doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.022

西甜瓜移栽机顶钵-接苗式取苗装置设计与试验

胡国玉[1]　王海宁[1]　江德轩[1]　杨　军[2]　王克响[3]　姜　宏[1]

(1.新疆大学机械工程学院,乌鲁木齐 830017;2.新疆维吾尔自治区设施农业和特色农业研究发展中心,鄯善县 838201;
3.哈密市农牧业产业发展投资有限公司,哈密 839000)

摘要:西甜瓜钵苗茎秆脆嫩、叶展角大,目前全自动移栽机的取苗装置在作业时容易造成秧苗损伤,且整体运行较不稳定,这些因素直接影响了取苗成功率。设计了一种顶钵-接苗式取苗装置实现西甜瓜钵苗低损伤、高效率移取。以"西州蜜 25 号"哈密瓜钵苗为研究对象,采用顶钵与接苗的取苗方式,设计配套气动控制系统以实现取苗与投苗的协同作业。针对顶钵过程进行力学分析,得出影响取苗成功率的关键因素为顶针直径、长度及顶针速度。通过综合运用 ADAMS 进行运动轨迹仿真与 FluidSIM-P3.6 进行气动系统仿真,对所提出结构设计及气动时序控制策略的合理性进行了验证。结果表明,该设计方案能确保取苗装置各部件实现高效协同作业。进一步采用 EDEM 模拟顶钵过程,在确定顶针参数研究区间的基础上开展仿真试验,优化取苗效果。通过方差分析与响应面分析,获得最优顶苗装置中顶针参数组合为:顶针直径 1.4 mm、顶针长度 20 mm、顶针速度 150 mm/s。搭建移栽取苗台架试验,试验结果表明:该参数组合下取苗成功率达 94.50%,钵苗损失率为 5.94%,未观测到茎秆损伤现象,满足西甜瓜移栽机对低损伤、高效率取苗的作业需求。

关键词:西甜瓜移栽机;顶钵-接苗式;取苗装置

中图分类号:S223　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0269-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Seedling Pick-up Device with Ejecting Pot-Receiving Seedling for Watermelon and Cantaloupe Transplanter

Hu Guoyu[1]　Wang Haining[1]　Jian Dexuan[1]　Yang Jun[2]　Wang Kexiang[3]　Jiang Hong[1]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830017, *China*
2. *Xinjiang Uygur Autonomous Region Research and Development Centre for Facility Agriculture and Specialized Agriculture*, *Shanshan* 838201, *China*
3. *Hami Agricultural and Animal Husbandry Industry Development Investment Co.*, *Ltd.*, *Hami* 839000, *China*)

Abstract: Watermelon and cantaloupe seedling pots, characterized by their tender stems and expansive foliage, present challenges for existing fully automated transplanters, including low pickup success rates, high damage rates, and poor operational stability. This study aims to address these issues by designing pick-up device with ejecting pot-receiving seedling capable of low-damage, high-efficiency removal of watermelon and cantaloupe seedlings. This study used "Xizhoumi 25" cantaloupe seedlings as test samples, and the device adopted sequential lifting-and-grasping with intermittent seedling placement. A corresponding pneumatic control system was designed. Through ADAMS motion trajectory simulation and FluidSIM-P3.6 pneumatic system analysis, the structural design and pneumatic timing control strategy were validated, ensuring high operational success rates. A mechanical analysis model for the lifting process was established, identifying the primary factors influencing successful seedling retrieval as the diameter, length, and speed of the lifting pins within the device. EDEM simulation methods were employed to analyse the lifting process. Based on determining the research range for pin diameter, length, and speed, a simulation test plan for the lifting process was constructed by using Box-Behnken experimental design methodology to ensure low-damage seedling retrieval. Through variance analysis and response surface analysis, the optimal combination of ejector pin parameters was determined as: pin diameter of 1.4 mm, pin length of 20 mm, and pin speed of 150 mm/s. Field trials using a transplanting

收稿日期:2025-11-05　修回日期:2025-12-19

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(20241124470)和新疆维吾尔自治区第二批"天池英才"引进计划项目

作者简介:胡国玉(1977—),女,教授,博士,主要从事农业机器人与智能农机装备研究,E-mail:xjhuguoyu@xju.edu.cn

seedling extraction rig confirmed that this parameter combination achieved a 94.50% seedling extraction success rate with a 5.94% seedling loss rate. No stem damage was observed, demonstrating suitability for low-loss, high-efficiency seedling extraction by watermelon and melon transplanters.

Key words: watermelon and cantaloupe transplanter; ejecting pot - receiving seedling; seedling pick-up device

0 引言

我国是世界上最大的西甜瓜生产国,其产量占全球一半以上[1]。新疆是我国西甜瓜重要优势产区,产量占全国 35% 以上[2]。当地西甜瓜的种植主要依赖人工和半自动化移栽机移栽,人工移栽存在劳动强度高、效率低和成本高等问题[3]。半自动移栽机在送盘、取苗等关键环节仍需要人工辅助完成,仅可实现栽植环节的自动化,难以达到高效自动化作业[4]。在半自动移栽机的基础上,全自动移栽机增设了自动送盘、取苗等机构。在新增机构中,取苗装置是全自动移栽机的核心部件,主要承担苗钵的夹取与投放作业,其性能直接决定了移栽作业的成功率、质量与效率[5-8]。

目前番茄、辣椒等作物钵苗叶展较小、茎秆木质化程度高,通过适配的取苗装置基本实现了高效稳定移栽。针对此类作物移栽机的取苗机构,国内外学者开展了系列研究。欧美等国研发的全自动移栽机普遍采用高度集成的机电一体化技术,通过整排取苗的作业模式实现了高效率移栽,然而该技术路径也导致设备结构复杂、制造成本高昂,使其市场价格较为昂贵[9-11]。如英国 Pearson 型取苗装置为主动抓取式,取苗爪插入,夹紧苗钵取出,意大利 Ferrari 公司 FUTURA 型通过顶苗部件成排顶出穴盘苗,再由成排长条状夹苗部件夹持取苗[12];此外,一些国外学者单独对取投苗装置进行研究,如印度学者 Rahul 等[13]设计了一款两自由度并联连杆式取苗装置,其采用双爪苗钳与伺服电机驱动,结合软件实现了运动规划可视化与减振,智能化程度高,但取苗效率较低,难以适用于高速移栽作业。韩国学者 Nafiul 等[14]针对辣椒设计多苗夹取机构,通过各部件协同动作实现高效取苗。国内学者也展开相关研究,主要研究对象为叶展较小、茎秆木质化程度高的钵苗。王秀等[15]选用辣椒苗作为试验对象,设计基于夹茎秆取苗方式自动移栽机整排取苗装置,实现了高效、高质自动化取投苗作业;王超等[16]选用辣椒钵苗作为试验对象,提出一种气动下压式高速取苗装置,选用特定移栽穴盘,工作时在气缸压力下将钵苗从穴盘中向下脱离,提高取苗效率。除此之外研究学者针对木耳菜、黄瓜等茎秆脆、叶展角大的钵苗取苗机构也进行了相关研究。谢守勇等[17]以木耳菜苗为试验对象,设计了斜插夹钵式取苗装置,该装置通过内部凸轮转动控制弹性苗夹闭合与打开实现夹取动作,从而提高了取苗成功率;胡建平等[18]选用黄瓜苗作为试验对象,针对苗钵与穴盘间黏附力较强、盘根性不佳导致取苗成功率低、钵体破碎率高等问题,研制了顶夹拔组合式取苗装置。然而,在顶苗操作完成后,采用取苗装置进行夹取作业时,存在二次损伤。上述夹茎式、夹钵式及下压式取苗装置作业时,因穴盘苗根系发育周期内不规则生长、穴盘与苗钵间粘附力及钵苗生长不规则性,易导致苗钵损伤或损坏,降低取苗成功率[19-23]。

