链
2. 从动链轮
3. 栽植主动圆盘
4. 吊杯挂耳
5. 吊杯
6. 平动连杆
7. 偏心圆盘
8. 主动链轮
9. 端面凸轮

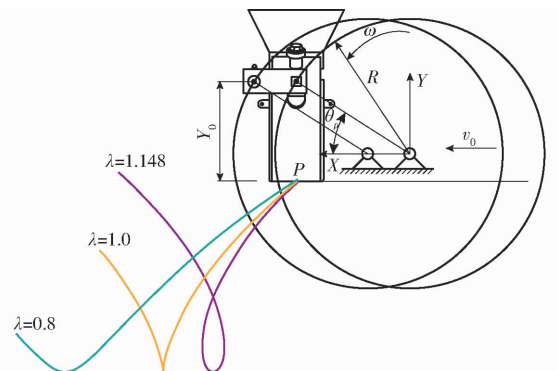


图 6 偏心圆盘机构运动学模型

Fig. 6 Kinematic model of eccentric disk mechanism

建立吊杯运动模型分析吊杯下部中心点 P 运动情况。实现零速栽植可以提高穴盘苗栽植入土后直立度。当吊杯到达轨迹最低点时,吊杯速度应与

移栽机前进速度大致相同,但方向相反。吊杯在打开鸭嘴后,穴盘苗以相对于地面零速度被释放并落入栽植孔中;然后吊杯开始上升,准备进行下一次栽植循环。

点 P 位移方程为

$$\begin{cases} x_p = v_0 t + R \cos(\omega t_p) \\ y_p = -Y_0 - R \sin(\omega t_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中 t_p ——栽植吊杯转动时间

式(1)对时间 t 求导,吊杯水平分速度 v_x 和竖直分速度 v_y 的计算式为

$$\begin{cases} v_x = v_0 - R\omega \sin(\omega t_p) \\ v_y = -R\omega \cos(\omega t_p) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2),为实现高栽植直立度,要实现零速栽植条件,即 $0 < v_0 \leq R\omega$ 。在这种情况下,点 P 运动轨迹是余摆线或摆线,水平方向上具有 1 或 2 个零速点,理想落苗时机应在瞬时零速点附近。由于穴盘苗从吊杯开启到完全落下需要一定时间,在减小土壤回流和吊杯运动对下落中穴盘苗姿态干扰考虑下,应缩短穴盘苗与吊杯分离时间,使得吊杯在上升阶段起点时开启,上升阶段吊杯在竖直方向上与穴盘苗相对速度越来越大。摆线只有一个零速点位于最低点,而余摆线则具有两个水平方向零速点,其中一个位于上升阶段,因此设计调整栽植机构时应考虑实现余摆线轨迹栽植曲线。崔巍等^[30]通过优化栽植曲线轨迹参数得到不等式

$$2 \left(1 - \frac{h}{4R} \right) \leq \frac{D_{dl} i_{dz}}{(1-u)R} < 2 \quad (3)$$

式中 h ——栽植深度,取 10 cm

D_{dl} ——地轮直径,取 56 cm

i_{dz} ——地轮到栽植机构传动比,取 0.70

u ——地轮滑移率,取 8% ~ 12%

式(3)可用于确保秧苗在直立时尽量减少地膜撕裂。因此,在设计和调整移栽机时,应使相关参数满足式(3)。

2.2 时空匹配模型

高速取投苗装置与吊杯时空匹配模型如图 7 所示,当同步接苗吊杯到达提前相位角 θ_{ap} 时,穴盘苗被气动取苗机构下压取出,竖直下抛投进投苗漏斗,经过投苗漏斗导引从下方出口以斜抛姿态投出;吊杯同步“追赶”到达接苗位置相位角 θ_{cp} 时,穴盘苗落入吊杯内,完成同步接苗过程。

3 吊杯同步接苗极限分析

3.1 停顿快速投苗过程

无停顿快速投苗过程分为 4 阶段(图 8,以第 1 取苗时序无停顿快速投苗过程为例): I 阶段,穴盘

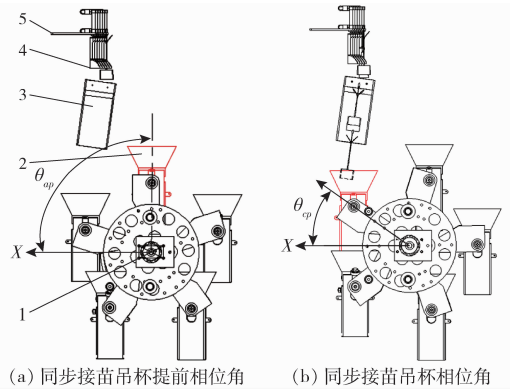


图 7 高速取投苗装置与吊杯时空匹配模型

Fig. 7 Spatio-temporal matching model of high-speed seedling ejecting and casting device with hanging cups

