

植物工厂岩棉块种苗移植机移植部件设计与试验

童俊华^{1,2} 刘珂¹ 刘霓红³ 孙良^{1,4} 王小琴¹ NORUPIRI R Obedience¹

(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. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630; 4. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 目前植物工厂岩棉块种苗移植装备自动化程度低,作业时大多依赖于人工,劳动强度大,效率低。基于植物工厂水培叶菜种苗移植现状设计了一种二级变间距的高速移植部件,并配备有一种拨指式定植杯分离辅助机构。对移植手取苗过程中岩棉块种苗进行受力分析,为移植手设计提供依据;开展拨指式定植杯分离辅助机构落杯试验,为后续植苗至栽培槽孔的定植杯中奠定基础。搭建移植机构试验平台,以取苗深度、岩棉块含水率、移植部件横移速度、移植手升降速度、移植手夹苗间距为试验因素进行五因素三水平正交试验,通过方差分析各因素对移植成功率的影响。试验结果表明:当取苗深度为24 mm、岩棉块含水率为90%、移植部件横移速度为0.8 m/s、移植手升降速度为0.24 m/s、移植手夹苗间距为14 mm时,机构移植成功率为97.9%,移植速度为3 132株/h,能够满足高速、高效、稳定的植物工厂岩棉块叶菜种苗移植机械化作业的技术需求。

关键词: 移植机; 岩棉块种苗; 移植手; 植物工厂

中图分类号: S223.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0106-09

OSID:



Design and Test of Rock Wool Block Seedling Transplantation Mechanism in Plant Factory

TONG Junhua^{1,2} LIU Ke¹ LIU Nihong³ SUN Liang^{1,4} WANG Xiaoqin¹ NORUPIRI R Obedience¹

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

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting, Hangzhou 310018, China

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China

4. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Southeastern Hilly and Mountainous Areas, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The plant factory rock wool block seedling transplantation equipment has a low penetration rate at present, and most of the operation still relies on manual labor, which is labor-intensive and inefficient. A high-speed transplantation mechanism combining secondary variable spacing for hydroponic leafy vegetable seedlings in plant factories was designed, and it was also equipped with a finger-type planting cup separation mechanism. The stress analysis of rock wool block seedlings in the process of transplanting hand picking seedlings was carried out to provide basis for the design of transplanting hand. The drop cup test of the finger-type planting cup separation mechanism was carried out to lay the foundation for the subsequent planting of seedlings to the planting cup of the cultivation slot. The transplanting mechanism test bench was built, and the transplanting success rate was tested by five-factor three-level orthogonal test with the grasping seedling depth, water content of rock wool block, overall traverse speed, lifting speed, and clamping spacing as the test factors. The influence of each factor on the success rate index was analyzed by variance analysis. The test showed that the seedling depth was 24 mm, rock wool block water content was 90%, overall traverse speed was 0.8 m/s, lifting speed was 0.24 m/s, clamping spacing was 14 mm, the transplantation success rate of the mechanism was 97.9%, and the transplant speed reached 3 132 plants/h. which can meet the technical requirements of high-speed, high-efficiency and stable mechanized operation of rock wool block leaf vegetable seedling transplanting in plant factory.

Key words: transplanter; rock wool block seedling; end effector; plant factory

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000702)

作者简介: 童俊华(1984—),男,教授,博士,主要从事设施农业装备机电一体化技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn

通信作者: 孙良(1981—),男,教授,博士,主要从事农机机构分析与综合研究,E-mail: liangsun@zstu.edu.cn

0 引言

植物工厂是一种集约化的农业种植方式,可以人为地控制各种蔬菜最佳的生长环境,不受场地制约,采用循环营养液供给系统,提高了肥料利用率,能够全年稳定种植,是公认的设施农业最高发展阶段,植物工厂的发展水平也成为衡量一个国家农业技术水平的重要标志^[1]。但目前我国植物工厂机械化程度不高,移植机器多为半自动移植机,栽植作业仍然依赖人工完成,劳动强度大,植物工厂栽植机械化程度不高,尤其缺乏针对岩棉块种苗的全自动移植机构^[2-4],严重影响了植物工厂的作业效率和作业成本,因此开展具有高速、高效、稳定的岩棉块种苗全自动移植机的研发势在必行^[5]。

国外种苗移植机器研究较早,一些研发成熟的产品主要是通过末端执行器搭配成熟的工业机器人进行移植作业^[6]。TING 等^[7-9]设计了一种滑针式取苗末端执行器,搭配机械臂进行取苗作业,取苗成功率达到 95.4%,最高移植速度为 22.90 株/min,整体效率不高;荷兰 ISO Group 公司 (IG Agri Systems BV) 研发的固定道式基质块苗移栽机、法国 CR (CM&Regero) 公司研发的 R2010 型气动式基质块苗移栽机、意大利 Ferrari 公司的全自动种苗移栽机以及 Hortech 公司研究生产的种苗移栽机较为成熟^[10],研发的移栽机主要通过输送带、气动夹爪以及气动推杆进行相互配合,达到高速取苗-送苗-分苗的功能,自动化程度较高,但这几类产品整体动力大、价格高昂,并不适合我国农艺。近年来,随着人工成本的提高以及科学技术的快速发展,我国研究人员也致力于研发适合我国农艺以及种植模式的移植装备,在一定程度上实现了机械化,移植机搭配末端执行器也从单末端向多末端演化,但主要目标苗株以穴盘苗为主^[11-13]。韩绿化等^[14-15]设计了一种适用于 72/128 孔穴盘苗的轻简型温室穴盘苗自动移栽机,该移栽机搭配设计一种两指四针钳夹式取苗末端执行器进行取放苗作业,移栽作业时对于 72/128 孔取苗移栽速度分别为 17.09 株/min 和 20.34 株/min,平均取苗成功率为 90.7%,但所设计移栽机搭配单个末端执行器,整体移栽效率不高;黎波等^[16-17]设计了两种移植机械手,一种为铲式移植机械手,一种为伸缩针式移植机械手,作业对象为椰糠基质,通过分析,最终确定当移植手处于伸缩针入土角 76°、针直径 2.5 mm、伸缩针入土间距 36 mm 条件下时,移植成功率可达到 100%,但作业对象局限于椰糠基质,整体移植速度不高;胡建平等^[18]针对穴盘苗的栽植,设计了自走式移栽机行星轮转臂式