综上所述,针对西甜瓜钵苗茎秆脆嫩、叶展角大的特性,以及现有全自动移栽机取苗装置对该类钵苗存在钵苗损伤、取苗成功率低等问题,本文设计一种顶钵-接苗式取苗装置,完成机械结构与气动系统的设计。通过理论分析与仿真模拟相结合的方法,验证取苗装置高效协同工作性能并开展顶苗装置关键结构参数的分析与优化工作,为有效降低钵苗损伤率、提高取苗成功率提供技术支撑。

1 顶钵-接苗式取苗装置结构与工作原理

1.1 顶钵-接苗式取苗装置结构

本文研究的顶钵-接苗式取苗装置结构如图 1 所示,主要由顶钵气缸、取苗气缸、分苗气缸、接苗斗、取苗导轨、分苗导轨等组成。顶苗气缸与取苗气缸以及两边对称接苗斗在顶钵-接苗时运动方向分别为 V1、V2、V3 与 V4,投苗运动时顶苗气缸与取苗气缸以及接苗斗在顶钵-接苗时运动方向为顶钵-接苗时运动方向的反方向,V5 为钵苗下落方向,其中接苗装置与顶苗装置为核心,图 2a 所示接苗装置主体主要有气夹,以及装配在气夹两边的半方锥型接苗斗,当两个半接苗斗在接苗装置工作时,其内斗形状为单穴盘形状,使接苗斗包裹住苗钵,如图 1c 所示,保持稳定运输到投苗区域,因接苗斗前有竖向通孔,才能使顶苗杆穿过接苗斗到接苗斗内侧。投苗时打开气夹,如图 1d 所示。图 2b 所示顶苗装置主要由顶针及顶苗杆组成,顶针固定于顶苗杆上表面中心位置,顶针用于接苗前,将钵苗固定姿态于接苗位置,顶苗杆主要用于将苗钵从穴盘中分离。

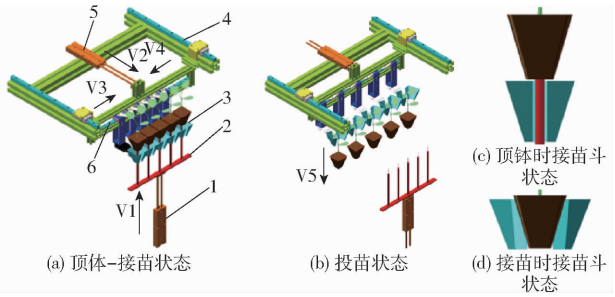


图 1　顶钵-接苗式取投苗装置结构图

Fig. 1　Structural diagram of pick-up device with ejecting pot - receiving seedling

1. 顶钵气缸　2. 顶钵装置　3. 接苗装置　4. 取苗导轨　5. 取苗气缸　6. 分苗导轨

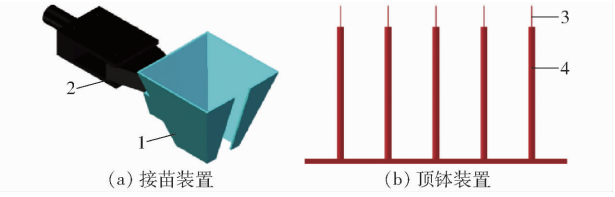


图 2　末端执行器部件示意图

Fig. 2　Schematics of end-effector components

1. 接苗斗　2. 气夹　3. 顶针　4. 顶苗杆

1.2　顶钵-接苗式取苗装置工作原理

顶钵-接苗装置的工作原理如图 3 所示，当钵苗到达顶苗位置时，顶苗气缸驱动顶苗杆，顶苗杆穿过穴盘注水孔，在顶苗杆的作用下，穴盘苗与穴盘分离，将穴盘苗顶升至接苗位置，其中顶针用于固定钵苗姿态。随后，取苗气缸将接苗装置推送至接苗位置，此时，分苗气缸已使接苗装置收缩，取苗气爪通过气夹夹紧形成接苗斗，使末端取苗执行器形成倒锥形结构，作为接苗斗。当接苗斗到达钵苗下方时，顶苗气缸推杆收缩，将顶针从钵苗中抽出，钵苗随即落入接苗斗内。这种取苗方式能够有效避免因对叶展角大、茎秆脆弱的钵苗产生干涉而造成钵苗损伤。随后，取苗气缸驱动接苗装置纵向退回至预设投苗位置，分苗气缸则驱动接苗装置横向移动至苗杯正上方，气夹打开，由于钵苗下落时叶片处于自然收拢状态，不会与接苗斗内壁发生剐蹭，进而完成整个投苗动作。

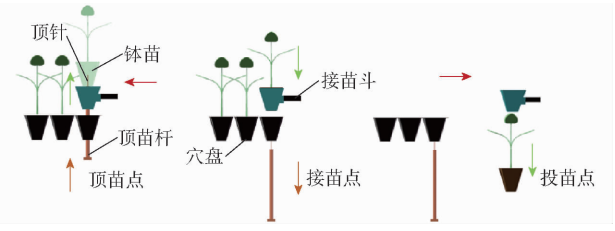


图 3　顶钵-接苗式取苗装置工作原理图

Fig. 3　Working principle of top-pot and seedling gathering

为确保顶苗与接苗动作的协调性，需合理规划顶苗气缸、取苗气缸及分苗气缸的操作时序，以避免顶苗杆与接苗斗发生干涉。其操作顺序如下：首先，顶苗气缸启动，当取苗气缸将接苗装置移动至接苗位置时，顶苗气缸收缩，使钵苗落入接苗斗内。随后，取苗气缸收缩至投苗位置，分苗气缸驱动接苗装置接苗斗分散至投苗斗正上方，取苗气爪松开，钵苗落入投苗斗中。

2　哈密瓜钵苗物理特性试验

为给顶钵-接苗式取苗装置结构提供关键参数，本研究对哈密瓜穴盘及钵苗几何参数进行测定，以及对顶苗-接苗联动作业中的核心环节，顶钵过程进行深入分析。预试验证实，顶钵过程对钵苗的姿态固定效果直接决定了接苗成功率。试验以“西州蜜 25 号”哈密瓜钵苗（苗龄 25 d，基质泥炭、蛭石、珍珠岩体积比为 3∶1∶1）为材料，通过 P300 型电子万能试验机测试其力学特性，从而为后续结构设计奠定理论基础。

2.1　哈密瓜穴盘及钵苗几何参数

穴盘是全自动移栽系统中前期育苗及物料转运的核心载体。根据农机与农艺相结合的基本原则，本文顶钵-接苗取苗装置的设计要求与育苗穴盘及实际苗钵钵体尺寸相匹配，本文使用如图 4 所示的软质塑料盘，穴盘规格为 5 × 10 穴，钵体呈倒方锥型，上底为正方形，其长 50 mm，下底为正方形，其长 20 mm，钵体高度为 42 mm，两个穴中心距为 52 mm，穴盘长 × 宽为 590 mm × 275 mm。

