

蔬菜密植移栽斜置式自动取投苗装置设计与试验

白晓虎^{1,2} 杜国静¹ 张子浩¹ 邱 硕¹ 赵 博¹ 田素博^{1,2}

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室, 沈阳 110866)

摘要: 针对密植蔬菜半自动移栽作业效率低的问题, 本文设计一种用于 A5-1200 型高密度移栽机斜置式自动取投苗装置。钵苗盘和取投臂均与水平方向倾斜 45° 布置, 取投苗爪在取苗位置和投苗位置之间直线往复运动, 缩短了取苗行程。取投苗爪在取投臂上的安装位置固定, 与钵苗间距和投苗杯间距对应, 省略了分苗环节。钵苗盘移位机构通过横向移动和纵向移动将钵苗输送到取苗位置, 实现整排间隔取苗。传动部件采用滚珠丝杠模组, 驱动采用步进电机, 以 PLC 为控制器, 实现了运动位置精确控制。通过单因素试验分析取投臂回程速度、取投苗爪插入深度和取投苗爪入土角对取投苗效果的影响规律, 设计 Box-Behnken 响应面试验确定最优工作参数。试验结果表明, 当取投臂回程速度为 300 mm/s、取投苗爪插入深度为 31 mm、取投苗爪入土角为 10° 时, 实际取投成功率为 97.0%。配备斜置式自动取投苗装置后, A5-1200 型高密度移栽机栽植能力可达到 7 200 株/h, 满足密植移栽技术要求。

关键词: 移栽机; 密植移栽; 斜置式; 取投苗装置; 移位机构

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0300-09

OSID:



Design and Experiment of Oblique Automatic Seedling Picking and Throwing Device for Vegetable Dense Transplanting

BAI Xiaohu^{1,2} DU Guojing¹ ZHANG Zihao¹ QIU Shuo¹ ZHAO Bo¹ TIAN Subo^{1,2}

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Key Laboratory of Horticultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China)

Abstract: According to agronomic requirements, most leafy vegetables adopt a dense transplanting mode with a plant spacing and row spacing of less than 200 mm. However, the automatic seedling picking and throwing devices developed domestically are mostly suitable for transplanting with large plant spacing and row spacing. The gantry arm type seedling picking and throwing device can replace manual operations, but due to the long movement path of the seedling picking claws, the speed of seedling picking and throwing is slow. Therefore, this structure cannot meet the requirements of dense transplanting of vegetables. For the A5-1200 semi-automatic high-density transplanter, an oblique automatic seedling picking and throwing device was designed to address the issue of low transplanting efficiency. The device consisted of a seedling tray displacing mechanism, a picking and throwing arm, and eight claws. The seedling tray and the arm were both arranged at a 45° angle to the horizontal direction, and the claws moved back and forth in a straight line between the seedling picking position and the feeding position, shortening the seedling picking stroke. The installation positions of the claws on the picking and throwing arm were fixed, corresponding to the distance between the seedlings and the distance between the seedling feeding cup, omitting the seedling separation step. The orderly and smoothly operation process was ensured by the PLC control system. The ball screw module was driven by the closed-loop stepper motor in the transmission parts for both the picking and throwing arm and the seedling tray displacing mechanism. To realize the whole row interval seedling picking, the tray displacing mechanism completed a single action within 1 s, moved the seedling tray in the horizontal and longitudinal directions, and located the position of the seedlings precisely. The influences of the return speed of picking and throwing

收稿日期: 2024-12-13 修回日期: 2025-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000300)和辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2413011)

作者简介: 白晓虎(1976—),男,副教授,主要从事蔬菜生产智能农机装备研究,E-mail: baixiaohu@syau.edu.cn

通信作者: 田素博(1973—),女,教授,博士,主要从事蔬菜生产智能农机装备研究,E-mail: tiansubo@syau.edu.cn

arm, the insertion depth and the penetration angle of claw on the picking and throwing effect were analyzed. The Box - Behnken response surface experiments were designed to optimize the working parameters. The results showed that when the return speed of the picking and throwing arm was 300 mm/s, the insertion depth of claw was 31 mm, and the penetration angle of claw was 10°, the actual success rate of picking and throwing was 97.0%. Equipped with the oblique automatic taking and throwing device, the A5 - 1200 transplanter had a theoretical transplanting capacity of 7 200 plants/h, which met the technical requirements of dense transplanting.

Key words: transplanter; dense transplanting; oblique type; picking and throwing device; seedling tray displacing mechanism

0 引言

蔬菜产业是我国第二大农业支柱产业,在促进农业结构调整、保障市场供应、优化居民饮食结构等方面作用显著^[1-2]。据统计,目前采用先育苗、后移栽方式种植的蔬菜占蔬菜种植总量 60% 以上,其中劳动力成本占蔬菜生产总成本 50% 以上^[3]。因此,提高蔬菜种植机械化水平、研发钵苗全自动移栽机是实现蔬菜产业良性持续发展的必由之路。

针对钵苗全自动移栽机设计,欧美国家多采用大型化和机电液一体化,而日韩则采取小型化和纯机械化^[4-6]。自动取投苗装置是全自动移栽机关键部件,目前总体处于样机试制阶段^[7-11]。韩长杰等^[12]设计了整排取苗、弧形展开投苗的自动取投苗装置,确定夹苗组件、导向槽、旋转接苗机构关键参数。通过执行单元气动回路和匹配延时函数,可主动匹配取投苗频率。陈斌等^[13]针对对置可弯曲秧盘,研制了一种曲柄摇杆附加直线气缸的交替自动取投苗机构,通过建立秧苗夹持点轨迹方程,分析关键因素对秧苗夹持点运动轨迹的影响。HAN 等^[14]设计了一款高速移栽机,通过齿轮驱动传动机构,末端执行器沿导向槽设定的轨迹实现取苗和投苗作业。田间栽植频率由 40 株/min 升至 120 株/min,栽植指标(株距变异系数、漏播率、直立度、合格率)满足 JB/T 10291—2013 标准^[15]。