栽植机构,该机构每组栽植单体可以实现蔬菜的双行移栽,可以适应 3 种不同株距的移栽作业,蔬菜苗栽植率为 81%,但机器振动较大,影响了整体栽植稳定性;侯加林等^[19]设计了一种基于 DEM - MFBD 的辣椒钵苗移栽机,取苗方式为夹茎式,最佳条件下取苗成功率可达 97.92%,但该移栽机适用于根茎粗壮的钵苗,移栽对象有一定的局限性;崔志超等^[20]针对甘蓝基质块苗设计了一种双排链式栽植装置,通过配合种苗移栽机试验,得出倒伏率 3.35%、伤苗率 3.14%,但整体速度较低,无法实现高速作业;孟青新^[21]设计了一种适合小空间作业的可以进行二次夹紧的爪片式机械手,在机器搭配 12 个机械手进行共同移植作业情况下,移植成功率达 97.22%,移植速度为 3 956 株/h,一个作业循环需 10.92 s,机械手需要搭配弹性带进行变间距作业,无法实现自动变间距来适应不同作业对象育苗盘以及栽培板;俞高红等^[22]设计了一种适用于小青菜的非圆齿轮传动多行取苗机构,通过运动学分析以及自主开发的反求设计软件,确定最佳取苗轨迹,试验得出取苗机构取苗成功率为 95% 左右;周海丽等^[23]通过分析受力以及移植手刚柔耦合仿真设计了一种温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件,该移植部件通过 24 爪移植手搭配移栽机进行取放苗试验,最佳条件下取放苗成功率为 97.9%,一个作业循环需 8.37 s。综上,国内学者研发的移植装备,在一定程度上实现了自动移植功能,但研究移植机的作业对象多以穴盘苗为主,缺乏针对植物工厂岩棉块种苗相配套的移植机设计与试验的研究。

本文针对植物工厂岩棉块种苗高速移植机的作业需求,设计一种用于植物工厂水培叶菜种苗的二级变间距高速移植部件,并配备有一种拨指式定植杯分离辅助机构,开展多因素试验确定移植最佳参数,搭建试验样机,以验证整机作业性能。

1 全自动移植机整机结构与工作流程

1.1 结构组成

全自动移植机的高速移植部件需要将成熟的岩棉块种苗从泡沫育苗盘中取出,分栽至栽培槽孔的定植杯中进行后续培育;定植杯分离辅助机构需要将定植杯从堆叠状态分离开来,并且精准放入栽培槽孔中。设计的全自动移植机整体结构如图 1 所示。整机主要由机架、栽培槽承载板、定植杯分离辅助机构、移植部件驱动模组、移植手、泡沫育苗盘承载板、泡沫育苗盘安装定位板等组成。

1.2 工作流程

全自动岩棉块种苗移植机移植作业主要包含:

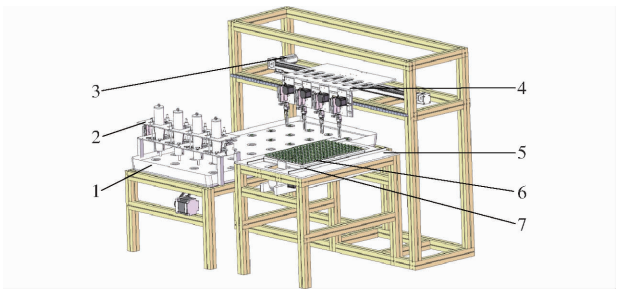


图 1 移植机整机结构图

Fig. 1 Whole structure diagram of transplanting machine

1. 栽培槽 2. 定植杯分离辅助机构 3. 移植部件驱动模组 4. 高速移植部件 5. 泡沫育苗盘承载板 6. 泡沫育苗盘 7. 泡沫育苗盘安装定位板

①定植杯分离辅助机构将定植杯分离开并精准投入栽培槽孔中,以配合高速移植部件进行植苗作业。
②高速移植部件处于合拢状态将岩棉块种苗从泡沫育苗盘中取出。
③高速移植部件移植手变间距分开到达栽培槽孔的定植杯正上方进行植苗。作业流程图如图 2 所示。