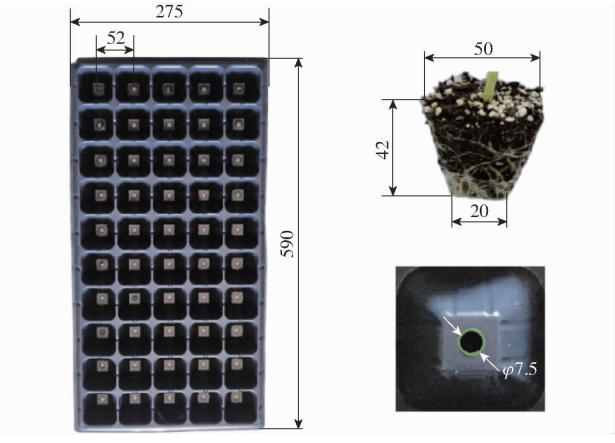


图 4　穴盘及钵体尺寸示意图

Fig. 4　Schematic of cell tray and pot dimensions

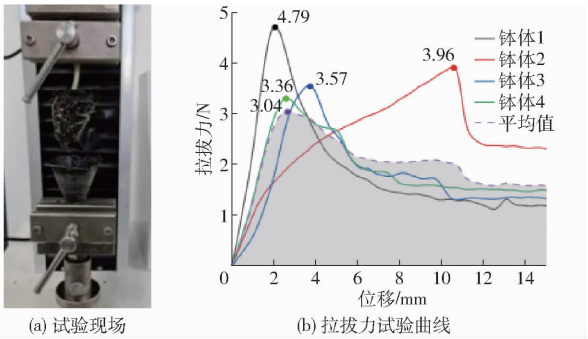
为解决现有移栽机取苗装置在取苗过程中对钵体造成损伤，根据穴盘及钵体相关尺寸设计出顶苗装置及接苗装置，设计要求：顶苗装置顶苗杆需整排穿过穴盘注水孔，如图 2a 所示，其相邻两个圆柱中心距符合 52 mm，其顶苗杆直径小于 7.5 mm，本研究选用 6 mm 直径顶苗杆；在接苗装置设计中，相邻

接苗斗的中心间距设定为 52 mm。

2.2 哈密瓜钵苗拉拔力试验

本研究采用茎秆拉拔试验来等效测定顶出式取苗所需克服的钵体-穴盘间粘附力,其合理性基于以下力学分析:无论是拉拔还是顶出,其目标均是实现钵体与穴盘的分离。在此分离过程中,所需克服的主要阻力均为钵体与穴盘内壁之间的静摩擦力和由于根系盘结、基质与穴盘表面润湿性等产生的粘附力。这些力的本质在垂直分离方向(即拉拔与顶出方向)上的分量是相同的。测定钵体与钵穴分离时所施加的顶出力大小及其变化过程,可为后续取苗机构的设计提供参考数据。

裁剪获取单个钵穴后,将其放置于夹具底座,利用夹具对其下口边沿进行固定,以确保单穴钵体固定稳定,同时不阻碍钵体后续移动。试验中随机选取 4 个钵体开展钵体拉拔力测试,具体操作步骤如下:首先将苗盘固定在试验平台上,使植株茎秆与水平面保持垂直状态;随后夹持茎秆并向上施加拉力以完成拔苗操作,直至钵体从穴盘中完整取出,具体过程如图 5 所示。试验条件设定如下:钵体含水率控制在 50% ~60%,拔取速度为 300 mm/min,拔取行程为 70 mm;为保证数据可靠性,每个钵体重复 4 次试验。试验结果如图 5 所示。



(a) 试验现场 (b) 拉拔力试验曲线

图 5 拉拔力试验

Fig. 5 Pulling force test

图 5b 中的灰色区域面积,表征了拉拔力在整个运动行程内所做功的大小,该数值是设计顶苗装置顶出力的关键参考依据。穴盘苗的拔取过程可划分为 3 个典型阶段:首先,钵体随拉力向上运动,直至克服穴盘对其的最大摩擦力,该阶段最显著的特征是拉拔力达到峰值;继而,钵体开始逐步脱离穴盘,此时拔取力呈明显衰减趋势;最终,当拔取力衰减至稳定值且该稳定值等于穴盘苗自身重力 G 时,即标志着拔取过程的完成。

综上,顶苗力需同时克服穴盘苗自身重力以及穴盘与钵体间黏附力的竖直分力,其最大值范围为 3.36 ~ 4.79 N,其顶苗装置顶力需大于顶苗力最大值。

3 顶钵-接苗式取苗装置设计

3.1 顶苗装置

3.1.1 顶苗装置设计要求

顶苗装置需要将整排穴盘苗顶出到固定位置,若想接苗斗能在钵苗下方,不干涉到钵苗,顶苗杆长度选取 120 mm,选用气缸驱动顶苗杆,顶苗气缸选用时应满足气缸推力大于上述最大拉拔力,以及顶苗杆重量,即

$$F_q > f_l + G_d \tag{1}$$

式中 F_q——气缸推力

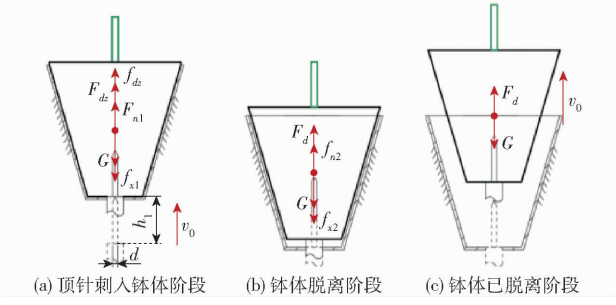
f_l——测出最大拉拔力

G_d——顶苗顶苗杆与顶针自重

顶苗气缸伸缩行程应该保证顶针和顶苗杆能正常运行到指定位置,气缸最大行程大于顶针加顶苗杆长度。

3.1.2 顶苗受力模型

为使顶苗杆及顶针能将钵体低损顶出穴盘,并固定在穴盘上方,以钵体为研究对象进行受力分析,如图 6 所示。



(a) 顶针刺入钵体阶段 (b) 钵体脱离阶段 (c) 钵体已脱离阶段

图 6 顶苗过程钵体受力状态

Fig. 6 Force conditions on pot body during topping process

顶针刺入钵体过程中钵体理想状态应为静止状态,如受力方程为

$$F_{n1} + F_{dz} + f_{dz} - f_{x1} - G = 0 \tag{2}$$

式中 F_{n1}——穴盘内壁对钵体支持力的合力,N

F_{dz}——顶针对钵体支持力,N

f_{dz}——顶针对钵体的滑动摩擦力,N

G——钵体重力,N

f_{x1}——穴盘对钵体静摩擦力,N

若顶针刺入钵体阶段,顶针对苗钵的作用力超过穴盘对其粘附力,则苗钵可能提前脱离穴盘,导致姿态倾斜或脱盘后坠落于地面。为此,保证顶针刺入过程钵体不提前顶出,需满足

$$F_{n1} + F_{dz} + f_{dz} < f_{x1} + G \tag{3}$$

假设钵体在顶针刺入过程中静止,则 F_{n1}、G 保持不变,则需 $F_{dz} + f_{dz} < f_{x1}$。其中顶针尖端对钵体作用力 F_{dz}较小,可忽略不计,则 $f_{dz} < f_{x1}$,其中 f_{dz}为

$$f_{dz}=\mu N=\mu pA=\mu p\pi dh \tag{4}$$

式中　μ——摩擦因数

N——总正压力，Pa

A——顶针与钵体接触面积，m^2

p——平均径向压力，Pa

d——顶针直径，m

h——插入深度，m

取 0 ~ h_1（顶针长度）可知，在顶针刺入钵体的过程中，主要影响顶苗成功率因素包括顶针长度、直径以及材料特性参数。为确保顶针在工作过程中不发生弯曲，选用不锈钢材料，此情况下其摩擦因数为固定值。