1. 主动链轮 2. 吊杯 3. 投苗漏斗 4. 苗钵 5. 气动取苗机构

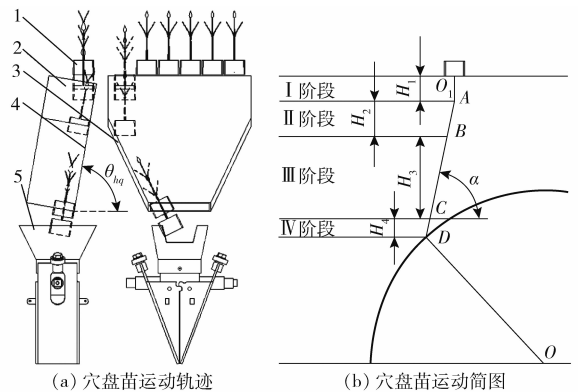


图 8 落苗轨迹

Fig. 8 Dropping trajectory of seedlings

1. 穴盘苗 2. 投苗漏斗 3. 投苗漏斗侧壁 4. 投苗漏斗后壁 5. 吊杯

苗被气动取苗机构下压取出后以一定初速度(v_1)竖直下抛; II 阶段,穴盘苗与投苗漏斗后壁碰撞,并沿后壁滑落; III 阶段,穴盘苗沿后壁滑落过程中与投苗漏斗侧壁接触碰撞并沿后壁与侧壁形成的槽滑落; IV 阶段,穴盘苗从投苗漏斗下方出口斜抛至吊杯上方(吊杯接苗位置)。通过受力分析对穴盘苗无停顿快速投苗过程建立数学模型,即

$$\begin{cases} H_1 = v_1 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 & (\text{I 阶段}) \\ H_2 = v_2 t_2 \sin \theta_{hq} + \frac{1}{2} a_1 t_2^2 \sin \theta_{hq} & (\text{II 阶段}) \\ H_3 = v_3 t_3 \sin \theta + \frac{1}{2} a_2 t_3^2 \sin \theta & (\text{III 阶段}) \\ H_4 = v_4 t_4 \sin \alpha + \frac{1}{2} g t_4^2 & (\text{IV 阶段}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 H_1 ——穴盘苗下压取出后竖直下抛到投苗漏斗后壁碰撞点 A 高度(I 阶段竖直位移),取 65.44 mm

H_2 ——穴盘苗沿投苗漏斗后壁下滑高度(II 阶段竖直位移),取 94.79 mm

H_3 ——穴盘苗沿投苗漏斗后壁与侧壁形成的槽下滑高度(Ⅲ阶段竖直位移),取 203.14 mm

H_4 ——穴盘苗从投苗漏斗出口斜抛至吊杯上方(接苗位置)高度(Ⅳ阶段竖直位移),取 68.04 mm

v_1 ——下压取出穴盘苗后 I 阶段初速度(即点 O_1 速度), m/s

v_2 ——穴盘苗接触后壁碰撞后下滑, II 阶段穴盘苗点 A 初速度, m/s

v_3 ——穴盘苗接触侧壁碰撞后下滑, III 阶段穴盘苗点 B 初速度, m/s

v_4 ——Ⅳ阶段开始时刻穴盘苗的初速度(即点 C 速度), m/s

θ_{hq} ——投苗漏斗后壁与水平面夹角, ($^\circ$)

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

t_1 ——I 阶段运动时间, s

t_2 ——II 阶段运动时间, s

t_3 ——III 阶段运动时间, s

t_4 ——Ⅳ阶段运动时间, s

a_1 ——II 阶段穴盘苗加速度, m/s^2

a_2 ——III 阶段穴盘苗加速度, m/s^2

α ——穴盘苗在点 C 时, 其速度方向与水平方向夹角, ($^\circ$)

θ ——投苗漏斗后壁与侧壁形成的槽与水平面夹角, 取 64.1°

图 8 中 θ_{hq} 为 83° , 当气动取苗机构工作压力设定后, 改变取苗频率对单个时序高速取苗和无停顿投苗过程无影响, 仅需改变相邻取苗时序间隔。

3.2 接苗时间计算

接苗时间定义: 穴盘苗从苗盘取出后运动到吊杯上方的运动时间, 即穴盘苗从点 O_1 到点 D 的时间为 t 。接苗时间决定接苗位置, 不仅影响接苗准确率, 还关系到穴盘苗与吊杯壁碰撞损伤。