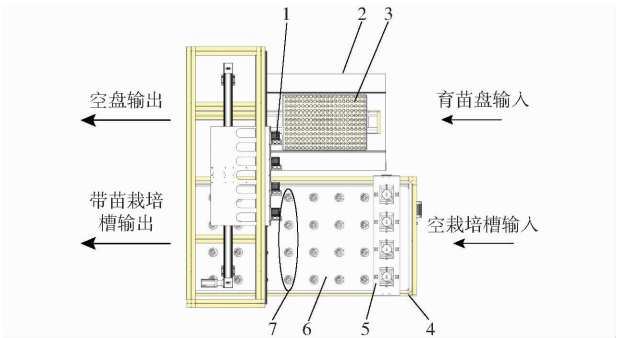


图 2 作业流程图

Fig. 2 Operation flowchart

1. 高速移植部件 2. 泡沫育苗盘承载板 3. 泡沫育苗盘 4. 栽培槽承载机构 5. 定植杯分离辅助机构 6. 栽培槽 7. 植苗位置(定植杯)

将空栽培槽放置在栽培槽承载板上,将栽培槽前移至落杯位置处,定植杯分离辅助机构开始进行分离动作。分杯完成且将定植杯投入栽培槽孔中后,将装有定植杯的栽培槽放置到植苗位置等待植苗作业。供苗泡沫育苗盘放置在取苗区域,随后高速移植部件开始工作,滑台气缸下行到最佳取苗深度,移植手抓取岩棉块种苗,而后滑台气缸上升,滑台气缸上升至最高位后,驱动模组带动高速移植部件到达植苗位置,同时移植手通过驱动电机、齿轮齿条副相互配合进行变间距分开。到达植苗区域栽培槽孔中定植杯的正上方,将岩棉块种苗精准植入栽培槽孔中的定植杯中后,高速移植部件在直线模组驱动下回归取苗位置,移植手合拢至取苗间距。随后将栽培槽向前移一排栽培槽孔的距离,等待下一次植苗作业,如此循环往复实现泡沫育苗盘成排取

苗以及栽培槽变间距并行植苗作业。

2 关键部件设计

2.1 岩棉块种苗物理特性

试验对象选用广良白云基地所育生菜种苗,栽种在 600 mm×400 mm 的 240 孔(12×20)泡沫育苗盘内,穴孔为圆柱形,直径 22.5 mm、深度 28 mm,栽培载体为岩棉块,将育苗盘放置在配置好的营养液中进行育苗,培育周期为 8~12 d,此时叶菜种苗根系发达,岩棉块包络性强且苗与苗之间叶片干扰较少。泡沫育苗盘以及苗株如图 3 所示。

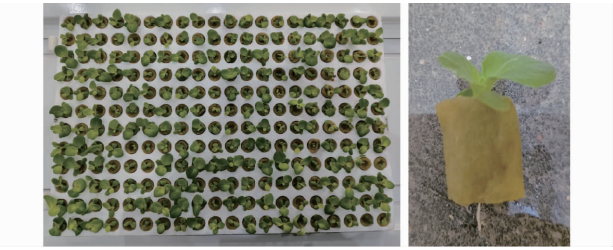


图 3 泡沫育苗盘及苗株

Fig. 3 Foam seedling trays and seedlings

2.2 高速移植部件设计

高速移植部件由 4 个移植手、移植部件驱动单元、移植部件固定板、移植部件横移导轨、齿条、机架等组成,具体结构见图 4。高速移植部件整体横移工作区长为 1 000 mm,移植手变间距工作范围为 0~560 mm。

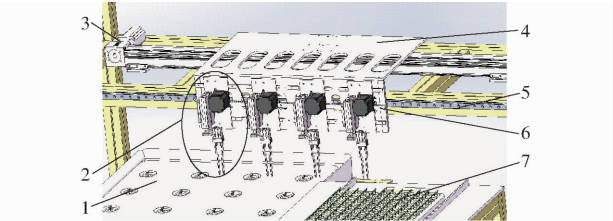


图 4 高速移植部件结构图

Fig. 4 Structural diagram of high-speed transplantation parts

1. 栽培槽 2. 移植手 3. 移植部件驱动单元 4. 移植部件固定板 5. 移植部件横移导轨 6. 齿条 7. 泡沫育苗盘

高速移植部件作业时首先进行变间距来对应 3 个取苗位置,如图 5 所示,同时还需要配合移植手变间距来实现取苗、植苗作业。初始时高速移植部件在直线模组驱动下到达取苗位置 1,此时 4 个移植手合拢到达图 5 红色穴孔正上方,取苗后,直线模组驱动高速移植部件到达植苗位置,同时移植手在步进电机、齿轮齿条相互配合下进行变间距分离到达植苗位置栽培槽中定植杯的正上方;第 1 次植苗结束后,直线模组驱动移植部件移动至取苗位置 2,与此同时移植手合拢到达取苗位置 2 绿色穴孔正上方,随后重复上述取苗、植苗步骤;第 2 次植苗结束

后,直线模组驱动移植部件到达取苗位置 3,移植手合拢到达取苗位置 3 蓝色穴孔正上方,随后进行取苗、植苗步骤,直到第 3 次植苗结束后,泡沫育苗盘第一排苗株被取完,泡沫育苗盘前进一个育苗孔中心间距距离,到达取苗位置区域,移植部件也在直线模组驱动下再次到达取苗位置 1,移植手复位合拢至取苗位置 1,为下一次取苗做好准备,在高速移植部件二级变间距配合下循环往复完成取苗、植苗作业。