根据农艺要求,大多数叶菜类蔬菜选择栽植株距与行距均小于 200 mm 的密植移栽模式,但国内研发的自动取投苗装置多适用大株距、大行距移栽^[16-18]。根据小青菜钵苗密植要求,俞高红等^[19-20]提出了降低传动误差的大重合度非圆齿轮传动机构,设计取苗轨迹和非圆齿轮行星轮系 8 行同步取苗机构。

为实现设施装备轻简化,文献[21-23]根据取投苗爪在抓苗、投苗过程中的运动路径,取投臂采用龙门式结构,由水平传动部件带动取投臂实现水平方向运动,由垂直传动部件带动取投臂实现垂直方向运动,保证了取投臂在取苗位和投苗位之间的循

环往复。这种结构能够代替人工投苗作业,提高移栽作业效率,但由于取投苗爪运动路径长,导致取投苗速度较慢,难以满足蔬菜密植移栽要求。采用取投苗爪斜插夹钵方式,可以减少其运动路径,缩短取投苗周期^[24]。针对 A5 - 1200 型蔬菜半自动高密度移栽机,本文设计一种斜置式自动取投苗装置,以生菜钵苗为试验对象,验证取投苗效果,完成装置工作参数优化,以期全自动蔬菜密植移栽机研究提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

A5 - 1200 型蔬菜高密度移栽机工作垄宽为 1 200 mm,栽植株距为 140 mm,行距为 150 mm,可实现 8 行同时移栽。作业时需 2 人同时将 8 棵钵苗投入栽植器中,最大栽植效率 4 000 株/h^[25]。设计的自动取投苗装置,可安装在该移栽机上,如图 1 所示。栽植部分包括投苗杯、栽植鸭嘴等,完成栽植作业。自动取投苗装置包括取投臂机构、钵苗盘移位机构、取投苗爪、导苗筒、连接架等。取投臂机构和钵苗盘移位机构均采用丝杠模组传动和步进电机驱动,传动平稳,定位准确,可实现精准取投苗作业。钵苗盘与水平面倾斜 45°布置,取投苗爪沿与水平面夹角 45°方向运动,二者互相垂直,可缩短取投苗路程,提高作业效率。

1.2 工作原理

斜置式取投苗装置采取整排间歇式取投苗方式,取消了取投苗爪合并取苗、展开投苗复杂动作,提高了效率。作业前,两盘钵苗横向放置在钵苗盘固定架上,取投臂机构与钵苗盘移位机构位于初始位置。取投臂上安装有 8 个夹钵式取投苗爪,4 个为 1 组,对应 1 个钵苗盘进行取投苗作业。工作时,取投臂机构带动取投苗爪向取苗位置运动,至钵苗盘上方 5 mm 处停止。电动推杆伸出,取投苗爪插入苗钵。随后,取投臂机构带动取投苗爪运动到投苗位置,当栽植机构到达接苗位置后,电动推杆缩回,取投苗爪离开苗钵,钵苗在重力作用下落入移栽

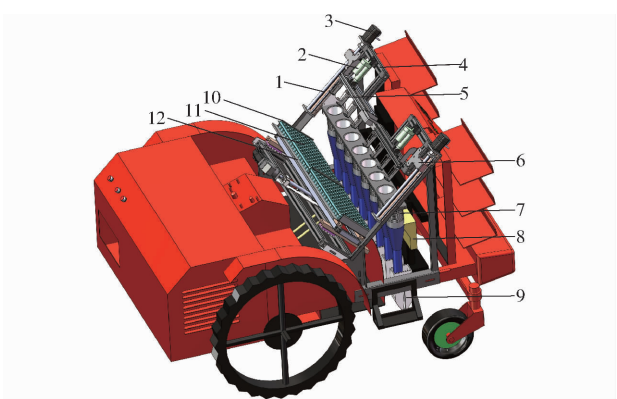


图1 安装有取投苗装置的 A5-1200 型蔬菜高密度移栽机结构图

Fig.1 Structure schematic of A5-1200 high density vegetable transplanter equipped with seedling picking and throwing device

1. 取投臂丝杠模组 2. 电动推杆 3. 取投臂驱动电机 4. 取投臂 5. 取投苗爪 6. 连接架 7. 导苗筒 8. 投苗杯 9. 栽植鸭嘴 10. 钵苗盘固定架 11. 钵苗盘 12. 钵苗盘移位机构

机投苗杯中。

单个钵苗盘横向放置时,共有 8 行 16 列钵苗孔。初始位置时,4 个取投苗爪对应第 1 行的第 1、5、9、13 列钵苗孔。取完上述 4 株钵苗后,钵苗盘向左横向移动 1 次,4 个取投苗爪对应第 1 行第 2、6、10、14 列钵苗孔。同理,4 个取投苗爪随后对第 1 行的第 3、7、11、15 列及第 4、8、12、16 列进行取苗作业。第 1 行钵苗全部取出后,钵苗盘纵向移动 1 次,此时 4 个取投苗爪与第 2 行的第 4、8、12、16 列钵苗孔相对应。对第 2 行进行取苗时,钵苗盘需要向右横向移动 3 次。钵苗盘取苗顺序与路径见图 2,取完整钵苗需横向移位 21 次、纵向移位 7 次。