钵体脱离穴盘前阶段，此阶段受力方程为

$$F_d+F_{n2}>G+f_{x2} \tag{5}$$

式中　F_d——该阶段顶苗杆对钵体的支持力，N

F_{n2}——该阶段穴盘内壁对钵体支持力的合力，N

f_{x2}——该阶段穴盘对钵体的滑动摩擦力，N

为确保顶苗杆能顺利将穴盘苗顶出，需满足在苗钵脱离穴盘的瞬间（时间 Δt）内，顶苗杆作用力 F_d 足以克服苗钵与穴盘间的静摩擦力（或最大粘附力）。根据动量定理，该过程满足

$$F_d\approx\frac{m_c v}{\Delta t}>f_{x1} \tag{6}$$

式中　m_c——顶苗杆质量，kg

v——顶针速度，m/s

Δt——冲击持续时间，s

顶苗杆推动钵体过程中顶针固定钵体，顶苗杆使钵体向上匀速运动至接苗位置，此阶段受力方程为

$$F_d=G \tag{7}$$

由上述公式可知，影响取苗成功率的关键因素涵盖顶针长度、直径，以及顶苗杆运动速度与顶苗杆相关物理参数。鉴于顶苗杆材料、长度与直径等设计参数已契合取苗要求，故而主要调节顶针长度、直径以及顶苗杆运动速度来控制取苗成功率以及钵苗损失率。

3.2　接苗装置

接苗装置的结构设计需以穴盘苗的外形尺寸为核心依据，重点对取苗末端执行器进行参数匹配与结构优化。其中，接苗斗的高度需高于苗钵高度，一方面可避免机器作业过程中因振动导致苗钵脱落，另一方面能够保障取苗末端对苗钵形成稳定的包裹约束效果。

该末端执行器采用承接式取苗作业策略，其动作流程为：当顶苗装置将穴盘苗顶出穴盘后，接苗装置需穿过顶苗杆，精准移动至苗钵正下方完成承接动作。基于此作业需求，接苗斗前端需开设竖向通孔，且通孔直径应略大于顶苗杆外径，以确保接苗装置移动过程中与顶苗杆无干涉。

针对哈密瓜穴盘苗叶展角较大的特性（叶展角定义为叶片中脉与假想垂直茎秆之间的夹角，经试验测定其范围为 70° ~ 90°），为避免投苗阶段哈密瓜苗叶片与接苗斗发生剐蹭损伤，需对执行器关键参数进行限定：将气夹张开角设置为 30°，接苗斗最大张开量确定为 88.5 mm。

4　顶钵-接苗式取苗装置仿真分析

4.1　气动系统设计与仿真

为驱动顶钵-接苗式取苗装置实现对应作业流程，所设计的气动系统如图 7 所示。该系统的动力与处理单元包含气源（P）、过滤器（L）、调压阀（T）、气动气管快速接头单向节流阀 SL8 -02（T1 ~ T6）及压力表（G）；控制单元由电磁阀（YA1 ~ YA7）构成；执行单元则对应具体的取苗动作，包括控制气夹的夹持气缸（A）、取苗气缸（B）、控制分苗状态的分苗

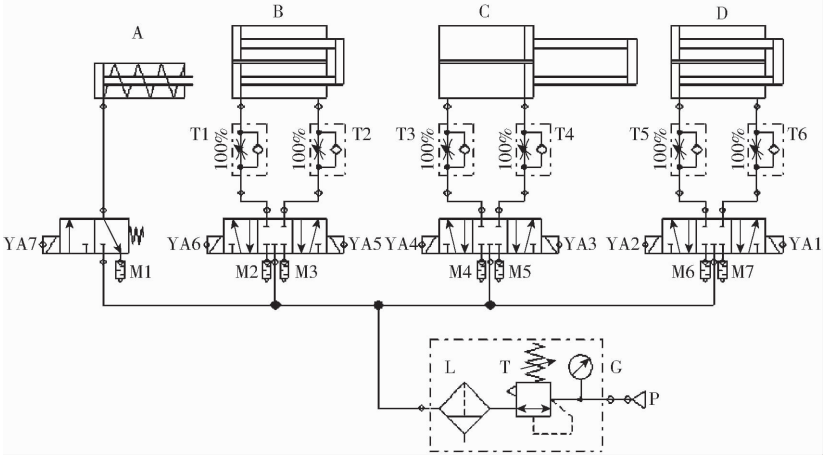


图 7　气动回路控制方案

Fig. 7　Pneumatic circuit control scheme

气缸(C)和顶苗气缸(D);此外,系统中配备了多个排气消声器(M1 ~ M7)。

基于既定气动回路与控制逻辑,本研究利用 FluidSIM - P 3.6 软件进行仿真分析,以验证所设计气动系统的合理性,重点关注各气缸的响应时序,结果如图 8 所示。仿真结果表明,系统执行气缸的响应时序符合设计预期。其具体动作逻辑为:控制系统检测到穴盘抵达指定工位后,顶苗气缸(收缩)、分苗气缸(伸出)、取苗气缸(收缩)及气夹(张开)处于初始状态;随后,顶苗气缸伸出,同时分苗气缸收缩;待气夹闭合且顶苗气缸完全伸出后,取苗气缸开始伸出;当接苗斗到达设定位置时,顶苗与取苗气缸相继收缩,分苗气缸则转为伸出;最终,在抵达投苗工位时,气夹张开以完成投苗。在气源压力 0.5 MPa、节流阀全开的工况下,测得系统单次作业循环时间为 3 s。

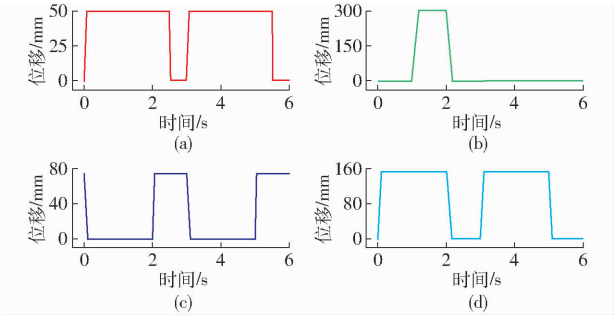


图 8 气缸响应时序图

Fig. 8 Cylinder response timing diagrams

4.2 顶钵-接苗式取苗装置运动仿真

该取苗装置虽顶钵-接苗整排作业模式具有较高的工作效率,但其紧凑的结构也对布局设计提出了更高要求。鉴于该装置在顶钵与接苗环节对协同性要求极高,为避免机构在装配与运动过程中发生干涉,本文采用 ADAMS 动力学仿真软件,构建了基于顶钵-接苗式取苗装置虚拟样机,并基于该虚拟样机开展仿真分析,相关仿真结果如图 9 所示。为深入探究取苗装置的运动特性,本文选取接苗斗作为核心研究对象,进行运动轨迹及对应分析。