以投苗漏斗后壁与侧壁形成内角某点为原点 O 建立坐标系如图 9 所示, X 轴垂直于投苗漏斗后壁, Y 轴垂直于投苗漏斗侧壁(忽略空气阻力影响)。

I 阶段, 穴盘苗作竖直下抛运动, 由式(4)推导得出, 该阶段穴盘苗运动时间 t_1 计算式为

$$t_1 = \frac{-v_1 + \sqrt{v_1^2 + 2gH_1}}{g} \quad (5)$$

II 阶段, 穴盘苗沿投苗漏斗后壁下滑。穴盘苗沿投苗漏斗后壁与侧壁形成的槽滑落。设穴盘苗质量为 m ; 重力加速度为 g , 取 9.8 m/s^2 ; 各物理量计算公式为

$$G_1 = N = mg \cos \theta \quad (6)$$

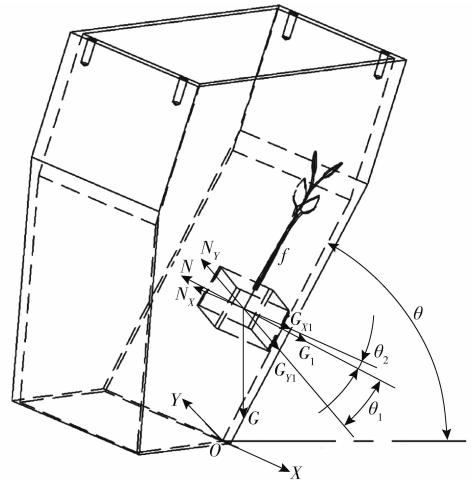


图 9 Ⅲ阶段受力分析

Fig. 9 Force analysis in the third stage

$$G_{Y1} = N_Y = N \cos \theta_1 \quad (7)$$

$$G_{X1} = N_X = N \cos \theta_2 \quad (8)$$

$$f = f_x + f_y \quad (9)$$

$$f_x = \mu N_X \quad (10)$$

$$f_y = \mu N_Y \quad (11)$$

$$a_1 = g \sin \theta_{hq} - \mu g \cos \theta_{hq} \quad (12)$$

$$ma_2 = mg \sin \theta - f_x - f_y \quad (13)$$

式中 G ——穴盘苗重力, N

G_1 —— G 垂直于投苗漏斗后壁与侧壁形成的槽的分量, 与投苗漏斗对穴盘苗的总支持力 N 互为反力, N

G_{X1} —— G_1 在 X 轴分量, 与支持力 N_X 互为反力, N

G_{Y1} —— G_1 在 Y 轴分量, 与支持力 N_Y 互为反力, N

θ_1 —— G_1 与 G_{Y1} 夹角, 取 45°

θ_2 —— G_1 与 G_{X1} 夹角, 取 45°

f_y ——穴盘苗与投苗漏斗侧壁摩擦力, N

f_x ——穴盘苗与后壁摩擦力, N

f ——穴盘苗受到的总摩擦力, N

μ ——穴盘苗与投苗漏斗壁的摩擦因数

联立式(4)~(12)得出 t_2

$$t_2 = \frac{-v_2 \sin \theta_{hq} + \sqrt{v_2^2 \sin^2 \theta_{hq} + 2(g \sin \theta_{hq} - \mu g \cos \theta_{hq}) H_2 \sin \theta_{hq}}}{(g \sin \theta_{hq} - \mu g \cos \theta_{hq}) \sin \theta_{hq}} \quad (14)$$

III 阶段, 穴盘苗沿投苗漏斗后壁与侧壁形成的槽滑落。联立式(4)~(13)得出 t_3

$$t_3 =$$

$$\frac{-v_3 \sin \theta + \sqrt{v_3^2 \sin^2 \theta + 2[g \sin \theta - \mu g \cos \theta (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)] H_3 \sin \theta}}{[g \sin \theta - \mu g \cos \theta (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)] \sin \theta} \quad (15)$$

IV 阶段, 穴盘苗斜抛。由式(4)推导得出, 该阶

段穴盘苗运动时间 t_4 为

$$t_4 = \frac{-v_4 \sin \alpha + \sqrt{v_4^2 \sin^2 \alpha + 2gH_4}}{g} \quad (16)$$

接苗时间 t 计算式为

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (17)$$

3.3 同步接苗极限设定

吊杯是栽植机构关键组件,完成同步接苗、携苗下降、入土成穴并成穴栽植动作。接苗杯形状呈喇叭口状,并在左右两侧向外延伸,以扩大同步接苗极限理论范围,延长投苗入杯窗口时间,提高接苗成功率。

同步接苗相位角前后极限设定为:①同步接苗相位角前极限:穴盘苗下表面前沿与接苗杯前沿有效区域上表面接触。②同步接苗相位角后极限:穴盘苗重心位于接苗杯有效区域上表面下方 15 mm。