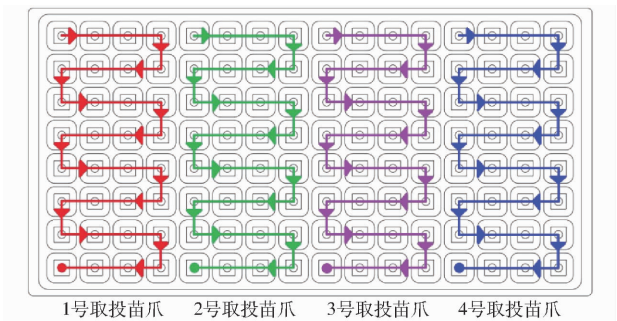


图2 钵苗盘取苗顺序与路径

Fig.2 Seedling picking order and path of seedling tray

2 关键部件设计

2.1 钵苗盘移位机构设计

钵苗盘移位机构由闭环步进电机、减速器、横向移位传动部件、纵向移位传动部件、导轨滑块、钵苗盘固定架和铝型材支撑架组成,如图 3 所示。横向移位和纵向移位选用滚珠丝杠模组进行传动,摩擦

阻力小,精度高,传动效率高。为防止自锁力不足出现打滑现象,动力选用带刹车功能的闭环步进电机及 1:100 减速器。横向移位传动部件采用 SFV1610-4 型滚珠丝杠模组,外径 16 mm、导程 10 mm。横向移位传动部件向一侧移动 3 次,将一行钵苗取完,丝杠工作行程为 96 mm。纵向移位传动部件采用 SFE2020-6 型滚珠丝杠模组,外径 20 mm、导程 20 mm。每行取完后,纵向移位传动部件向前移动 1 次,进行下一行取苗操作,移动 7 次后整盘苗取苗结束,丝杠工作行程为 224 mm。

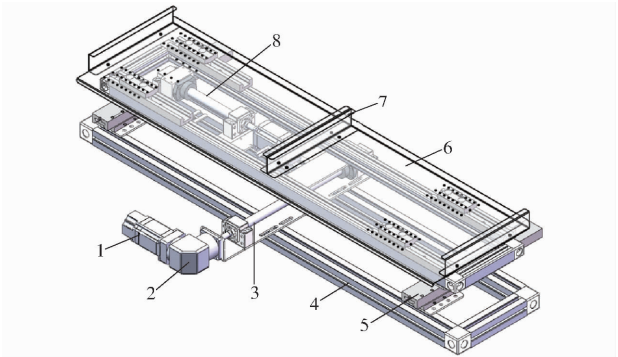


图3 钵苗盘移位机构结构图

Fig.3 Structure schematic of seedling tray displacing mechanism

1. 闭环步进电机 2. 减速器 3. 纵向移位传动部件 4. 铝型材支撑架 5. 导轨滑块 6. 钵苗盘托板 7. 钵苗盘固定架 8. 横向移位传动部件

整盘苗取苗结束后,在取投苗爪等待栽植机构到达接苗位置过程中,钵苗盘移位机构带动钵苗盘固定架回到初始位置,2 人先取下空苗盘,然后重新放置 2 盘苗后开始下一轮取投苗,保证移栽作业连续性。

2.2 取投臂机构设计

取投臂机构由丝杠模组、连接架、驱动电机、导轨滑块、电动推杆、导苗筒和支撑架等组成,如图 4 所示。A5-1200 型蔬菜高密度移栽机栽植机构单次作业耗时 4 s,取投臂传动部件往返时间应少于 1.5 s,取苗位置到投苗位置行程距离为 210 mm。传动部件采用 SFV1610-4 型滚珠丝杠模组,外径 16 mm、导程 10 mm,上端装有零位传感器。模组滑台向投苗位置移动时,会触碰到零位传感器,闭环步进电机减速至停止运动。模组滑台向取苗位置移动时,控制闭环步进电机脉冲频率及脉冲个数,保证滑台运动精度。

取投臂机构支撑架与水平方向夹角为 45°,保证取投苗时工作部件在取苗位置和投苗位置之间的直线往复运动,缩短取苗行程。8 个取投苗爪分成 2 组,安装在取投臂上,每组对 1 个穴盘进行整排间隔

取苗。128 穴钵苗盘长 530 mm，宽 278 mm，相邻钵苗孔中心距 32 mm，因此每组内取投苗爪间距为 128 mm，第 4 个和第 5 个取投苗爪间距为 138 mm，确保 8 个取投苗爪取苗时与钵苗孔位置对应，投苗时与导苗筒位置对应。