仿真结果表明,该取苗装置在整个工作循环中运动协调性良好,未出现机构干涉。虚拟与实体样机接苗斗中心位置运动轨迹如图 10 所示,可看出其轨迹平滑且符合预期,能够精准完成取苗动作。

ab 段:对应于顶苗杆将苗钵顶出至接苗位置的过程,其功能是为接苗斗接取钵苗做准备。当运动至点 *b* 时,取苗斗将等待顶苗杆收缩,直至成功接取钵苗后,执行后续操作。

bc 段:该阶段可实现钵苗的纵向移动与横向分散。该阶段的主要目的是将所取的整排钵苗调整至

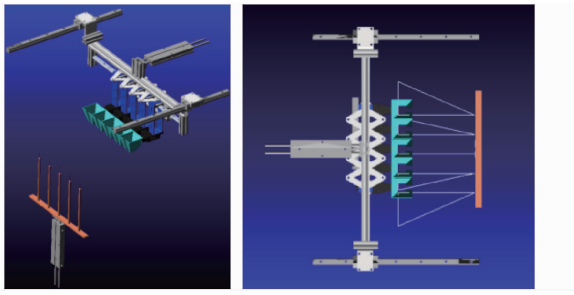
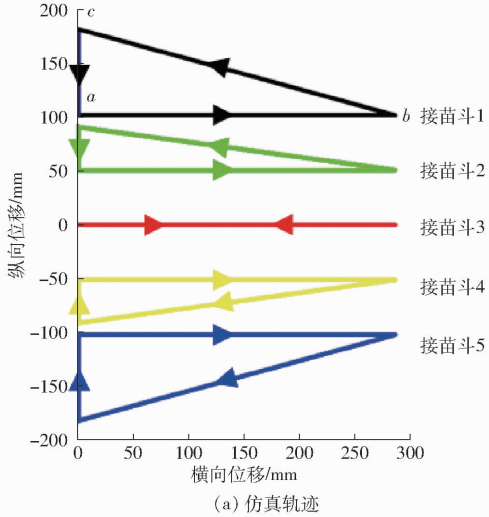
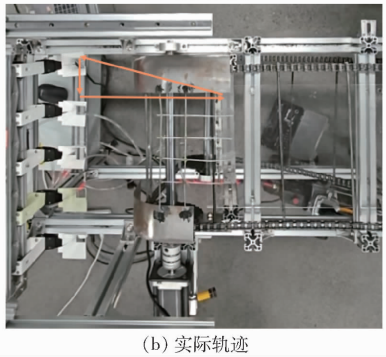


图 9 顶钵-接苗式取苗装置虚拟样机模型

Fig. 9 Virtual prototype model of top-pot seedling-gathering device



(a) 仿真轨迹



(b) 实际轨迹

图 10 虚拟与实体样机接苗斗中心位置运动轨迹

Fig. 10 Motion trajectory of virtual prototype's seed hopper centre position

与接苗杯间距相匹配的等间隔状态,并将其精准输送至接苗杯的正上方。当接苗斗运动至预设的点 *c* 时,会执行开合动作,确保钵苗能够顺利落入接苗杯中。

ca 段:此阶段为接苗装置的横向移动与聚合阶段。该阶段的主要功能是将接苗装置的横向间距调整恢复至与穴盘中钵苗的初始间距一致,同时复位至接苗作业的初始位置,从而为下一次取苗循环做好准备。

4.3 顶苗装置对苗钵 EDEM 仿真分析

鉴于穴盘基质颗粒间呈复杂、多向且非均匀分布的力链网络,现有技术难以直接精确标定其本构

参数，本文将其力学行为近似为土壤，通过文献[24－25]确定泊松比、剪切模量、弹性恢复系数、摩擦因数及接触法向刚度、切向刚度，如表 1 所示，考虑到基质（泥炭、蛭石、珍珠岩）颗粒间存在黏结作用，采用 Hertz－Mindlin with JKR 模型耦合 Bonding 模型以描述穴盘-基质、顶苗杆-基质及基质-基质的接触破碎行为。

表 1　EDEM 主要参数

Tab. 1　Key parameters of EDEM

对象	参数	数值
颗粒	密度/(kg·m^{-3})	793. 9
	泊松比	0. 246
	剪切模量/Pa	1. 597 × 10^{6}
	半径/mm	0. 5
	接触半径/mm	0. 7
顶苗针	密度/(kg·m^{-3})	7 890
	泊松比	0. 269
	剪切模量/Pa	7. 9 × 10^{10}
穴盘	密度/(kg·m^{-3})	1 400
	泊松比	0. 38
	剪切模量/Pa	8. 66 × 10^{8}
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0. 12
	动摩擦因数	0. 65
	静摩擦因数	0. 345
	法向刚度/(N·m^{-1})	1 × 10^{7}
	切向刚度/(N·m^{-1})	5 × 10^{6}
	法向应力/Pa	30 000
	切向应力/Pa	15 000
	粘结键半径/mm	0. 45
颗粒-穴盘	碰撞恢复系数	0. 4
	动摩擦因数	0. 02
	静摩擦因数	0. 2
	JKR 表面能/(J·m^{-2})	1. 513

具体步骤如下：首先，在钵体模型中生成基质颗粒，为此，需在穴孔口水平面构建一个四边形虚拟平面，为避免生成颗粒落入穴孔外部区域，该虚拟平面的边长应小于穴孔口尺寸。随后，将颗粒工厂设置于该虚拟平面之上。依据穴孔内部空间容积及基质颗粒粒径，将颗粒生成总数设定为 30 000 个，并设置颗粒生成速率为 10 000 个/s。依据表 1 所列参数建立苗钵模型，待所有材料参数设置完毕后，向整个系统施加重力加速度，并将求解时间步长设定为总计算时长的 10%。颗粒生成过程持续时间为 3 s。颗粒生成完成并沉降稳定后，完成基质模型的建立[26－28]。最终构建完成的穴孔及基质模型如图 11 所示。



图 11　EDEM 钵体模型

Fig. 11　EDEM bowl body model

导入不同规格的顶针几何模型，设定其统一的运动高度。顶针和顶苗杆运动结束后，在后处理界面中观察其 bond 键的损伤情况，据此选取 bond 键损伤程度较小的参数范围。

如图 12 所示，对不同顶针直径的仿真分析表明：当直径为 1 mm 时，基质颗粒受到的作用力较小；当直径在 2～4 mm 之间时，基质受力显著增大，且随直径增大，存在提前将苗钵顶出的风险，因此难以维持基质完整性。

如图 13 所示，对不同顶苗杆速度进行仿真分析可知：当速度为 150 mm/s 时对钵苗无明显影响；当速度由 250 mm/s 升至 450 mm/s 时，顶苗杆明显刺入苗钵造成结构性损伤，且苗钵受力显著增大，不利于顶苗过程中苗钵的完整性保持。

5　顶苗装置顶针优化试验

5.1　参数范围选择

根据前期仿真及预试验总结分析，对顶针相关参数进行范围选择[29]。

（1）顶针直径

顶针直径是影响其插入育苗基质过程的关键参数。初步试验表明：直径小于 1 mm 会导致顶针与顶苗杆连接处因强度不足而发生断裂；直径大于 3 mm 则易因扰动过大而提前将钵体顶出，干扰正常