根据无停顿快速投苗运动规律,建立各取苗时序同步接苗前/后极限穴盘苗位置和吊杯相位角模型,如图 10 所示。图中 h_{iq}/h_{ih} 为第 1~6 取苗时序同步接苗相位角前/后极限穴盘苗竖直位移 ($i = 1, 2, \dots, 6$), m ; θ_{iq}/θ_{ih} 为第 1~6 取苗时序同步接苗前/后极限吊杯相位角, ($^\circ$)。

在三维软件中测量各取苗时序同步接苗相位角前/后极限穴盘苗竖直位移 h_{iq}/h_{ih} 和对应吊杯相位角 θ_{iq}/θ_{ih} , 见表 1。

3.4 接苗时间

穴盘苗从穴盘取出到吊杯同步接苗相位角前/

表 1 各取苗时序同步接苗相位角前/后极限及对应穴盘苗竖直位移

Tab.1 Synchronize before/after limit of seedling phase angle and corresponding vertical displacement of hole tray seedlings in each extraction sequence

参数	第 1 时序	第 2 时序	第 3 时序	第 4 时序	第 5 时序	第 6 时序
同步接苗相位角前极限穴盘苗竖直位移 h_{iq}/m	0.28	0.28	0.27	0.28	0.28	0.28
同步接苗前极限吊杯相位角 $\theta_{iq}/(^\circ)$	-50.40	-50.40	-55.98	-53.65	-52.15	-50.67
同步接苗相位角后极限穴盘苗竖直位移 h_{ih}/m	0.35	0.35	0.36	0.37	0.35	0.35

后极限位置时运动时间称为接苗时间,包括气动取苗机构下压取出穴盘苗所需时间^[27]与穴盘苗从点 O_1 到点 D_2 运动时间。接苗时间决定吊杯提前相位角,不仅影响投苗准确率,还关系到穴盘苗与吊杯壁碰撞损伤,对穴盘苗掉落时间进行分析,可为提高接苗准确率提供参考依据。

将气动系统工作压力设为 0.30 MPa,取苗频率设为 120 株/min,并使用高速摄像机(Phantom V9.1 型)来记录各取苗时序无停顿投苗阶段穴盘苗运动过程。同时,对各取苗时序穴盘苗运动至同步接苗相位角前/后极限位置进行统计,如图 11 所示,获取穴盘苗运动情况。

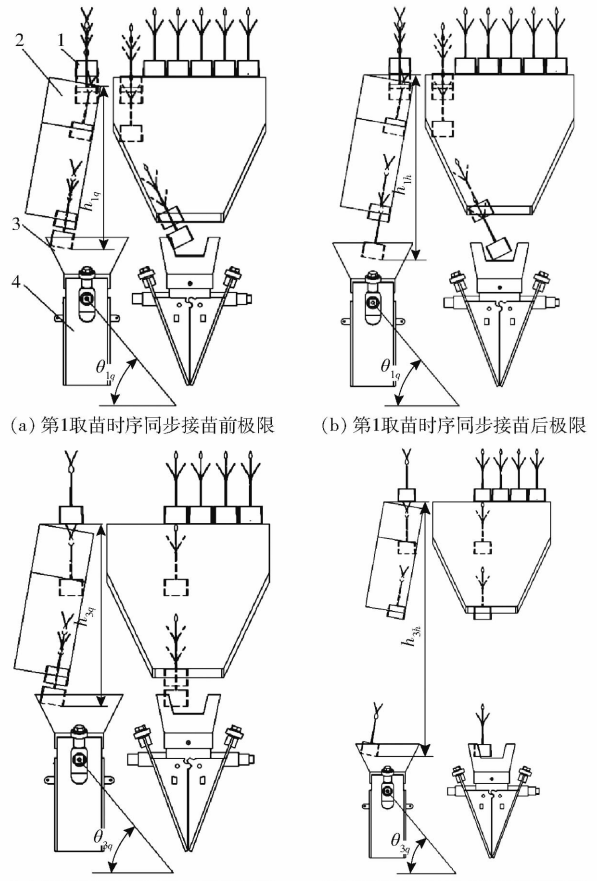


图 10 第 1、3 取苗时序吊杯同步接苗相位角前/后极限

Fig. 10 The 1st and 3rd seedling picking time sequence suspension cup synchronous seedling receiving phase angle front/rear limit

1. 穴盘苗 2. 投苗漏斗 3. 接苗杯 4. 吊杯

在 PCC 软件中以时序开始作业即顶苗器下压瞬间为计时零点,统计各取苗时序同步接苗前/后极限穴盘苗运动时间 t_{iq}/t_{ih} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 见表 2。