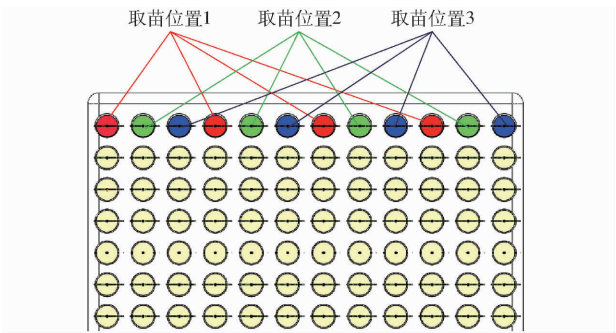


图 5 取苗位置示意图
Fig.5 Schematic of seedling location

2.3 移植手结构设计

齿轮齿条传动一方面可以完成较高精度直线运动,另一方面可以由独立的驱动元进行驱动,完成预设变间距动作,基于以上齿轮齿条优点本文设计了一种驱动单元与齿轮齿条相结合的移植手,具体结构如图 6 所示。移植手在取苗和植苗时如定位尺寸偏差过大会出现取苗失败、取苗爪片扎穿泡沫育苗盘、送苗过程中掉苗、植苗失败等情况出现,目标要求移植手定位精度达到 $\pm 1\text{ mm}$,反向误差 $\pm 0.5\text{ mm}$,因此还需考虑机构定位精度(本文仅考虑单向定位精度)和反向差值^[24]。通过三菱 PLC 进行驱动控制,保证运行过程中的平稳性;安装时保证机构的平行度、精准度,来确保取苗、植苗时的精确性。根据目标要求选择 6 级齿轮精度,齿条精度 6 级,齿轮模数为 0.5 mm,齿数 30,齿条模数 0.5 mm,齿数148,齿轮和齿条压力角均为 20°。

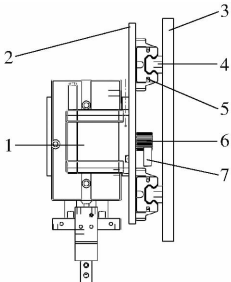


图 6 移植手结构图
Fig.6 Structure diagram of end effector

1. 步进电机 2. 移植手背板 3. 整体固定板 4. 导轨 5. 滑块
6. 齿轮 7. 齿条

2.4 移植手取苗受力分析

岩棉块种苗与泡沫育苗盘内壁存在摩擦力以及黏附力的作用,移植手取苗是克服育苗盘内壁黏附力以及摩擦力的过程,爪片的选择具有重要意义。爪片材质选择 65Mn 钢,材质具有一定弹性,符合移植要求;根据试验测试苗爪片厚度为 1 mm 时,移植效果最佳;针对苗爪片宽度,依据穴孔直径 22.5 mm,选择2、4、6 mm 爪片分别安装于移植手上进行移植试验。试验结果表明,2 mm 爪片钢性较差、易折断,取苗效果显著,但是不能实现稳定抓苗;4 mm 爪片取苗效果最佳,并且不会对苗株产生损伤;6 mm 爪片在取苗过程中容易插入岩棉块中,会损伤苗株根系以及植苗失败,因此选用宽度 4 mm 爪片。针对岩棉块种苗取出过程进行受力分析,如图 7 所示。

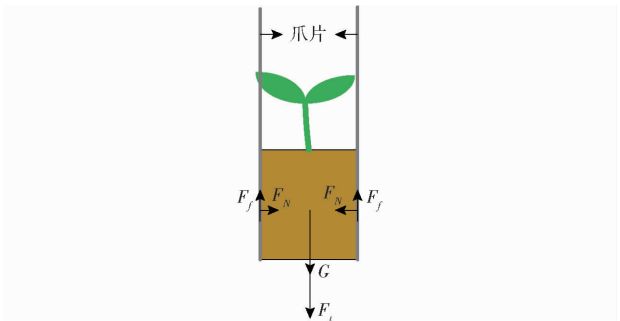


图 7 受力示意图
Fig.7 Schematic of force

若使岩棉块种苗脱离泡沫育苗盘,则取苗力之间应满足

$$\begin{cases} F_f = \mu F_N \\ F_f \geq F_t + G \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_f ——爪片与苗株摩擦力,N
 F_N ——移植手对苗株施加正压力,N
 F_t ——苗株与穴盘内壁黏附力,N
 G ——岩棉块种苗重力,N
 μ ——爪片与岩棉块之间摩擦因数

选用亚德客 HFK20N 型取苗气缸,夹紧力为 45 N,选用德力西 TN16-50-S 型分离气缸,缸径 16 mm,行程 50 mm,升降气缸推力计算式为

$$F = 0.85pD^2\pi/4 \quad (2)$$

式中 p ——输入气体平均压力,取 0.6 MPa
 D ——分离气缸缸径,mm

根据式(2)求出 F 为 102.54 N,黏附力通过反复测量取最大值为 3.5 N,苗株重力不超过 5 N,摩擦因数为 0.3,代入式(1)可得出摩擦力为 13.5 N,因此苗株可被取苗气缸进行夹取,升降气缸推力远大于黏附力,因此所设计移植手结构满足取苗力最小的要求;所选用取苗气缸最大力为 45 N,在取苗过程中,通过

