

柑橘育苗袋自动开袋装钵机设计与试验

李震^{1,2} 张翀¹ 吕石磊^{1,2} 毛丹婷¹ 曹柏薇¹

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 国家柑橘产业技术体系机械化研究室, 广州 510642)

摘要: 为解决柑橘育苗钵人工装填方式成本高、作业效率低等问题,本研究设计了一种基于多机构协同的柑橘育苗袋自动开袋装钵机,包含真空吸附自动开袋、机械手撑袋和振动下料结构设计。确定了储袋机构、取袋-开袋装置、撑袋机械手、下料机构等部件的结构和关键参数。通过取袋-开袋和下料一致性正交试验,确定了影响开袋成功率和装填一致性的主要因素,最优参数组合为 I 型软硅胶吸盘、吸盘吸附时间 2 s、吸附压力 -90 kPa、营养土含水率 8% ~ 13%、料仓营养土剩余量 40% ~ 70%、振动器气压力 0.3 MPa,此时,育苗袋平均装填量为 1 800 g,平均开袋装填时间为 30 s,开袋装填成功率 88.5%,实现了自动开袋装填 120 枚/h,开袋效率高,装填均匀,能够满足柑橘容器育苗开袋装填工作要求。研究结果可为柑橘育苗自动化机械开发应用提供理论依据和设计参考。

关键词: 柑橘; 育苗袋; 自动开袋; 装钵机; 装填一致性

中图分类号: S223.1⁺ 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0068-09

OSID:



Design and Experiment of Automatic Bag-opening and Potting Machine for Citrus Nursery Containers

LI Zhen^{1,2} ZHANG Chong¹ LÜ Shilei^{1,2} MAO Danting¹ CAO Baiwei¹

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Aiming to address the issues of high cost and low operational efficiency associated with manual filling of citrus seedling pots, an automatic bag-opening and pot-filling machine for citrus seedling bags was designed based on multi-mechanism cooperation. The design included vacuum adsorption for automatic bag opening, a manipulator for holding the bag open, and vibration-assisted filling. The structures and key parameters of components such as the bag storage mechanism, bag-taking and opening device, bag-holding manipulator, and filling mechanism were determined. Through orthogonal experiments on bag-taking/opening and filling consistency, the main factors influencing the success rate of bag opening and filling uniformity were identified. The optimal parameter combination was as follows: type-I soft silicone suction cup, adsorption time of 2 s, adsorption pressure of -90 kPa, nutrient soil moisture content of 8% ~ 13%, remaining nutrient soil in the hopper of 40% ~ 70%, and vibrator air pressure of 0.3 MPa. Under these conditions, the average filling amount per seedling bag was 1 800 g, the average time for bag opening and filling was 30 s, and the success rate of bag opening and filling reached 88.5%. This achieved an automatic bag-opening and filling capacity of 120 bags per hour, with high bag-opening efficiency and uniform filling, meeting the requirements for bag-opening and filling operations in citrus container seedling cultivation. The research results can provide theoretical basis and design references for the future development and application of automated machinery for citrus seedling cultivation.

Key words: citrus; seedling bag; automatic bag opening; pot-filling machine; filling uniformity

收稿日期: 2025-02-28 修回日期: 2025-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271997、3191797)、广州市重点研发计划项目(2024B03J1309)和国家现代农业产业技术体系项目(CARS-26)

作者简介: 李震(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lizhen@scau.edu.cn

通信作者: 吕石磊(1984—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息化研究,E-mail: lvshilei@scau.edu.cn

0 引言

柑橘是世界第一大类水果,也是中国南方栽培面积最广、经济地位最重要的果树。容器育苗具有提高苗木的生长速度、移栽方便、育苗成活率高等优势,正逐步成为一种主要的育苗方式^[1]。传统的露地育苗也逐步发展成为利用大棚和温室等设施实现容器育苗^[2-10]。

目前,在柑橘容器育苗的各环节中,部分环节已逐步实现机械化作业,如苗木搬运、自动播种、灌溉系统等^[11-12]。装钵机作为容器育苗的关键设备,硬钵装钵作业已有机化设备投入使用^[13],国外如德国 Mayer 公司的 TM2700 型、比利时 Demtec 公司的 SMART 型、荷兰 Visser 公司的 VTF Filler 型以及 JAVO 公司的 Standard 2.0 型等花盆装填机,均采用流水线方式作业对硬钵进行装填,且部分机型实现了与移栽阶段的对接,但未见塑料软钵相关设备的研发^[11,14-17]。国内基质装填装备的研发还处于起步阶段^[14-18],徐勤超等^[19]设计的柑橘育苗钵装填转运机,蔡嘉杰^[20]设计的苗圃园营养软钵自动装土机,高原源^[21]开发的穴盘育苗压穴和覆土装备可以进行柑橘育苗钵的装填工作,但存在设备体积庞大、需人工辅助将育苗袋撑开等问题,自动化程度较低,无法满足育苗机械化发展需求^[22]。