3.5 不同取苗频率同步接苗吊杯提前相位角范围

各取苗时序开始瞬间,对应于该取苗时序的吊杯相对于同步接苗相位角前后/极限提前一定角度增量 $\Delta\theta_{iq}/\Delta\theta_{ih}$ 为

$$\begin{cases} \Delta\theta_{iq} = \theta_{iq} - \omega_{db} t_{iq} \\ \Delta\theta_{ih} = \theta_{ih} - \omega_{db} t_{ih} \end{cases} \quad (18)$$

其中
$$\omega_{db} = \frac{\pi f_{qm}}{30 N_{db}} \quad (19)$$

式中 N_{db} ——吊杯数量 f_{qm} ——取苗频率

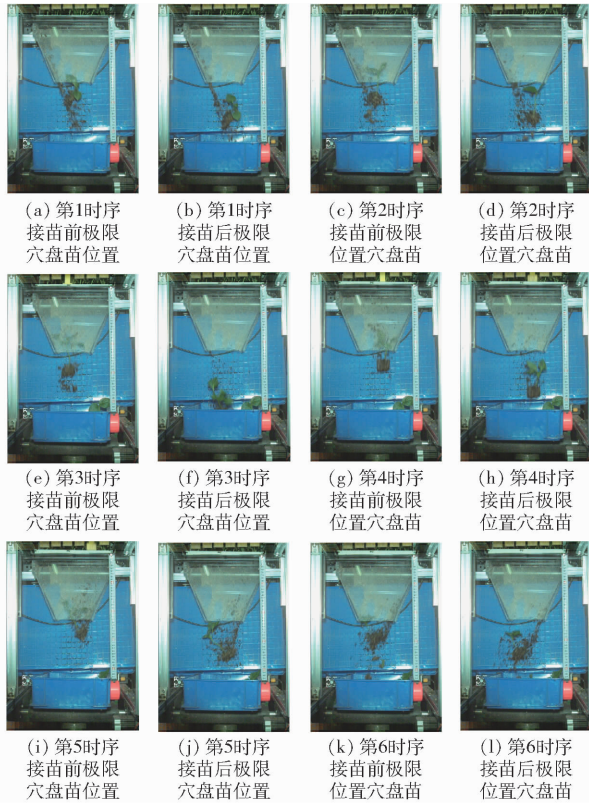


图 11 各取苗时序同步接苗相位角前/后极限穴盘苗位置高速摄像图像

Fig. 11 High speed camera image of maximum hole seedling position before/after synchronous phase angle of each seedling picking sequence

表 2 各取苗时序吊杯同步接苗相位角前/后极限穴盘苗运动时长

Tab. 2 Maximum movement time of hole tray seedlings before/after synchronous phase angle of hanging cup for each seedling picking sequence

参数	s					
	第 1 时序	第 2 时序	第 3 时序	第 4 时序	第 5 时序	第 6 时序
同步接苗相位角前极限穴盘苗运动时间 t_{iq}	0.185	0.180	0.145	0.135	0.160	0.185
同步接苗相位角后极限穴盘苗运动时间 t_{ih}	0.220	0.220	0.185	0.170	0.205	0.215

取苗频率为 120、150、180 株/min, 根据式 (19) 计算吊杯角速度 ω_{db} 。

根据各取苗时序吊杯同步接苗相位角前/后极限和穴盘苗运动时间, 对应该取苗时序同步接苗吊杯提前相位角范围 $[\theta_{iqt}, \theta_{iht}]$ 为

$$\begin{cases} \theta_{iqt} = \theta_{iq} + \Delta\theta_{iq} = \theta_{iq} - \omega_{db}t_{iq} \\ \theta_{iht} = \theta_{ih} + \Delta\theta_{ih} = \theta_{ih} - \omega_{db}t_{ih} \end{cases} \quad (20)$$

计算结果见表 3。不同取苗频率各时序同步接苗吊杯提前相位角范围计算式为

$$\begin{cases} \theta_{qt} = \max(\theta_{iqt}) \\ \theta_{ht} = \min(\theta_{iht}) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (21)$$

表 3 不同取苗频率各取苗时序同步接苗吊杯提前相位角
Tab. 3 Different transplanting frequencies and seedling ejecting timing synchronized with advance phase angle of seedling hanging cup ($^{\circ}$)

时序	取苗频率/(株·min ⁻¹)					
	120		150		180	
	前极限	后极限	前极限	后极限	前极限	后极限
第 1 时序	-77.04	-65.50	-83.70	-73.42	-90.36	-81.34
第 2 时序	-76.32	-65.50	-82.80	-73.42	-89.28	-81.34
第 3 时序	-76.86	-57.38	-82.08	-64.04	-87.30	-70.70
第 4 时序	-73.09	-51.25	-77.95	-57.37	-82.81	-63.49
第 5 时序	-75.19	-61.57	-80.95	-68.95	-86.71	-76.33
第 6 时序	-77.31	-63.20	-83.97	-70.94	-90.63	-78.68