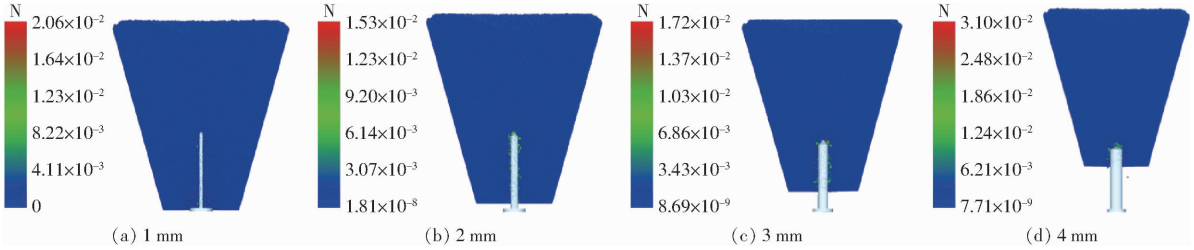


图 12　不同顶针直径仿真分析图

Fig. 12　Simulation analysis of different mandrel diameters

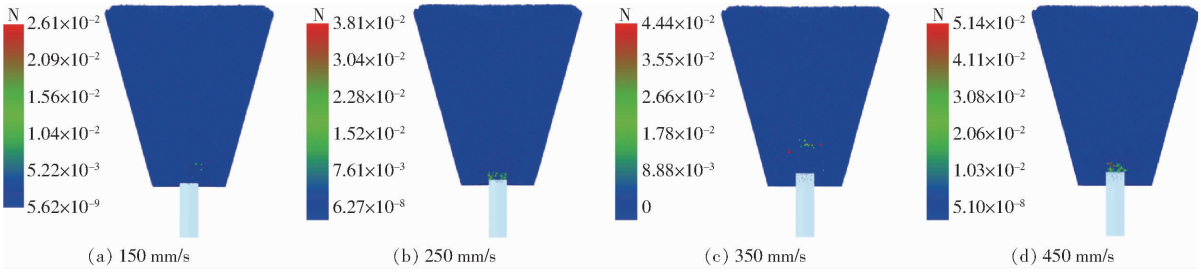


图 13 不同顶苗杆速度仿真分析图

Fig. 13 Simulation analysis of different ejector rod speeds

取苗流程。因此,需对顶针直径进行优化以平衡其结构强度与作业效果。

(2)顶针长度

顶针长度的设定决定了其插入育苗基质的最大深度,直接关系到作业效果。鉴于穴盘苗的基质填充高度与单元格高度基本一致,约为 45 mm,试验表明:顶针长度过短(小于 10 mm)将导致对钵苗的固定姿态作用不足,且稳定性差;而过长(大于 30 mm)则会过度深入,对钵苗根系造成损伤。

(3)顶苗杆速度

顶苗杆速度是决定顶苗过程平稳性的关键参数。为满足作业效率要求,顶针需在 1 s 内完成 150 mm 的行程,以确保钵苗抵达接苗位置,据此将理论顶苗速度设定为不低于 150 mm/s。同时,仿真分析表明,当速度超过 350 mm/s 时,会对苗钵产生较大损伤,故需将实际速度控制在此临界值以下。

5.2 正交试验

为实现顶针结构参数的优化,进而达成提高取苗成功率与降低基质损失的双重目标,本研究综合考量顶针设计与作业性能的关联,选取顶针直径、顶针长度及顶苗杆速度作为影响取苗效果的关键影响因素。基于此,采用 Box - Behnken 三水平响应面法,以上述 3 个参数为自变量,设计并实施了三因素三水平正交试验,其因素编码见表 2。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	顶针直径 A/mm	顶针长度 B/mm	顶苗杆速度 C/(mm·s^{-1})
-1	1	10	150
0	2	20	250
1	3	30	350

鉴于哈密瓜苗钵与前期研究番茄、辣椒钵苗的基质成分一致,仅穴盘体积存在差异,本研究采用仿真方法开展顶苗过程分析,以生成的 EDEM 钵体离散元模型为研究对象,在不同顶针参数条件下,将苗钵向上顶推至同一高度,并将苗钵底面与穴盘底面的距离定义为顶苗高度 H,作为评价指标。H 值越小,表明顶苗杆插入苗钵的深度越大,苗钵底部受到的损伤越严重,顶苗杆插入苗钵越深;H 值越大,则意味着顶针未完全刺入苗钵内部,存在顶针固定苗钵姿态不稳且未完全被顶推至目标位置前已提前脱离穴盘,存在顶出失败的风险。以上现象会间接导致取苗失败或损伤苗钵。

试验方案与结果如表 3 所示。

表 3 正交试验方案与结果

Tab. 3 Orthogonal test plan and results

序号	因素			顶苗高度/mm
	顶针直径/mm	顶针长度/mm	顶苗杆速度/(mm·s^{-1})	
1	3	20	150	125.4
2	2	20	250	119.5
3	1	10	250	117.5
4	2	10	150	120.4
5	1	20	150	119.7
6	2	30	150	122.7
7	2	30	350	123.5
8	3	10	250	120.2
9	2	20	250	119.3
10	2	20	250	119.6
11	2	20	250	119.5
12	3	20	350	125.0
13	1	30	250	118.4
14	2	20	250	119.4
15	1	20	350	118.3
16	2	10	350	118.0
17	3	30	250	128.0

5.3 方差分析

对顶苗高度回归模型的方差分析如表 4 所示,各模型的 P 值均小于 0.05,达到显著水平,而失拟项均不显著($P > 0.05$),证明模型拟合效果良好。在影响因素方面,顶针直径 A、长度 B 及顶针刺入速度 C 的一次项对顶苗高度均具有极显著影响($P < 0.01$)。交互作用分析显示,AB 与 BC 的交互项影响极为显著($P < 0.01$),而 AC 交互项的影响也达到显著水平($P < 0.05$)。此外,模型的决定系数 R^2 为 0.998 9,校正决定系数高达 0.997 5,同时变异系数较低且信噪比较高,这些指标共同证实了所建立模

型具有高度的可靠性与良好的预测精度。

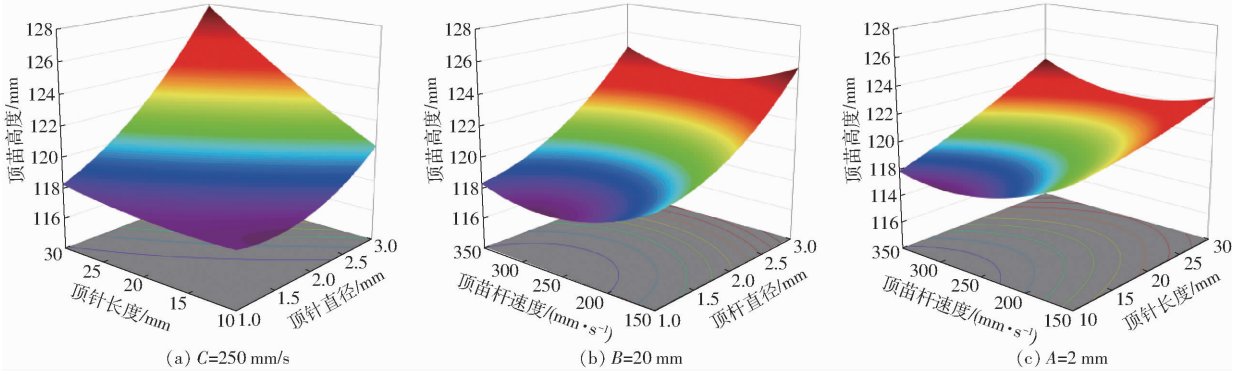
表 4　顶苗高度方差分析

Tab. 4　Analysis of variance for top shoot height

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	142. 84	9	15. 87	696. 55	<0. 000 1
A	76. 26	1	76. 26	3 346. 89	<0. 000 1
B	34. 03	1	34. 03	1 493. 53	<0. 000 1
C	1. 45	1	1. 45	63. 42	<0. 000 1
AB	11. 90	1	11. 90	522. 37	<0. 000 1
AC	0. 250 0	1	0. 250 0	10. 97	0. 012 9
BC	2. 56	1	2. 56	112. 35	<0. 000 1
A^2	6. 66	1	6. 66	292. 21	<0. 000 1
B^2	0. 398 1	1	0. 398 1	17. 47	0. 004 1
C^2	8. 05	1	8. 05	353. 19	<0. 000 1
残差	0. 159 5	7	0. 022 8		
失拟项	0. 107 5	3	0. 035 8	2. 76	0. 176 1
误差	0. 052 0	4	0. 013 0		
总计	143. 00	16			