夹取岩棉块进行取苗,苗爪片不会直接接触种苗,而且岩棉块和由泥炭、蛭石、珍珠岩组成的基质块在夹取过程中的状态并不相同,岩棉块是一个整体,不会出现基质块散落等情况,再加上取苗气缸夹紧间距可以调整到适合的夹苗间距,并不会对种苗造成损伤,因此所设计的移植手满足取苗要求。

2.5 定植杯分离辅助机构设计

定植杯分离过程中,容易出现多杯一起落下、杯与杯未完全分离等情况,导致落杯失败,针对这一问题,设计了一种拨指式定植杯分离辅助机构,考虑到落杯过程中,下推力会导致杯子变形,选取 2 爪片对称式分离结构,具体结构如图 8 所示,主要由套筒支撑件、下固定板、分离气缸、上分离板、分离爪片、定植杯导向杆、套筒、轴承组成。选用 TN16-15-S 型驱动元件分离气缸,气缸缸体通过连接件与下固定板进行固连,气缸推杆固定在上分离板两侧,分离爪片均匀分布,固定在分离板上,并且爪片与分离板上端面夹角预设为 65°,轴承固定在分离板下端面,与轴承杆配合保证分离过程中运动更加顺畅。

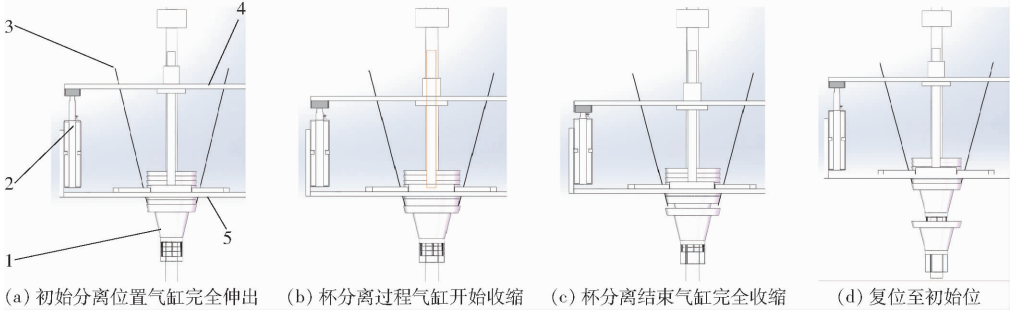


Fig.9 Separation action diagrams of planting cup separation auxiliary operation mechanism

1. 定植杯 2. 双轴气缸 3. 分离爪片 4. 上分离板 5. 下固定板

2.6 落杯试验

选择植物工厂所广泛使用的定植杯作为试验对象,试验选择若干个堆叠到一起的定植杯,机器一次性进行 4 个定植杯的分离,定植杯分离辅助机构实物如图 10 所示。

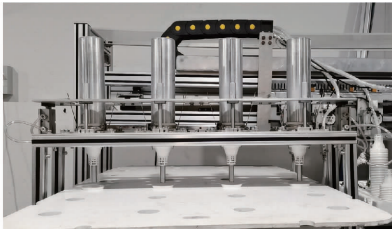


图 10 定植杯分离辅助机构试验样机

Fig.10 Experimental prototype of planting cup separation mechanism

定植杯分离辅助机构成功进行定植杯的分离,且每次只分离一个定植杯,同时能精准落入栽培槽孔中,即试验成功。定植杯分离机构落杯成功率 Y_2

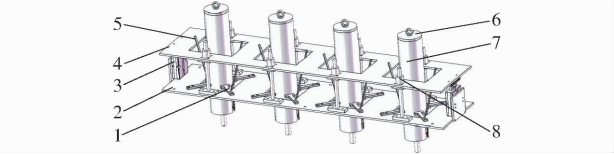


图 8 定植杯分离辅助机构结构图

Fig.8 Structure diagram of planting cup separation mechanism

1. 套筒支撑件 2. 下固定板 3. 分离气缸 4. 上分离板 5. 分离爪片 6. 定植杯导向杆 7. 套筒 8. 轴承

定植杯分离工作开始时机构处于初始状态,如图 9a 所示,双轴气缸处于伸出状态,分离爪片以角度 65°固定在分离板上,此时爪片紧贴倒数第 2 个定植杯的外壁,当栽培槽到达落杯位置时,定植杯分离作业开始,分离过程如图 9b 所示,此时分离爪片在双轴气缸带动下,紧紧贴着倒数第 2 个定植杯外壁向下运动,当双轴气缸收缩完毕,分离爪片将最后一个定植杯推落,具体如图 9c 所示,此时定植杯落入栽培槽孔中,随后分离气缸复位至初始位置,如图 9d 所示,随后定植杯分离机构进入下一次分杯循环。

计算式为

$$Y_2 = \frac{X - X_1 - X_2}{X} \times 100\%$$
 (3)

式中 X ——定植杯总数量

X_1 ——未分离成功的定植杯数量

X_2 ——一次性分离多个定植杯的数量

样机试验共进行 10 组,每组进行 6 次分离作业,每组得出一个成功率平均值,如表 1 所示。

表 1 落杯试验数据

Tab.1 Drop cup test data

%

组别	1	2	3	4	5
Y_2	99.2	99.5	98.7	99.8	98.9
组别	6	7	8	9	10
Y_2	98.9	98.9	100	100	99.9