得到对应于该取苗频率同步接苗吊杯提前相位角范围 $[\theta_{qt}, \theta_{ht}]$, 见表 4。

表 4 不同取苗频率同步接苗吊杯提前相位角范围
Tab. 4 Different transplanting frequencies and seedling picking timing synchronized with advance phase angle of seedling hanging cup

取苗频率/(株·min ⁻¹)	120	150	180
吊杯提前相位角/ $^{\circ}$	-73.09 ~ -65.50	-77.95 ~ -73.42	-82.81 ~ -81.34

用于不同取苗频率下吊杯提前相位角正时调整, 理论上正时后吊杯在对应取苗频率下可同步接住各时序取出穴盘苗。

当取苗频率达到 195 株/min 时不存在同步接苗吊杯提前相位角, 因此当前结构参数下极限取苗频率为 194 株/min。

4 同步接苗性能试验

在土槽进行同步接苗性能评估试验, 高速移栽机通过三点悬挂与土槽牵引车前悬挂连接, 土槽牵引车电力插座和空气压缩机提供电能和压缩空气。在自动控制系统控制下, 高速移栽机各个装置协调配合, 完成气动下压式高速取苗、无停顿快速投苗、同步接苗作业。

4.1 试验条件

移栽对象是 36 穴组合式盘辣椒苗 (图 12), 平均株高为 (144 ± 16) mm, 展宽为 (122 ± 23) mm。在试验开始之前, 从穴盘中取出无苗钵体并补齐生长一致的穴盘苗。

试验所需设备或仪器有: 空气压缩机 (风霸 FB50 型)、游标卡尺 (量程 150 mm、精度 0.01 mm)。

4.2 试验方法

钵体含水率测量结果为 64.24% ~ 75.31%, 将气动系统气压调整为 0.30 MPa, 测试性能指标为接

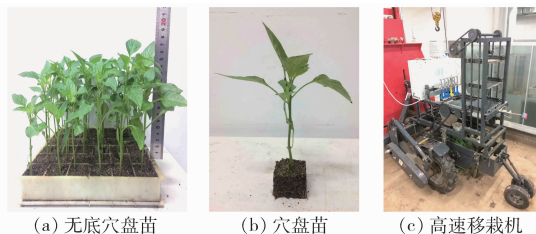


图12 无底穴盘苗与高速移栽机

Fig. 12 Seedling tray and high-speed transplanting transplanter prototype

苗成功率 Q_{JM} , 计算公式为

$$Q_{JM} = \frac{N_{JM}}{N_{QM}} \times 100\% \quad (22)$$

式中 N_{JM} ——接苗成功株数, 株

N_{QM} ——取苗成功株数, 株

在全自动高速移栽作业之前, 首先给空气压缩机通电运转约 2 min, 以使储气罐气压升至 0.60 MPa 以上。然后, 启动自动控制系统, 按下启动按钮, 根据 3 种不同移栽效率 (120、150、180 株/min), 计算得土槽台车前进速度 (2.16、2.70、3.24 km/h), 并带动高速移栽机前进 (图 13b)。每组试验中共取 4 盘苗 (共 144 株), 由于土槽试验段有效长度限制, 每次试验只能连续取出 1 穴盘 (36 株)。为了避免首尾加速和减速阶段对同步接苗试验影响, 选择中间连续 30 株进行统计, 然后返回到测试端起点再次开始下一穴盘高速取投苗同步接苗试验。每组试验重复 3 次以提高统计可靠性。



图13 高速移栽机同步接苗试验

Fig. 13 High speed transplanting machine soil slot transplanting test

4.3 试验测量

在试验过程中观察到, 自动控制系统控制所有机构协同配合, 完成了高速取苗-无停顿快速投苗-同步接苗和高速移栽作业。当高速移栽机停机时, 自动控制系统暂停供盘操作和下压取苗动作, 并在机器再次前进时从暂停位置恢复运行。3 种不同取苗频率 (120、150、180 株/min) 同步接苗效果如图 14 所示。

4.4 试验结果

高速移栽机 3 种取苗频率下同步接苗性能试验结果见表 5。当将取苗频率从 120 株/min 升至 180 株/min 时, 同步接苗成功率 Q_{JM} 由 97.3% 下降



图14 不同频率下同步接苗状态

Fig. 14 Effects of synchronized seedling catching at frequencies of 120, 150, 180 seedlings/min