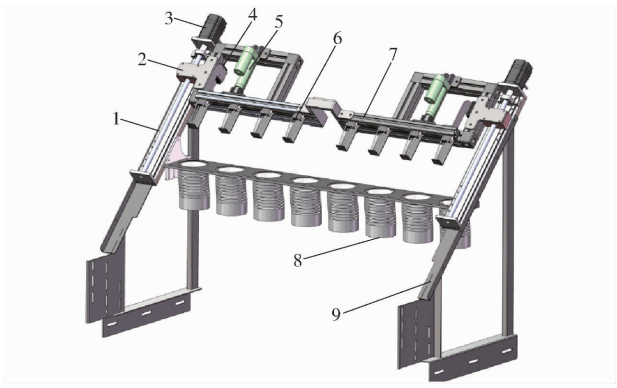


图 4 取投臂机构结构图

Fig. 4 Structure schematic of picking and throwing arm mechanism

1. 丝杠模组 2. 连接架 3. 驱动电机 4. 导轨滑块 5. 电动推杆 6. 取投苗爪 7. 取投臂 8. 导苗筒 9. 倾斜支撑架

2.3 夹钵式取投苗爪设计

基于生菜钵苗叶展大、茎秆短等特点，设计了夹钵式取投苗爪，采取两指四针结构^[26]。夹钵式取投苗爪由工字形连接件、压板、夹取针和夹取针导向板组成，见图 5。夹取针材料选择结构钢，耐磨性和弹性好，可减小对苗钵根系与叶片的损伤。将直径 2 mm 的钢丝弯折，形成 2 个夹取针，每个夹取针长 93 mm，两针相距 20 mm。工字形连接件固定于 30 mm × 30 mm 铝型材上，与电动推杆连接。夹取针安装在工字形连接件两侧的凹槽中，可以凹槽为中心转动。夹取针导向板安装在 40 mm × 40 mm 铝型材上，固定不动。电动推杆伸出时，工字形连接件带动夹取针向下运动扎入苗钵，同时在夹取针导向板作用下，夹取针向内转动夹紧苗钵。电动推杆缩回时，夹取针随着工字形连接件一起向上运动，导向板下部将钵苗推下，完成投苗动作。改变夹取针导向板上针孔横向间距可调整取投苗爪入土角度，改变电动推杆行程可调整取投苗爪插入深度。

2.4 控制系统设计

控制系统由西门子 S7-200 SMART 型 PLC、电源、控制模块、检测模块、驱动模块和执行模块组成，控制系统电气原理图见图 6。S7-200 SMART 型 PLC 有 24 个输入端子、16 个输出端子（含 3 个高速脉冲输出端子），采用晶体管输出，输入电压为 DC 24 V。

48 V 锂电池是斜置式取投苗装置的动力源，通过降压模块降为 24 V 来驱动 PLC、闭环步进电机、

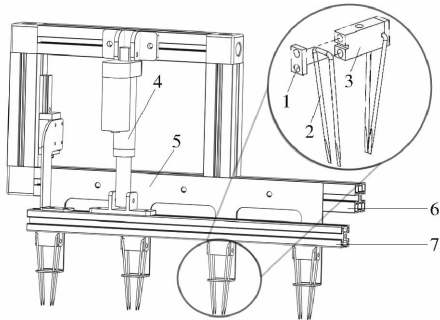


图 5 夹钵式取投苗爪结构图

Fig. 5 Structure schematic of picking and throwing claw

1. 压板 2. 夹取针 3. 工字形连接件 4. 电动推杆 5. 夹取针导向板 6. 40 mm × 40 mm 铝型材 7. 30 mm × 30 mm 铝型材

传感器等其他硬件。PLC 信号输入端与栽植机构的位置检测传感器连接，其信号输出端与栽植机构工作接收信号端连接，以实现取投苗装置与栽植机构的协调动作。

梯形图用该型号 PLC 专用软件 STEP 7-Micro WIN SMART 编写，以实现取投苗工作逻辑控制、输入和输出端口分配和闭环步进电机及电动推杆控制。根据作业要求，整个装置包括 8 个运动输入工况，9 个运动输出工况。由按钮和传感器作为输入点，闭环步进电机和电动推杆作为输出点，输入输出地址分配见表 1。控制程序流程见图 7。

3 样机试验

3.1 试验条件

选择苗龄 35 d 的 128 穴生菜苗为试验对象，苗钵由珍珠岩、蛭石和泥炭按体积比 1:3:6 混合而成，含水率约为 50%。每组单因素试验用 2 盘钵苗，共完成 6 盘钵苗取投苗作业。斜置式取投苗装置与 A5-1200 型蔬菜高密度半自动移栽机装配作为试验样机，见图 8。试验于滁州禾田农业机械有限公司试验基地进行，试验前完成旋耕整地与起垄。

3.2 试验因素和指标

取投臂机构工作参数影响取苗、投苗效果。取投臂回程速度影响投苗位置取投苗爪承受的振动冲击，打破苗钵受力平衡。取投苗爪插入深度和入土角会决定夹取针与苗钵的作用面积、夹取针运动轨迹和对苗钵内根系的损伤^[27]。

选择取投臂回程速度、取投苗爪插入深度和入土角为试验因素，以取投成功率为试验指标。离开钵苗盘时苗钵完整、投苗位置苗钵未破碎、投苗时落入投苗杯视为取投作业成功。取投成功率 S 、取苗失败率 F_p 和投苗失败率 F_t 计算式为