5.4　响应面分析

为探究交互作用对顶苗高度的影响，绘制交互项响应面。如图 14a 所示，顶针长度为 10 mm 时，顶苗高度随顶针直径增大缓慢增大，顶针长度为 30 mm 时，顶苗高度随顶针直径增大明显增大；顶针直径为 1 mm 时，顶苗高度随顶针长度增大缓慢增大，顶针直径为 3 mm 时，顶苗高度随顶针长度增大明显增大；如图 14b 所示，顶针速度为 150 mm/s 时，顶苗高度随顶针直径增大明显增大，顶苗速度为 350 mm/s 时，顶苗高度随顶针直径增大缓慢增大；顶针直径为 1 mm 时，顶苗高度随顶针速度增大先减小后增大，顶苗直径为 3 mm 时，顶苗高度随顶针速度增大先减小后增大；如图 14c 所示，顶针速度为 150 mm/s 时，顶苗高度随顶针长度增大缓慢增大，顶针速度为 350 mm 时，顶苗高度随顶针长度增大缓慢增大；顶针长度为 10 mm 时，顶苗高度随顶苗杆速度增大先减小后增大，顶针长度为 30 mm 时，顶苗高度随顶苗杆速度增大面增大。综上所述，各因素间交互作用对响应值的影响规律，与前述方差分析所得结论高度一致，这证实了本研究所构建模型的可靠性。



(a) C=250 mm/s　(b) B=20 mm　(c) A=2 mm

图 14　试验因素交互作用对顶苗高度影响的响应曲面

Fig. 14　Response surfaces illustrating effect of experimental factor interactions on seedling height

5.5　顶钵装置参数优化

顶苗高度过低表明顶苗杆刺入深度过大，将加剧基质损伤；而高度过高则易导致苗钵姿态稳定性下降，降低取苗成功率。理论上，当顶苗高度 H = 120 mm 时，顶苗杆端面与苗钵底面处于临界接触状态(无插入)，该工况可兼顾基质完整性与苗钵姿态稳定性，被视为理想状态。本研究以趋近该理想高度为目标，基于 Design-Expert 软件建立目标函数

$$\begin{cases} Y(A,B,C) = 120\ \text{mm} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 1\ \text{mm} \leqslant A \leqslant 3\ \text{mm} \\ 10\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 30\ \text{mm} \\ 150\ \text{mm/s} \leqslant C \leqslant 350\ \text{mm/s} \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

求解得到最优参数组合为：顶针直径 1. 412 mm、顶针长度 19. 535 mm、顶苗杆速度 150. 675 mm/s，为了试验顺利进行，对以上参数取整，最后参数为：顶针直径 1. 4 mm、顶针长度 20 mm、顶苗杆速度 150 mm/s，以最优参数进行移栽机取苗装置台架试验。

5.6　台架试验

5.6.1　试验条件

为验证仿真所得顶针参数的合理性及顶钵-接苗取苗装置的整体运行性能，2025 年 8 月以新疆维吾尔自治区设施农业和特色农业研究发展中心培育的“西州蜜 25 号”哈密瓜(穴盘苗苗龄 25 d)为试验材料，开展室内台架验证试验(图 15)。试验选用 4 盘标准穴盘苗，每盘 50 株，共计 200 株，聚焦移栽过程中钵苗破损率与取投苗成功率两大核心指标，系统验证哈密瓜钵苗取投苗装置的工作可行性。

5.6.2　评价指标

移栽作业的成功关键在于低损取苗与精准投苗，因此选取钵苗破损率反映取苗过程对钵体的破坏程度，选取投苗成功率反映顶钵-接苗流程的准确



图 15 台架试验装置

Fig. 15 Bench test device

1. 接苗装置 2. 驱动电机 3. 气泵 4. 控制系统 5. 顶苗装置 6. 机架 7. 穴盘苗

性,作为主要评价指标。结合试验所用 5 孔/行规格育苗盘的实际尺寸,设定装置理想工作状态为:单次接取 5 个钵苗且全部准确投放至指定位置,以此作为性能评判的基准。取投苗成功率与钵苗破损率的具体计算式为

$$S_1 = \frac{n_j}{n_z} \times 100\% \tag{9}$$

$$S_2 = \frac{m_s}{m_z} \times 100\% \tag{10}$$

式中 S_1——取苗成功率,%

n_j——接苗数量,株

n_z——总取苗数量,株

S_2——钵苗损失率,%

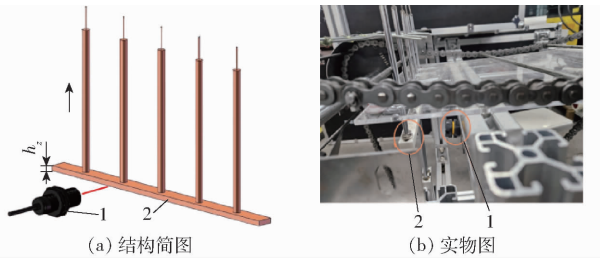
m_s——取苗之后穴盘与剩余基质以及损失基质质量,kg

m_z——取苗之前穴盘与钵苗总质量,kg

5.6.3 试验结果分析

在顶钵-接苗取苗装置台架试验中,通过调节节流阀 SL8-02 旋钮控制气缸升降速度,从而实现可调节顶苗杆运动速度。具体速度值可通过光电式传感器与控制系统联合测定。如图 16 所示:基于已知顶苗杆支撑板厚度 h_z,将传感器布设于其侧面;当光电传感器触发信号时,其时间参数被传输至控制系统;控制系统通过预置算法计算得到速度值,即顶苗杆支撑板厚度 h_z 与传感器信号触发时间间隔 t 比值。

采用优化后的顶针参数对 200 株哈密瓜钵苗开展台架试验,如图 17 所示,测得取苗成功率为 94.50%,钵苗损失率为 5.94%。试验过程中气动系统触发间隔设定为 3 s,理论取苗频率达 100 株/min,作业性能符合哈密瓜移栽机设计要求。试验中取苗失败主要归因于两个因素:穴盘注水孔加工公差导致顶针穿刺穴盘,干扰顶苗过程;部分穴盘苗因根系发育不良且盘结性较弱,致使顶苗杆贯穿苗钵。同时,基质破损现象主要发生于苗钵上表面无根系固结区域,装置运行时的机械振动导致松散基质脱落。该装置的接苗机构表现出良好稳定性,当顶苗机构成功推出苗钵时,接苗机构可实现 100% 的苗钵接取与精准投送。

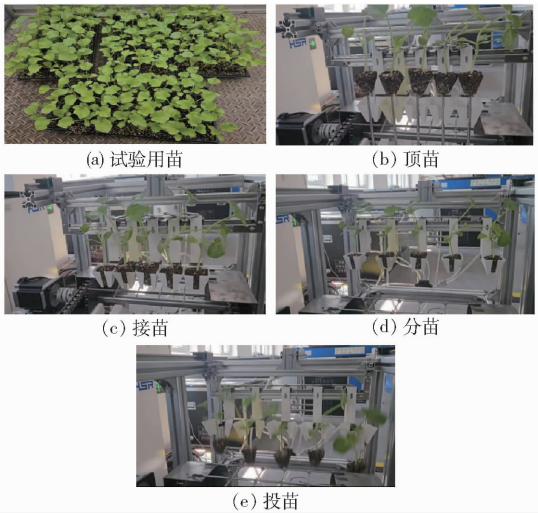


(a) 结构简图 (b) 实物图

图 16 顶苗杆测速装置

Fig. 16 Piston rod speed measurement device

1. 光电传感器 2. 顶苗杆支撑板



(a) 试验用苗 (b) 顶苗

(c) 接苗 (d) 分苗

(e) 投苗

图 17 台架试验工作流程

Fig. 17 Bench test workflow

6 结论

(1)阐述了顶钵-接苗式取苗装置的基础结构及工作原理。基于钵苗物理特性试验,测定并分析其力学特性、形态参数等关键指标;结合顶苗过程力学模型的理论解析,分析顶苗过程力学模型,进一步得出顶苗装置影响取苗效率核心结构参数。