现有的硬钵装钵机在一定程度上满足硬钵的装填需求,能实现自动化或半自动化的装钵操作^[11,14,22-24]。然而,相较于硬钵,软钵因其质地柔软、透气性好,在移栽过程对苗木根系的损伤极小,有利于保持根系的完整性和活性,在柑橘容器育苗中具有独特的优势^[9-10]。但由于软钵质地柔软、形状易变形等特性,使其在开袋与装填过程难以实现稳定、精准的操作,所以在该领域内对于软钵开袋装钵机的研究和应用较少^[15,25-26]。

总之,现有的育苗袋装填设备不能满足柑橘育苗钵装填的自动化需求,为此,本研究结合人工装填作业流程与营养软钵装填技术要求,设计一种包括储袋、取袋、开袋、撑袋、下料等功能的柑橘育苗袋自动开袋装钵机,并制作样机进行开袋和装填性能试验,以期降低人工开袋装填劳动强度,提高育苗袋装钵效率,推进柑橘育苗自动化。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

依照人工开袋流程,设计柑橘育苗袋自动开袋装钵机,整机结构如图 1 所示,主要由储袋机构、取袋机构、开袋机构、撑袋机构和下料机构 5 个机构组

成。整机根据人工装土的作业流程与营养软钵自动装土的总体技术要求,建立各工序的设计与组成方案,储袋机构使用 1 个推进气缸对育苗袋进行压实,防止育苗袋倾倒;取袋机构使用 1 组取袋吸盘、1 个取袋推进气缸和 1 个取袋摆台气缸完成自动取袋转送任务;开袋机构使用推进气缸和 1 组开袋吸盘完成开袋任务;撑袋机构采用多连杆结构的撑袋机械手对育苗袋保持支撑状态;下料机构使用仓门气缸控制下料仓门的开合,通过气动振动器振动料仓,减少土壤的粘附与堵塞,在料仓的下料口连接 1 根下料管道以提高装填的准确度。

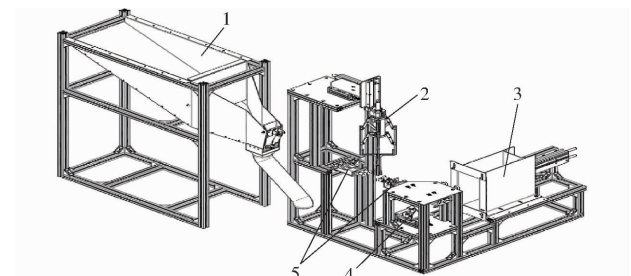


图 1 装钵机系统结构

Fig. 1 System architecture of an automated bag-opening and potting machine for citrus containerized nursery cultivation

1. 下料机构 2. 撑袋机构 3. 储袋机构 4. 取袋机构 5. 开袋机构

1.2 工作原理

装钵机由动力系统、吸附系统和控制系统构成,以空气压缩机为动力源提供压缩空气,配合真空泵生成吸附力,通过电磁阀对气缸、吸盘等执行元件进行协同控制。

整个工作流程分为 4 个阶段:①由储袋机构气缸压实育苗袋堆垛,取袋机构通过摆台气缸定位后驱动取袋气缸前伸,利用真空吸盘吸附 1 枚育苗袋并回缩完成取袋。②摆台气缸旋转至开袋工位,开袋气缸推进吸盘组夹持袋体,在真空吸附状态下通过气缸回缩实现袋口开启。③撑袋机械手经下行气缸驱动将撑爪插入袋内,通过开袋气缸回缩带动撑爪扩张固定袋体,同时摆台气缸旋转至下料位。④由仓门气缸回缩开启下料仓门,配合气动振动器完成营养土装填后复位,实现全流程闭环作业。整个工作流程在以 PLC 为核心的控制系统下通过磁性开关实时监测气缸行程和工作状态,结合按键信号实现设备的启停控制。