$$S = \frac{256 - P - T}{256} \times 100\% \quad (1)$$

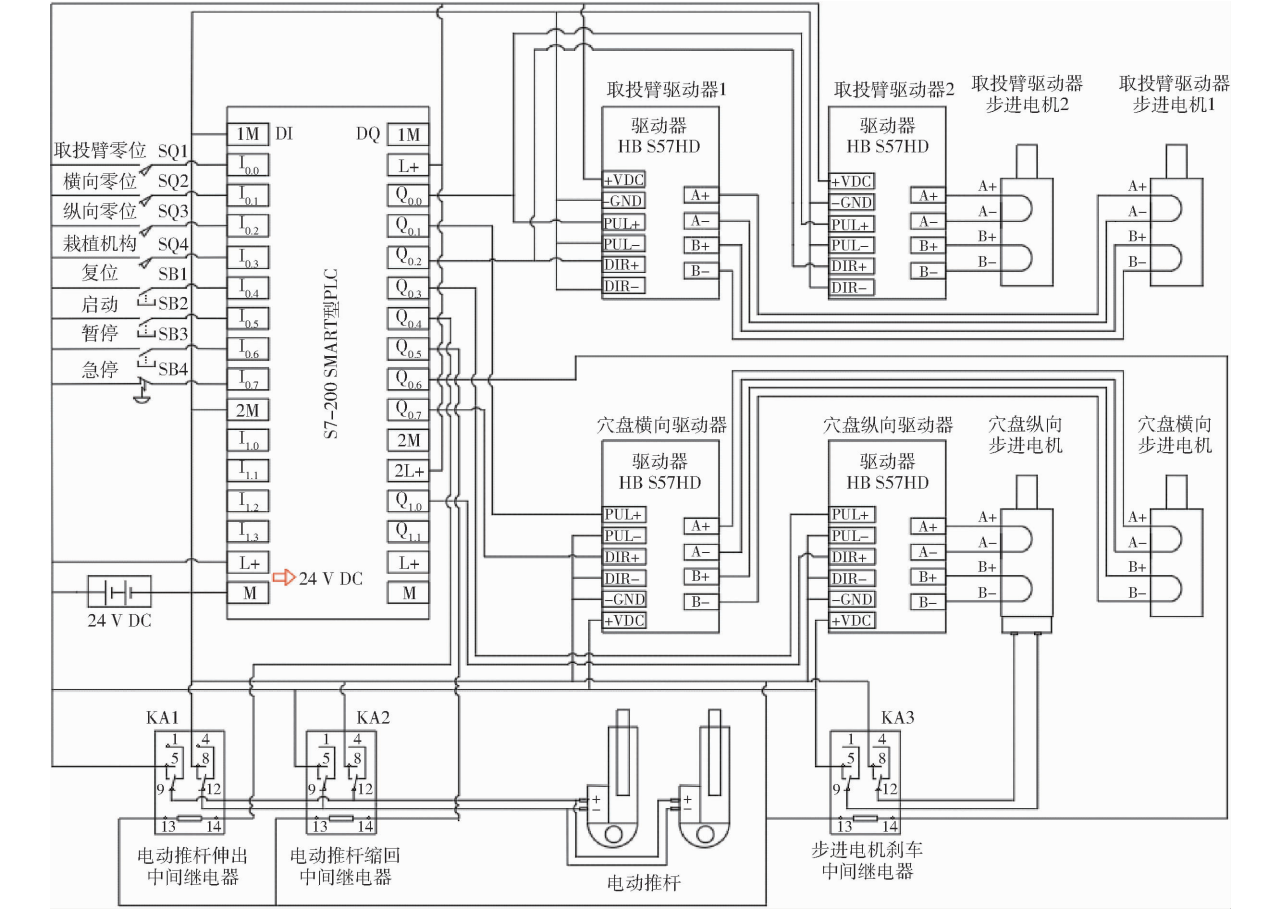


图 6 控制系统电气原理图

Fig.6 Electrical schematic of control system

表 1 输入输出地址分配

Tab.1 I/O address assignment

输入地址	工作状态	输出地址	工作状态
I _{0.0}	取投臂机构传动部件闭环步进电机零位信号	Q _{0.0}	取投臂机构传动部件闭环步进电机脉冲信号
I _{0.1}	钵苗盘移位机构横向闭环步进电机零位信号	Q _{0.1}	钵苗盘移位机构横向闭环步进电机脉冲信号
I _{0.2}	钵苗盘移位机构纵向闭环步进电机零位信号	Q _{0.2}	取投臂机构传动部件闭环步进电机方向信号
I _{0.3}	栽植机构往返信号	Q _{0.3}	钵苗盘移位机构纵向闭环步进电机脉冲信号
I _{0.4}	复位信号	Q _{0.4}	取投臂机构传动部件电动推杆伸出信号
I _{0.5}	启动信号	Q _{0.5}	取投臂机构传动部件电动推杆缩回信号
I _{0.6}	暂停信号	Q _{0.6}	钵苗盘移位机构纵向闭环步进电机刹车信号
I _{0.7}	急停信号	Q _{0.7}	钵苗盘移位机构横向闭环步进电机方向信号
		Q _{1.0}	钵苗盘移位机构纵向闭环步进电机方向信号

$$F_p = \frac{P}{256} \times 100\% \tag{2}$$

$$F_t = \frac{T}{256 - P} \times 100\% \tag{3}$$

式中 P ——取苗时苗钵未离开钵苗盘株数
 T ——投苗位置苗钵已破碎或脱落株数

3.3 单因素试验

取投苗爪插入深度取 28 cm,入土角取 9.0°,调整闭环步进电机转速,选取取投臂回程速度为 280、290、300、310、325、335、350 mm/s 时进行试验,结果见图 9a。取苗时,苗钵脱离钵苗盘所需时间很短,

回程速度增加对取苗效果基本没有影响。但回程速度过高,取投臂振动和惯性加大,使得取投苗爪对苗钵的作用力增加,苗钵容易破坏,超过 310 mm/s 时投苗失败率显著增加。因此,取投臂回程速度为 280 ~ 310 mm/s。

取投臂回程速度取 310 mm/s,取投苗爪入土角取 9.0°,调整电动推杆行程,选取取投苗爪插入深度为 22、24、26、28、30、32、34 mm 时进行试验,结果见图 9b。当插入深度过小(≤24 mm)时,取苗失败率和投苗失败率均过高。其原因是由于取投苗爪拉拔力与夹取针和苗钵接触面积有关,插入深度小,接