由表 1 可知,定植杯分离辅助机构作业成功率具有较高的稳定性,落杯成功率平均值为 99.38%。

3 整机试验

3.1 试验条件

为了测试移栽机整机作业性能,进行整机试验,试验样机如图 11 所示。配套使用的工具有温科达 TR-6D 型温湿度检测仪、卷尺、秒表等。



图 11 试验样机图

Fig. 11 Diagram of test prototype

3.2 试验指标

移植手成功取出岩棉块种苗,且中途苗株不会掉落,同时移植手能成功将苗株放入栽培槽孔中的定植杯中,即判定为试验成功。移植成功率 Y 计算式为

$$Y = \frac{N_1}{N} \times 100\% \tag{4}$$

式中 N_1 ——岩棉块种苗成功从泡沫育苗盘中取出并且精准植苗至栽培槽孔中的定植杯中的株数

N ——试验岩棉块种苗总株数

3.3 试验因素

移植部件横移过程中,通过伺服电机驱动横移模组,驱动移植部件横移至取苗和植苗位置。变加速变减速过程中,在取苗位置和植苗位置会产生一定的冲击,会导致岩棉块种苗掉落,因此根据测试情况,设移植部件横移速度为 0.75、0.80、0.85 m/s。在取苗过程中,当取苗深度过大时,可能会产生苗爪片插入岩棉块情况,从而导致植苗过程中岩棉块种苗植苗失败;取苗深度过少时,可能会出现岩棉块种苗夹取失败,因此根据泡沫育苗盘穴孔深度,取苗深度设为 20、24、28 mm。当取苗以及植苗时,夹苗过紧,可能会出现岩棉块粘连在苗爪片上以及对岩棉块造成不可逆的损伤,因此导致植苗失败;夹苗过松时,会出现取苗失败、运苗过程中种苗掉落情况出现,因此无论夹苗过紧或过松都会对移植成功率造成一定的影响,根据岩棉块直径以及前期移植手取苗力学分析,移植手夹苗间距设定为 12、14、16 mm。岩棉块含水率是直接通过含水率测定仪器进行测量,若岩棉块含水率过低,棉质干燥,植苗时岩棉块容易粘连到爪片上;含水率过高,会出现取苗失败以

及横移过程中掉苗情况。因其岩棉块种苗从营养液中取出后,会有一定的水量损失,含水率也会受岩棉块规格的差异受到影响,因此通过注射器调控水分达到取苗的最佳状态,配合检测仪测量,测量出一个含水率范围,再进行含水率参数取整,为 80%、85%、90%。移植手在垂直方向运动过程中,升降气缸带动移植手的上升和下降,在运动过程中的变加速和变减速会使岩棉块种苗与苗爪片之间产生局部冲击振动,会导致种苗掉落,因此设升降速度根据前期研究为 0.16、0.20、0.24 m/s。以取苗深度、岩棉块含水率、移植部件横移速度、移植手升降速度、移植手夹苗间距为试验因素,以移植成功率 Y 为试验指标,通过 SPSS Statistics 软件进行五因素三水平正交试验。移植机正交试验因素编码如表 2 所示。

表 2 移植机正交试验因素编码

Tab. 2 Coding of orthogonal factors for transplantation machines

编码	因素				
	取苗深度/ mm	岩棉块含水率/ %	移植部件横移速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	移植手升降速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	移植手夹苗间距/ mm
-1	20	80	0.75	0.16	12
0	24	85	0.80	0.20	14
1	28	90	0.85	0.24	16

3.4 试验结果分析

正交试验结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为因素编码值。按照试验因素依次进行试验,每组试验进行 10 次,记录每次试验结果。

根据表 3 试验结果,通过软件分析得出移植成功率 Y 的二次多项式回归模型为

$$Y = 91.47 + 3.64A + 2.45B - 0.2406C + 0.0344D + 1.06E - 0.425AB + 0.825AE - 0.6125BE - 2.34A^2 - 0.4771B^2 + 0.5229C^2 + 0.9812D^2 - 4.96E^2 \tag{5}$$

对移植部件移植成功率进行方差分析,结果如表 4 所示。由表 4 可看出,模型 $P < 0.0001$,表示回归模型为极显著,此时拟合效果好。对模型进一步分析,结果表明,极显著因素为取苗深度 A 、岩棉块含水率 B 、移植手夹苗间距 E 。使用响应面分析极显著因素交互作用对移植成功率的影响,结果如图 12 所示。

图 12a 为移植部件横移速度 0.8 m/s、移植手升降速度 0.2 m/s、移植手夹苗间距 14 mm 时,取苗深度和岩棉块含水率对移植成功率的影响。取苗深度较小、岩棉块含水率较低时,移植成功率较低。随着取苗深度和岩棉块含水率的增加,移植成功率开始