2 装钵机关键部件设计

2.1 储袋机构

如图 2 所示,为满足装钵机连续作业供袋需求,避免频繁人工补袋,设计了垂直堆叠式储袋机构,使

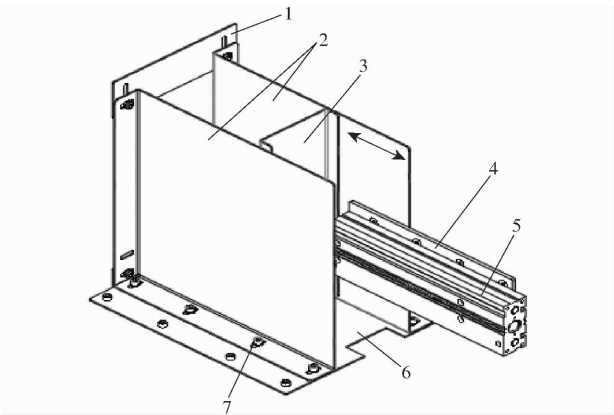


图2 储袋机构结构

Fig. 2 Structure of bag storage mechanism

1. 出袋端挡板 2. 侧挡板 3. 推进板 4. 气缸安装板 5. 推进气缸 6. 储袋仓固定板 7. 侧挡板安装槽

用大行程的导杆气缸安装1块推进板为竖直堆垛育苗袋提供适宜的弹性背压力,以保持育苗袋的竖直堆叠状态和允许育苗袋在取袋动作时产生弹性位移,便于人工补充育苗袋。

根据柑橘育苗常用育苗袋尺寸(长300 mm,宽127 mm),确定储袋机构尺寸参数,储袋仓内部宽度120 mm,竖直高度310 mm,推进气缸距出袋端265 mm,为防止育苗袋在堆叠时向仓外倒塌,在出袋端设置挡板。为使储袋机构拥有较大的储袋量,避免频繁补充育苗袋,气缸选择MGPM20-250Z型,行程20~250 mm,计算得到最大储袋量为950枚。为适应不同规格育苗袋需求,在侧挡板设计1个长度为20 mm的安装槽,使两侧挡板可向外平移40 mm。

2.2 取袋-开袋装置

为实现从储袋机构逐个取出育苗袋,并转交至开袋机构进行开袋,设计了取袋-开袋装置,包含取袋机构和开袋机构如图3所示。取袋吸盘阵列对应育苗袋的中部位置且须避开育苗袋上的透气孔,开袋吸盘阵列则对应育苗袋袋口位置,如图4所示。

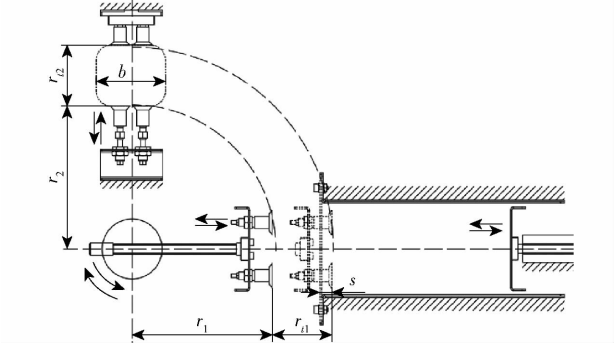


图3 取袋-开袋装置结构参数示意图

Fig. 3 Schematic of structural parameters of bag picking - opening device

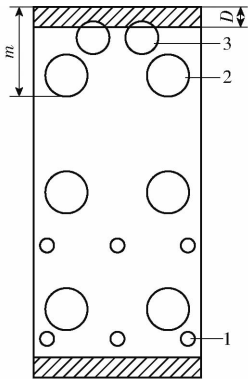


图4 真空吸盘的吸附位置

Fig. 4 Adhesion position of vacuum suction cup

1. 育苗袋排水孔 2. 取袋吸盘吸附位置 3. 开袋吸盘吸附位置

如图3所示,为了将育苗袋从储袋机构出袋端取出且摆动后不与两侧的开袋吸盘组发生干涉,取袋气缸行程、摆动半径和开袋气缸行程等参数应满足关系为

$$\begin{cases} r_1 > r_2 \\ r_{12} > b \\ r_1 + r_{11} < r_2 + r_{12} \\ r_{11} - s > \sqrt{2mD - D_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 r_1 、 r_2 ——取袋吸盘、开袋吸盘初始位置,mm
 r_{11} 、 r_{12} ——取袋气缸、开袋气缸工作行程,mm
 b ——开袋后育苗袋宽度,取127 mm
 s ——取袋吸盘在取袋时压入储袋机构前端距离,取25 mm
 m ——取袋吸盘下边缘到育苗袋上边缘最小距离,取50 mm
 D ——储袋机构出袋端挡板尺寸,取10 mm