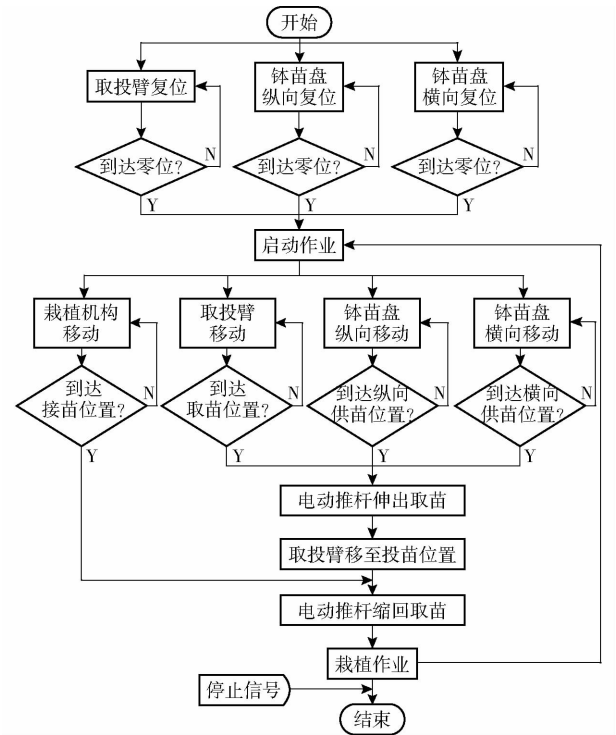


图 7 控制程序流程

Fig. 7 Flow chart of control program

触面积小,导致拉拔力小,苗钵无法克服与钵苗盘之间的粘附力而拔出,增加取苗失败率^[28]。另外,由



图 8 试验样机

Fig. 8 Experimental prototype

于插入深度小,苗钵在单位面积上受到夹取针的压力大,在机器振动作用下,苗钵容易破碎,增加投苗失败率。因此,取投苗爪插入深度为 26 ~ 32 mm。

取投臂回程速度为 310 mm/s,取投苗爪插入深度为 28 mm,调整夹取针孔横向间距,选取取投苗爪入土角为 6°、7°、8°、9°、10°、11°、12°进行试验,结果见图 9c。随着入土角逐渐增大,取苗失败率和投苗失败率均减小。入土角过小(≤7.0°)时,夹取针不能提供足够大的摩擦力,导致夹取针容易从苗钵中滑出,使得苗钵不能从钵苗盘中取出或向投苗位置运动时容易脱落。因此,取投苗爪入土角为 8° ~ 11°。

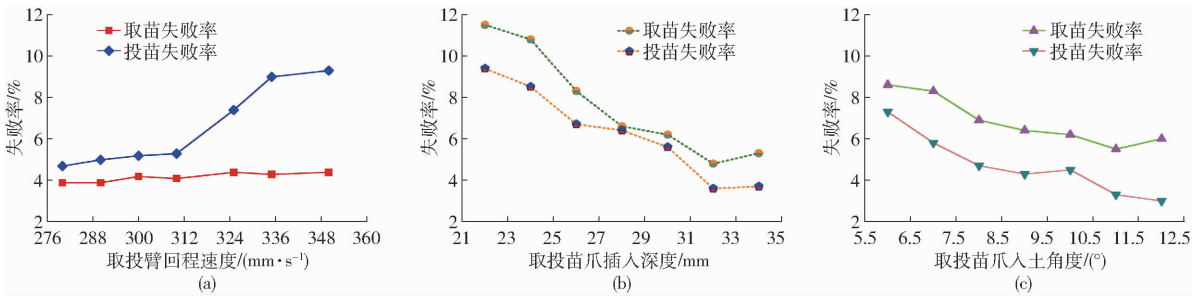


图 9 单因素试验结果

Fig. 9 Results of single factor tests

3.4 多因素试验

3.4.1 回归方程建立

为确定各因素的优化参数组合,采用 Design-Expert 13.0 软件 Box - Behnken 响应面分析法设计三因素三水平组合试验,共 17 组试验。因素水平编码见表 2,试验方案与结果见表 3, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值,方差分析结果见表 4。

表 2 因素水平编码

Tab.2 Coding of factors and levels

编码	因素		
	取投臂回程速度	取投苗爪插入深度	取投苗爪入土角
	$x_1 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	x_2 / mm	$x_3 / (^\circ)$
-1	280	26	8.0
0	295	29	9.5
1	310	32	11.0

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Test plan and results

试验序号	因素			取投成功率
	X_1	X_2	X_3	$S / \%$
1	-1	-1	0	92.4
2	1	-1	0	85.9
3	-1	1	0	94.0
4	1	1	0	95.5
5	-1	0	-1	90.0
6	1	0	-1	83.6
7	-1	0	1	91.2
8	1	0	1	95.0
9	0	-1	-1	88.8
10	0	1	-1	93.7
11	0	-1	1	92.8
12	0	1	1	97.3
13	0	0	0	92.9
14	0	0	0	93.5
15	0	0	0	94.5
16	0	0	0	93.8
17	0	0	0	95.7

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	194.50	9	21.61	17.08	0.000 6 **
<i>X</i> ₁	7.22	1	7.22	5.71	0.048 3 *
<i>X</i> ₂	53.04	1	53.04	41.92	0.000 3 **
<i>X</i> ₃	51.01	1	51.01	40.31	0.000 4 **
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	16.00	1	16.00	12.64	0.009 3 **
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	26.01	1	26.01	20.55	0.002 7 **
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	1.07	1	1.07	0.84	0.863 9
<i>X</i> ₁ ²	29.90	1	29.90	23.63	0.001 8 **
<i>X</i> ₂ ²	1.21	1	1.21	0.95	0.361 6
<i>X</i> ₃ ²	9.04	1	9.04	7.14	0.031 9 *
残差	8.86	7	1.27		
失拟	4.25	3	1.42	1.23	0.408 3
误差项	4.61	4	1.15		
总误差	203.36	16			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