表5 同步接苗试验结果

Tab. 5 Results of synchronous seedling catching test

取苗频率/(株·min ⁻¹)	序号	N_{QM} /株	N_{JM} /株	Q_{JM} /%
120	1	120	118	98.3
	2	120	118	98.3
	3	120	114	95.0
	平均值	120	116.7	97.3
150	1	120	116	96.7
	2	120	117	97.5
	3	120	116	96.7
	平均值	120	116.3	96.9
180	1	120	117	97.5
	2	120	113	97.3
	3	120	117	94.2
	平均值	120	115.7	96.4

至 96.4%。

4.5 分析和讨论

(1) 取苗频率变化对无停顿投苗运动影响较小, 取苗频率 (即吊杯旋转速度) 变化影响高速取投苗装置与吊杯运动正时匹配关系, 作业时需要根据取苗频率调整二者正时关系, 使吊杯同步接苗提前相位角向前或向后调整, 以保证吊杯同步接到穴盘苗。

(2) 试验中发现个别穴盘苗存在偏小或偏大情况, 弱苗根系发育不良, 苗钵抗破碎强度较弱, 导致与投苗漏斗斜壁碰撞时破损较多, 速度减缓程度偏

大;而偏大穴盘苗由于茎叶展宽较大且更加强韧(不易变形),穿孔阻力增加,导致穴盘苗下落速度减慢,与正常苗接苗时间差异较大,“延时”投苗,无法在吊杯同步接苗前后相位角范围内成功投入接苗杯,导致漏栽或者投入下一个吊杯重栽。穴盘苗运动速度稳定性受穴盘苗秧苗素质影响。因此,育出整齐均匀、秧苗素质一致且茎叶展宽适中的穴盘苗有利于提高同步接苗效果。

(3)在较高吊杯运动速度下(取苗频率大于等于120株/min),吊杯接苗极限相位角范围缩小,要求各装置时空匹配和穴盘苗运动更加精准衔接。当秧苗素质较强或较弱的穴盘苗在下落和碰撞后运动速度较慢,可能错过接苗极限相位角范围,从而导致接苗失败。

(4)针对这些问题,提出以下改进建议:首先,在育苗环节中,应提高秧苗育苗品质一致性。同时,

需要优化投苗斗和接苗杯尺寸以及二者空间布局关系等参数,优化零速栽植结构,扩大吊杯接苗极限位置相位角范围,以提高对秧苗素质差异造成“延时”投苗的同步接苗能力,从而提高接苗成功率。

5 结论

(1)根据高速取投苗装置与吊杯空间布局相对位置,建立了吊杯准确接到穴盘苗条件,通过对高速摄影图像处理,获得穴盘苗位移、时间数据,建立无停顿快速抛投穴盘苗运动方程。通过接苗时间,给出吊杯接苗相位角和提前相位角计算公式,得到取苗频率120、150、180株/min时同步接苗吊杯提前相位角范围 $[\theta_{qt}, \theta_{ht}]$ 。