表 3 移植机正交试验设计与结果

序号	因素					移植成功率 Y/%
	取苗深度	岩棉块含水率	移植部件横移速度	移植手升降速度	移植手夹苗间距	
	A	B	C	D	E	
1	-1	0	0	1	0	88.75
2	0	0	-1	0	1	90.00
3	1	0	0	1	0	92.90
4	1	-1	0	0	0	92.10
5	0	-1	0	-1	0	91.70
6	-1	0	0	-1	0	85.60
7	0	0	0	0	0	89.20
8	1	0	0	0	1	90.40
9	0	1	0	1	0	97.90
10	0	0	0	0	0	92.50
11	-1	0	1	0	0	86.25
12	0	0	1	0	1	87.50
13	0	0	0	0	0	89.20
14	0	1	-1	0	0	94.20
15	0	1	0	0	-1	87.10
16	-1	0	0	0	-1	82.10
17	1	0	0	0	-1	86.70
18	0	0	1	0	-1	87.90
19	0	1	1	0	0	94.60
20	0	0	0	0	0	92.50
21	1	0	-1	0	0	94.20
22	0	0	-1	0	-1	85.90
23	0	1	0	0	1	86.70
24	0	-1	1	0	0	88.75
25	0	-1	0	1	0	89.60
26	0	0	0	1	1	87.90
27	0	0	1	1	0	92.90
28	0	-1	0	0	-1	81.70
29	1	0	0	-1	0	91.70
30	0	0	-1	-1	0	93.30
31	1	1	0	0	0	95.00
32	0	0	0	0	0	92.10
33	0	0	0	-1	1	89.20
34	-1	1	0	0	0	85.00
35	1	0	1	0	0	91.25
36	-1	-1	0	0	0	80.40
37	-1	0	-1	0	0	85.40
38	0	0	0	-1	-1	86.25
39	-1	0	0	0	1	82.50
40	0	0	0	0	0	93.30
41	0	-1	-1	0	0	88.75
42	0	-1	0	0	1	83.75
43	0	0	0	1	-1	83.30
44	0	1	0	-1	0	95.80
45	0	0	-1	1	0	92.50
46	0	0	1	-1	0	91.25

表 4 移植成功率方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	663.94	5	33.20	9.74	<0.000 1 **
A	21.066	1	21.066	65.561	<0.001 **
B	18.524	1	18.524	29.615	0.003 **
C	0.926	1	0.926	0.286	0.615
D	0.019	1	0.019	0.006	0.942
E	18.062	1	18.062	5.584	<0.001 **
误差	16.173	10	3.235		
总和	738.71	15			

注：**表示极显著($P<0.01$)。

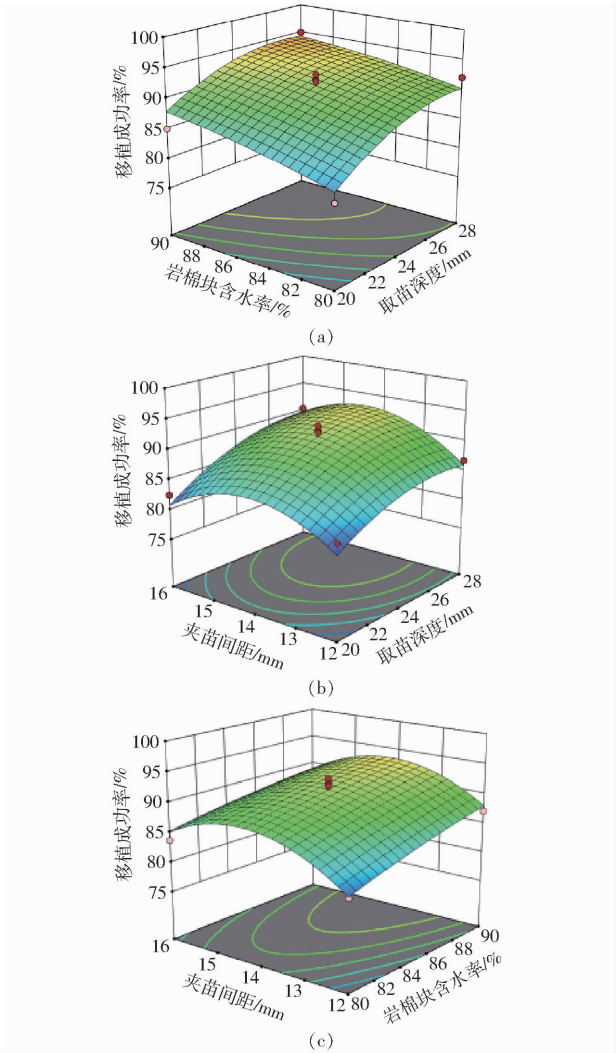


图 12 因素交互对移植成功率的影响

Fig. 12 Effect of factor interaction on grafting success

逐步提升,当取苗深度到达一定程度时,移植成功率又呈现下降趋势。图 12b 为岩棉块含水率 85%、移植部件横移速度 0.8 m/s、移植手升降速度 0.2 m/s 时,取苗深度和移植手夹苗间距对移植成功率的影响。随着取苗深度和移植手夹苗间距的增大,移植成功率也开始增大,当取苗深度和移植手夹苗间距增长到一定程度时,移植成功率开始

些微下降。图 12c 为取苗深度 24 mm、移植部件横移速度 0.8 m/s、移植手升降速度 0.2 m/s 时,岩棉块含水率和移植手夹苗间距对移植成功率的影响。当移植手夹苗间距一定时,移植成功率随着岩棉块含水率的增加而增加,岩棉块含水率一定时,移植成功率随着夹苗间距的增加呈先上升后下降趋势。

建立参数组合优化模型为

$\max Y$

$s. t. \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \\ -1 \leq D \leq 1 \\ -1 \leq E \leq 1 \end{cases}$

(6)

通过参数优化模型进行试验,最终得出最佳参数组合:取苗深度为 24 mm、岩棉块含水率为 90%、移植部件横移速度为 0.8 m/s、移植手升降速度为 0.24 m/s、移植手夹苗间距为 14 mm。根据最佳参数组合再次进行验证性试验,结果如表 5 所示,多次试验移植成功率平均值 97.9%,移植速度达到 3 132 株/h,相较于前期研究,移植效率更高,移植作业更加稳定。