对回归模型进行显著性分析,回归模型 $P = 0.000\ 6 < 0.01$,失拟项 $P = 0.408\ 3 > 0.05$,说明此回归方程高度显著,可以用于取投成功率的优化分析。取投臂回程速度对取投成功率的影响显著,取投苗爪插入深度和入土角对取投成功率的影响极显著。取投臂回程速度和取投苗爪插入深度的交互作用、取投臂回程速度和取投苗爪入土角的交互作用对取投成功率的影响极显著,取投苗爪插入深度和入土角度的交互作用对取投成功率的影响不显著。在 $\alpha = 0.05$ 置信水平下剔除不显著项,得到回归方程为

$$S = 94.08 - 0.95X_1 + 2.57X_2 + 2.53X_3 + 2.00X_1X_2 + 2.55X_1X_3 - 2.66X_1^2 - 1.47X_3^2 \quad (4)$$

3.4.2 因素间交互作用响应面分析

基于各因素交互作用的显著性水平,采用 Origin 2019 软件绘制交互作用对取投成功率影响的响应曲面,见图 10。

由图 10a 可见,取投臂回程速度与取投苗爪插入深度变化时,取投成功率为 86.5% ~ 97.4%。取投苗爪插入深度为 26 ~ 28 mm 时,取投成功率随取投臂回程速度增加而降低,变化速度先慢后快。取投苗爪插入深度为 30 ~ 32 mm 时,取投成功率随取投臂回程速度增加先小幅上升然后下降,但总体变化趋势不明显。由图 10b 可见,取投臂回程速度和取投苗爪入土角变化时,取投成功率为 84.0% ~ 95.5%。当取投苗爪入土角较小时,取投成功率随取投臂回程速度增加明显下降。当取投臂回程速度较大时,取投成功率随取投苗爪入土角度的增加而升高的速度较快。当取投臂回程速度为 290 ~ 300 mm/s、取投苗爪入土角为 10° ~ 11°时,取投成

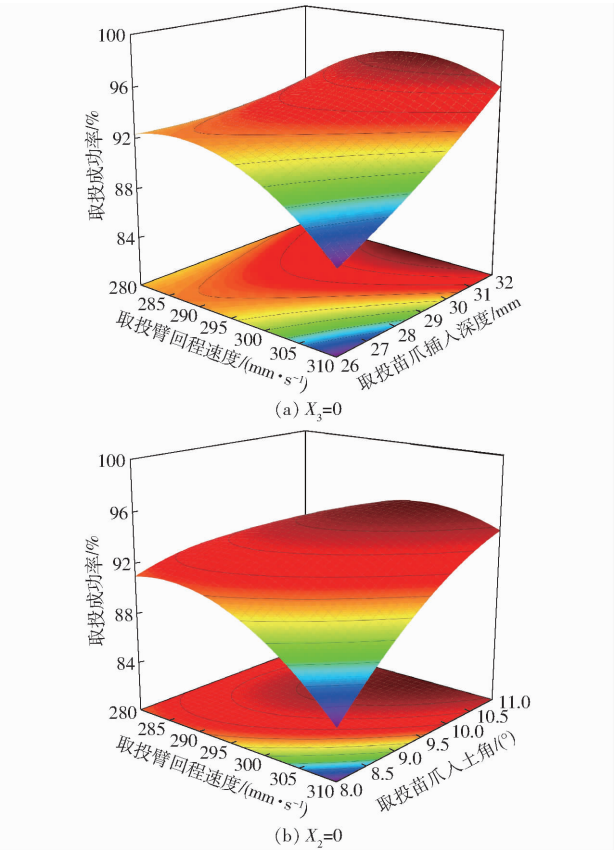


图 10 因素交互作用对取投成功率的影响

Fig. 10 Effects of interaction on success rate of seedling picking and throwing

功率在 95.0% 左右小幅变化。

3.5 优化分析与试验验证

以取投成功率 S 为试验优化目标,使用 Design-Expert 13.0 软件对取投臂回程速度、取投苗爪插入深度、取投苗爪入土角进行优化,目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max S \\ \text{s. t.} & \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

优化后结果为:取投臂回程速度为 300 mm/s、取投苗爪插入深度为 31 mm、取投苗爪入土角为 10° 时,取投成功率理论值为 96.6%。

对优化结果进行试验验证,5 组重复试验取投成功率分别为 96.5%、97.3%、96.9%、97.2% 和 97.0%,平均值 97.0%,与理论值差别不大,满足相关标准要求。此工况下,单次取投苗到栽植作业时间控制在 4 s 内,128 s 可完成 2 盘钵苗栽植作业。装备斜置式自动取投苗装置 A5-1200 型高密度蔬菜移栽机理论栽植频率可达 7 200 株/h,与 4 000 株/h 相比有明显提升。试验中传动部件前进和回程存在卡顿现象,说明 PLC 控制程序有较大改进空间。

4 结论

(1)针对 A5-1200 型蔬菜半自动高密度移栽机的农艺要求,设计了一种斜置夹钵式自动取投苗装置。取投臂机构实现苗钵直插式取投作业,通过省略分苗环节提高取投效率。钵苗盘通过移位机构实现横向与纵向的移动与定位,与取投臂机构精准配合。利用 PLC 完成该装置的控制系统设计,完成预设的钵苗取投至栽植全流程。