(2)同步接苗试验结果表明,接苗成功率随着栽植频率增加而降低,取苗频率为180株/min时,接苗成功率为96.4%。

参 考 文 献

- [1] 徐金苏,赵匀. 基于ADAMS和ANSYS的辣椒移栽机构的力学仿真与应力分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(5): 731-733.
XU Jinsu, ZHAO Yun. Dynamic analysis of chilli block seeding transplanter baesd on ANSYS and ADAMS[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2009, 26(5): 731-733. (in Chinese)
- [2] 姬江涛,郑洽华,贺智涛,等. 2ZY-B1型烟草移栽机设计与运动仿真[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(4): 22-25.
JI Jiangtao, ZHENG Zhihua, HE Zhitao, et al. Design and simulation of 2ZY-B1 tobacco transplanting mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(4): 22-25. (in Chinese)
- [3] 向伟,吴明亮,徐玉娟. 幼苗移栽机械研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 6-9.
XIANG Wei, WU Mingliang, XU Yujuan. A fast method of stability prediction for variable pitch cutter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 6-9. (in Chinese)
- [4] 肖体琼,崔思远,陈永生,等. 我国蔬菜生产概况及机械化发展现状[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 107-111.
XIAO Tiqiong, CUI Siyuan, CHEN Yongsheng, et al. Development status of vegetable production and its mechanization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 107-111. (in Chinese)
- [5] JIN Xin, LI Mingyong, LI Daoyi, et al. Development of automatic conveying system for vegetable seedlings[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018: 1-9.
- [6] ZHAO Shengyi, LEI Xiaojie, LIU Jizhan, et al. Transient multi-indicator detection for seedling sorting in high-speed transplanting based on a lightweight model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107996.
- [7] 张健. 蔬菜移栽机取送苗控制系统设计及研究[D]. 成都:西南大学, 2018.
ZHANG Jian. Design and research of control system for picking and delivering seedlings of vegetable transplanter[D]. Chengdu: Southwest University, 2018. (in Chinese)
- [8] 于向涛,胡良龙,胡志超,等. 我国旱地移栽机械概况与发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 614-616.
YU Xiangtao, HU Lianglong, HU Zhichao, et al. Development trend and general situation of nonirrigated farmland transplanting mechanization in China[J]. Journal of Anhui Agri., 2012, 40(1): 614-616. (in Chinese)
- [9] 陶仁,程献丽,高富强. 国内外旱地移植机械化发展及现状分析[J]. 农业科技与装备, 2016(3): 40-42.
TAO Ren, CHENG Xianli, GAO Fuqiang. Analysis on the development and status of dry land transplanting mechanization at home and abroad[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2016(3): 40-42. (in Chinese)
- [10] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 1-18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1-18. (in Chinese)
- [11] HU Jianping, YAN Xiaoyue, MA Jun, et al. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 107: 64-72.
- [12] YANG Qizhi, XU Li, SHI Xinyi, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 131-145.
- [13] YANG Qizhi, HUANG Guanlong, SHI Xinyi, et al. Design of a control system for a mini-automatic transplanting machine of plug seedling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105226.
- [14] 陈永生,刘先才,韩柏和,等. 2020年中国蔬菜生产机械化发展报告[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 1-9.
CHEN Yongsheng, LIU Xiancai, HAN Bohe, et al. Development report of China vegetable production mechanization in 2020

- [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 1-9. (in Chinese)
- [15] 袁挺,张宇,尹金亮,等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 116-125.
YUAN Ting, ZHANG Yu, YIN Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined structure of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 116-125. (in Chinese)
- [16] 俞高红,李成虎,汪应萍,等. 小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 96-105.
YU Gaohong, LI Chenghu, WANG Yingping, et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 96-105. (in Chinese)
- [17] 俞高红,王系林,刘建刚,等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 94-103.
YU Gaohong, WANG Xilin, LIU Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 94-103. (in Chinese)
- [18] 颜华,刘冲,李鹏斌,等. 蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 71-81.
YAN Hua, LIU Chong, LI Pengbin, et al. Design and experiment of duckbill planting device with adjustable static trajectory for planting vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 71-81. (in Chinese)
- [19] 周海丽,杨伟,俞高红,等. 蔬菜钵苗移栽机开沟式多杆植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 79-86.
ZHOU Haili, YANG Wei, YU Gaohong, et al. Optimization design and experiments of ditching multi-bar seedling planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 79-86. (in Chinese)
- [20] 崔志超,管春松,徐陶,等. 甘蓝基质块苗移栽机双排链式栽植装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 46-54.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, XU Tao, et al. Design and experiment of double-row chain planting device for cabbage substrate block seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 46-54. (in Chinese)
- [21] 胡显威,韩长杰. 国内外自动移栽机的研究现状及发展建议[J]. 南方农机, 2020, 51(16): 4,79.
- [22] 李祥,李旭英,曾繁地,等. 链排式喂苗机构抛投穴盘苗运动分析与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(11): 171-176.
LI Xiang, LI Xuying, ZENG Fandi, et al. Analysis and test of the movement of cast-in-hole seedling in chain row feeding mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 171-176. (in Chinese)
- [23] 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, CHANG 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)
- [24] 金旭,李旭英,曾繁地,等. 链排式喂苗机构与栽植器时空匹配关系的研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 125-130.
JIN Xu, LI Xuying, ZENG Fandi, et al. Study on the matching relationship between time-space matching of chain-row feeding mechanism and planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 125-130. (in Chinese)
- [25] 曾繁地,李旭英,李祥,等. 基于高速摄影技术穴盘苗抛投运动试验与分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 168-176.
ZENG Fandi, LI Xuying, LI Xiang, et al. Experiment and analysis of high-speed photographic techniques for throwing motion of seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(9): 168-176. (in Chinese)
- [26] 王超,李永磊,宋建农,等. 气动下压式高速移栽机自动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 114-125.
WANG Chao, LI Yonglei, SONG Jiannong, et al. Design and test of automatic control system of pneumatic ejecting type high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 114-125. (in Chinese)
- [27] 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.
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. (in Chinese)
- [28] 崔巍,赵亮,颜华,等. 两种吊杯栽植器性能对比[J]. 农业工程, 2015, 5(3): 1-4.
CUI Wei, ZHAO Liang, YAN Hua, et al. Performance comparison of two types dibble planting devices[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(3): 1-4. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 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)