(2)基于整排顶钵-接苗、间隔投苗的作业模式,设计了取投苗装置气动控制系统。通过联合运用 ADAMS 与 FluidSIM-P 3.6 软件,对取苗装置的机械系统结构与执行元件的动作时序进行了仿真分析,从而验证了所提出的机械结构布局与气动回路配置方案的可行性。

(3)基于 Box-Behnken 中心组合试验设计,构建以顶苗高度为响应指标的回归模型,并利用 EDEM 仿真,实施正交试验。通过方差分析与响应

面分析，明晰了各顶针参数对评价指标的作用机制，并据此求解出最优参数组合。试验验证结果表明：采用该参数组合的取苗装置，其取苗成功率达到94.50%，钵苗损失率为5.94%，且未出现茎秆损伤，各项性能均满足哈密瓜移栽机的实际作业需求。

参 考 文 献

[1] 余家庆. 中国西甜瓜进出口贸易影响因素研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2024.
Yu Jiaqing. Study on influencing factors of import and export trade of watermelon and melon in China[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2024. (in Chinese)

[2] 张胜楠，吴宇飞，李发永，等. 基于最小数据集体系优化对新疆西甜瓜主产区土壤健康评价[J/OL]. 生态与农村环境学报.(2025-08-08)[2025-12-19]. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0451.

[3] 刘艳. 吐鲁番市西甜瓜种植生产机械化现状浅析[J]. 农业机械，2024(10)：74-77.
Liu Yan. A brief analysis of the current state of mechanisation in watermelon and melon cultivation and production in Turpan city [J]. Farm Machinery, 2024(10): 74-77. (in Chinese)

[4] 李红双，马健峰. 基于反转运动规律的蔬菜移栽机凸轮取投苗传动机构研究[J]. 农业机械学报，2025，56(11)：223-233，263.
Li Hongshuang, Ma Jianfeng. Cam-driven seedling picking and placing transmission mechanism of vegetable transplanters based on reverse motion law[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(11):223-233,263. (in Chinese)

[5] 任朝阳，胡敏娟，严伟，等. 旱地穴盘苗移栽机取苗机构研究现状[J]. 中国农机化学报，2025，46(2)：41-47.
Ren Chaoyang, Hu Minjuan, Yan Wei, et al. Research status on seedling picking-up mechanism of dryland hole tray seedling transplanting machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(2): 41-47. (in Chinese)

[6] 孟发，张秀花，孔德刚，等. 蔬菜全自动移栽机关键技术研究现状[J]. 河北农机，2025(8)：9-14.

[7] 刘蒙滋，姜凯，王秀，等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究，2024，46(10)：1-8.
Liu Mengzi, Jiang Kai, Wang Xiu, et al. Research status and prospect of automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 1-8. (in Chinese)

[8] 陈永生. 我国蔬菜机械化发展回顾与展望[J]. 蔬菜，2025(增刊2)：1-8.
Chen Yongsheng. Review and prospect of vegetable mechanization development in China[J]. Vegetables, 2025(S2):1-8. (in Chinese)

[9] 辛亮，孙铭翼，李泽泽，等. 高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：161-169.
Xin Liang, Sun Mingyi, Li Zeze, et al. Optimization design and experiment of high catching andlow planting type differential variable attitude planetary gear system planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 161-169. (in Chinese)

[10] Kamal R, Md Nafiul I, Mohammod A, et al. Onion transplanting mechanisms: a review[J]. Journal of Precision Agriculture Science and Technology,2020,2(4): 195-208.

[11] Nandede B M, Raheman H, Deore H V. Selection of suitable furrow opener and furrow closer for vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Vechanization in Asia, Africa,and Latin America, 2014,45(2): 40-47.

[12] Durga M L, Rao A S, Kumar A A, et al. Develop-ment and evaluation of mini-tractor drawn single row transplanter for vegetable crops[J]. Agricultural Sciences,2018,9(3):681-683.

[13] Rahul K, Raheman H, Paradkar V. Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166:105014.

[14] Nafiul M I, Zafar M I, Mohammod A, et al. Kinematic analysis of a clamp-type pickingdevice for an automatic pepper transplanter[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 627.

[15] 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)

[16] 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)

[17] 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. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 1-10. (in Chinese)

[18] 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(S1): 110-117. (in Chinese)

[19] 刘洋，何义川，韩绿化，等. 蔬菜穴盘苗自动取苗机构研究进展[J]. 新疆农垦科技，2023,46(6):52 - 56.
[20] 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)
[21] 张学东. 顶夹式蔬菜穴盘苗自动取投装置设计与试验[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院，2024.
Zhang Xundong. Design and experiment of automatic feeding device for ejector and clamp vegetable hole tray seedlings[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2024. (in Chinese)
[22] 刘凯华，刘威，祝露，等. 国内外蔬菜移栽机械发展现状与路径[J]. 现代农业装备，2025,46(3):1 - 8.
Liu Kaihua, Liu Wei, Zhu Lu, et al. Current status and development of vegetable transplanting machinery[J]. Modern Agricultural Equipment, 2025, 46(3): 1 - 8. (in Chinese)
[23] 彭泽辉. 穴盘苗气力顶夹式移栽机取苗装置设计与试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学，2025.
Peng Zehui. Design and experimental research on a pneumatic ejection-gripping seedling extraction device for plug seedling transplanters[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2025. (in Chinese)
[24] 马国鑫. 生物炭苗钵低损取苗增强机理与气顶—包裹夹取式取苗机构研究[D]. 镇江:江苏大学，2021.
Ma Guoxin. Study on enhancement mechanism of low loss seedlingpicking in biochar and air ejection-package clamping pick-up device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
[25] 童俊华，石虎峰，武传宇，等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报，2019,50(8):107 - 116.
Tong Junhua, Shi Hufeng, Wu Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107 - 116. (in Chinese)
[26] 赵翔烽，颜华，别琼，等. 基于 EDEM - RecurDyn 的移栽机取苗爪取苗仿真与试验[J]. 农业机械学报，2024,55(增刊1):197 - 206.
Zhao Xiangfeng, Yan Hua, Bie Qiong, et al. Calibration of seedling pot particle parameters and simulation and experimentation of seedling picking clawbased on EDEM - RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 197 - 206. (in Chinese)
[27] 梁桀. 基于甘蓝穴盘苗的取苗末端执行器设计与研究[D]. 南宁:广西大学，2024.
Liang Jie. Design and research of end effector for seedling pick-up of cabbage seedlings[D]. Nanning: Guangxi University, 2024. (in Chinese)
[28] 钟蕾. 全自动番茄移栽机取苗机构的设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学，2022.
Zhong Lei. Design and experiment of seedling picking mechanism of automatic tomato transplanter[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[29] 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.
Zhang Xuedong, Liu Lijing, Ning Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clampling of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 115 - 124. (in Chinese)