4 结论

(1)根据移植作业对象以及育苗盘规格变化,设计了一种二级变间距的高速移植部件,可以适应

表 5 验证试验结果

Tab.5 Verification test result

试验序号	移植成功率/%
1	97.5
2	97.5
3	97.7
4	97.9
5	97.7
6	97.6
7	98.2
8	97.6
9	98.3

不同规格育苗盘和栽植载体。

(2)设计了一种具有独立驱动和齿轮齿条相配合的移植手,对移植手取苗进行受力分析,确定移植手设计的合理性;设计了定植杯分离辅助作业机构,通过阐述作业原理以及进行落杯试验,为后续植苗奠定基础。

(3)以取苗深度、岩棉块含水率、移植部件横移速度、移植手升降速度、移植手夹苗间距为试验因素,以移植成功率为试验指标,进行正交试验以及方差分析,得出最佳参数组合:取苗深度为 24 mm、岩棉块含水率为 90%、移植部件横移速度为 0.8 m/s、移植手升降速度为 0.24 m/s、移植手夹苗间距为 14 mm。该组合下岩棉块种苗移植成功率为 97.9%,移植速度为 3 132 株/h,可以实现高速、高效、稳定的移植作业需求。

参 考 文 献

[1] 刘庆鑫,方慧,李宗耕,等. 自然光植物工厂多层立体栽培补光对生菜产量和品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(1):92-99.
LIU Qingxin, FANG Hui, LI Zonggeng, et al. Effects of increased stereo multi-layer artificial light in natural light plant factory on yield and quality of lettuce[J]. Journal of China Agricultural University,2019,21(1):92-99. (in Chinese)

[2] 崔志超,管春松,徐陶,等. 基质块苗移栽机挡销式自动送苗分苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(13):68-79.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, XU Tao, et al. Design and experiment of automatic conveying and separating device for substrate block seedling transplanting machine[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(13):68-79. (in Chinese)

[3] 崔志超,管春松,徐陶,等. 基质块育苗移栽技术与装备发展现状[J]. 中国农机化学报,2022,43(5):29-34.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, XU Tao, et al. Development status of technology and equipment of substrate block seedling cultivation and transplanting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 29-34. (in Chinese)

[4] 廖庆喜,王洋,胡乔磊,等. 油菜基质块苗移栽机取苗装置取苗系统分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):93-102.
LIAO Qingxi, WANG Yang, HU Qiaolei, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 93-102. (in Chinese)

[5] KHADATKAR A, MATHUR S M, GAIKWAD B B. Automation in transplanting: a smart way of vegetable cultivation[J]. Current Science, 2018,115(10):1884-1892.

[6] 崔志超,管春松,杨雅婷,等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):85-92.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, YANG Yating, et al. Research status of vegetable mechanized transplanting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(3):85-92. (in Chinese)

[7] TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J. Robot workcell for transplanting of seedlings part I—layout and materials flow[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3):1005-1010.

[8] TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J, et al. Robot workcell for transplanting of seedlings part II—end-effector development[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3):1013-1017.

- [9] YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1991, 7(4): 493 – 498.
- [10] CUI Z, GUAN C, XU T, et al. Design and experiment of transplanting machine for cabbage substrate blockseedlings[J]. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2021, 64(2): 375 – 384.
- [11] SUN K, GE R, LI T, et al. Design and analysis of vegetable transplanter based on five-bar mechanism[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019: 12 – 29.
- [12] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182(1): 1 – 12.
- [13] HAN L, MAO H, HU J, et al. Development of a riding-type fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2019, 17(3): 1 – 14.
- [14] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 温室穴盘苗自动移栽机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 59 – 67.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and test of automatic transplanter for greenhouse plug seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 59 – 67. (in Chinese)
- [15] 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 23 – 30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 23 – 30. (in Chinese)
- [16] 黎波, 辜松, 初麒, 等. 椰糠培育叶菜水培叶菜苗移植机械手设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 18 – 24.
LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(14): 18 – 24. (in Chinese)
- [17] LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Development of transplanting manipulator for hydroponic leafy vegetables[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(6): 38 – 44.
- [18] 胡建平, 潘杰, 张晨迪, 等. 行星轮栽植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 planting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 78 – 86. (in Chinese)
- [19] 侯加林, 张二鹏, 张康博, 等. 基于 DEM – MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 46 – 57, 87.
HOU Jialin, ZHANG Erpeng, ZHANG Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM – MFBD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 46 – 57, 87. (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] 孟青新. 水培叶菜苗变间距移植装备设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
MENG Qingxin. Design and experiment of variable spacing transplanting equipment for hydroponic leafy vegetable seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 周海丽, 刘珂, 童俊华, 等. 温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 82 – 90.
ZHOU Haili, LIU Ke, TONG Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 82 – 90. (in Chinese)
- [24] 李锋, 梁欣欣, 苏娟娟. 齿轮齿条传动的运动精度计算分析[J]. *机电设备*, 2023, 40(2): 69 – 73.
LI Feng, LIANG Xinxin, SU Juanjuan. Calculation and analysis for the motion precision of gear and rack drive system[J]. *Electrical and Mechanical Equipment*, 2023, 40(2): 69 – 73. (in Chinese)