(2)以 128 穴规格的密植生菜苗为试验对象,通过多因素试验优化取投臂机构的传动部件和取投

苗爪的工作参数。以取投臂回程速度、取投苗爪插入深度和入土角为试验因素,探究取苗失败率、投苗失败率和取投成功率的变化规律。当取投臂回程速度为 300 mm/s、取投苗爪插入深度为 31 mm、取投苗爪入土角为 10°时,实际取投成功率为 97.0%,与理论值误差在接受范围内。

(3)装备斜置式自动取投苗装置 A5-1200 型高密度蔬菜移栽机单次取投苗到栽植作业时间可控制在 4 s 内,理论栽植能力达到 7 200 株/h,相比 4 000 株/h 的现有栽植频率提升明显,取投苗指标和栽植指标满足密植技术要求。

参 考 文 献

[1] 方紫妍,王天野,余璐,等. 新疆生产建设兵团蔬菜产业现状与高质量发展路径[J]. 中国蔬菜, 2024(5): 7-13.
FANG Ziyen, WANG Tianye, YU Lu, et al. Present situation of vegetable industry in Xinjiang Production and Construction Corps and pathway for its high-quality development[J]. China Vegetable, 2024(5): 7-13. (in Chinese)

[2] 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, 34.
CHEN Yongsheng, LIU Xiancai, HAN Baihe, et al. Development report of China vegetable production mechanization in 2020 [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 1-9, 34. (in Chinese)

[3] 王永维,何焯亮,王俊,等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[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)

[4] 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)

[5] 田志伟,马伟,杨其长,等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 22-38.
TIAN Zhiwei, MA Wei, YANG Qichang, et al. Research status and problem analysis of plug seedling transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22-38. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 张学东,崔巍,刘云强,等. 穴盘苗移栽自动取投苗技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 17-24.
ZHANG Xuedong, CUI Wei, LIU Yunqiang, et al. Research status and prospect of automatic seedling picking and dropping technology of plug seedling transplanting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(12): 17-24. (in Chinese)

[8] WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, TIAN Jinyuan, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.

[9] 张学东,刘立晶,宁义超,等. 蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 115-124, 134.
ZHANG Xuedong, LIU Lijing, NING Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clamping of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 115-124, 134. (in Chinese)

[10] YUE Rencai, HU Jianping, LIU Yijun, et al. Design and working parameter optimization of pneumatic reciprocating seedling-picking device of automatic transplanter[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 1989.

[11] ZHU Zhifang, WU Guohua, YE Bingliang, et al. Reverse design and tests of vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(2): 96-102.

[12] 韩长杰,周亭,尤佳,等. 蔬菜穴盘苗弧形展开式自动取投苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 54-64.
HAN Changjie, ZHOU Ting, YOU Jia, et al. Design and experiments of an arc expansion type automatic seedling taking and throwing device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8): 54-64. (in Chinese)

[13] 陈斌,胡广发,刘文,等. 蔬菜自动移栽机对置秧盘交替自动取投苗机构研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 131-139, 151.
CHEN Bin, HU Guangfa, LIU Wen, et al. Alternate automatic seedling picking and dropping mechanism based on

symmetrically arranged seedling trays for automatic vegetable transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 131–139, 151. (in Chinese)

[14] HAN Changjie, HU Xianwei, ZHANG Jing, et al. Design and testing of the mechanical picking function of a high-speed seedling auto-transplanter[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 5: 64–71.

[15] 全国农业机械标准化技术委员会. JB/T 10291—2013 旱地栽植机械[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[16] 王秀, 刘蒙滋, 翟长远, 等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 122–132. WANG Xiu, LIU Mengzi, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 122–132. (in Chinese)

[17] 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.

[18] YUE Rencai, YAO Mengjiao, ZHANG Tengfei, et al. Design and experiment of dual-row seedling pick-up device for high-speed automatic transplanting machine[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 942.

[19] 俞高红, 王系林, 刘建刚, 等. 蔬菜钵苗密植移栽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 for vegetable pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 94–103. (in Chinese)

[20] 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, 138. 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, 138. (in Chinese)

[21] 计东, 胡熙, 哲旋瑞, 等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 126–133. JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126–133. (in Chinese)

[22] 邱硕, 于博, 计东, 等. 辣椒苗夹茎式双排自动取投苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 115–121, 152. QIU Shuo, YU Bo, JI Dong, et al. Design and experiment of double row stem clipping type automatic picking and throwing device for pepper seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 54(3): 115–121, 152. (in Chinese)

[23] 田素博, 谢天, 王鹤锦, 等. 蔬菜移栽机可调式喂苗装置设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(3): 464–472. TIAN Subo, XIE Tian, WANG Hejin, et al. Design and experiment of adjustable seedling-feeding device for vegetable transplanting machine[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(3): 464–472. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 李静. 多行密植自动移栽机设计及分苗栽植技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022. LI Jing. Research on the design of the automatic transplanting machine and the seedling planting technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[26] 胡建平, 刘育彤, 刘伟, 等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 110–117. HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experiment on combined seedling picking device with top clamping and pulling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 110–117. (in Chinese)

[27] 胡建平, 潘杰, 陈凡, 等. 基于 EDEM-RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 75–85, 301. HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75–85, 301 (in Chinese)

[28] 徐静云. 基于苗钵-根系综合分析的取苗末端执行器及育苗工艺优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2017. XU Jingyun. Design of pick-up end effector and optimization of seedling cultivation based on seedling bowl-root multiple properties[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)