在取袋机构将育苗袋取出并转送至开袋工位后,开袋机构使用1组吸盘吸附袋口两侧打开袋口,如果袋口开口过小则不利于撑袋机械手进入袋内进行撑袋。根据前期多次试验结果,开袋机构选用行程为150 mm的MGPM16-150Z型导杆气缸,在开袋气缸上方安装1块可调节的限位板将行程限制到 r_{12} 为135 mm,从而实现开袋后袋口大致为127 mm×50 mm矩形,保证撑袋机械手能够顺利插入育苗袋内,取袋气缸则选用行程100 mm的MGPM20-100Z型直线导杆气缸,即 r_{11} 为100 mm。

2.3 真空吸盘选型

为了提高吸盘吸附效果,对真空吸盘进行选型。由于塑料软薄膜育苗钵具有形状不规则且表面波动较大等特性,软硅胶材质优良的柔软性和弹性,能够使吸盘更好地贴合薄膜表面,确保密封性并提高吸附效果,因此针对市面常用3种软硅胶真空吸盘进行选型试验。

为选取满足设备吸附性能的真空吸盘,需对真空吸盘直径进行理论估算,计算式为

$$d \geq \sqrt{\frac{4Wft}{\pi np}}$$

(2)

式中 W ——物料质量,取 0.006 3 kg(1 枚育苗袋质量为 6.3 g)

f ——取袋时需克服的摩擦力,N

d ——吸盘直径,mm

t ——安全系数,取 8

p ——吸盘内负压,MPa

n ——吸盘数量,取 6

由于系统在工作时,存在负压损耗,一般情况下,吸盘内负压 p 为 $(63\% \sim 95\%)p_v$, p_v 为真空泵最大负压,本研究使用的真空泵最大负压为 -0.1 MPa,为保证系统最低负压需求,吸盘内负压 p 取 -0.06 MPa,由于储袋机构出袋端的挡板设计,通过前期试验得,取袋机构将育苗袋取出时需克服约 10 N 摩擦力,所以取 f 为 10 N,将数据代入式(2)可得 $d \geq 17.83$ mm。综合考虑实际工况,为了保证系统吸附效果,选用直径大于 20 mm 的真空吸盘。

根据计算结果,结合市场出售真空吸盘尺寸规格,选取直径为 26 mm 的软硅胶材质吸盘进行试验,如图 5 所示,Ⅰ型(F26-S)、Ⅱ型(DP26)和Ⅲ型(SP26)真空吸盘直径均为 26 mm。试验使用开袋机构的一对开袋吸盘接口,配备压力传感器(台达,

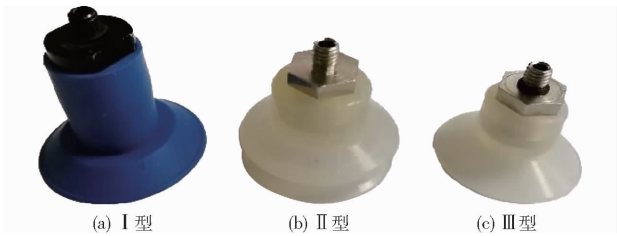


图 5 3 种不同类型的真空吸盘

Fig. 5 Three types of vacuum suction cups

DPA01M 型)、真空泵(武藤,1300V-30L 型)和 MODBUS 模拟量采集模块(格控,RTU307B 型)组成的负压测量系统,监测并收集真空吸盘在工作过程的压力变化。测试时,调整真空泵气压分别为 -60 、 -70 、 -80 、 -90 kPa。电磁阀开启时间为 3 s。真空吸盘在工作过程的负压变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,Ⅰ型和Ⅱ型吸盘在吸附时负压明显大于Ⅲ型吸盘,Ⅰ型吸盘在吸附时能稳定保持较大负压,Ⅱ型吸盘表现略差于Ⅰ型吸盘,Ⅲ型吸盘在 4 组试验下负压表现均不理想。所以取袋机构和开袋机构均选用直径为 26 mm 的Ⅰ型真空吸盘。

2.4 撑袋机构设计

2.4.1 撑袋机构结构

为便于下料机构对育苗袋进行装填动作,设计撑袋机构将开口的育苗袋完全撑开,同时对育苗袋有足够的支撑重量,保证育苗袋在装填时不会掉落^[27]。如图 7 所示,撑袋机构主要由多连杆撑袋机

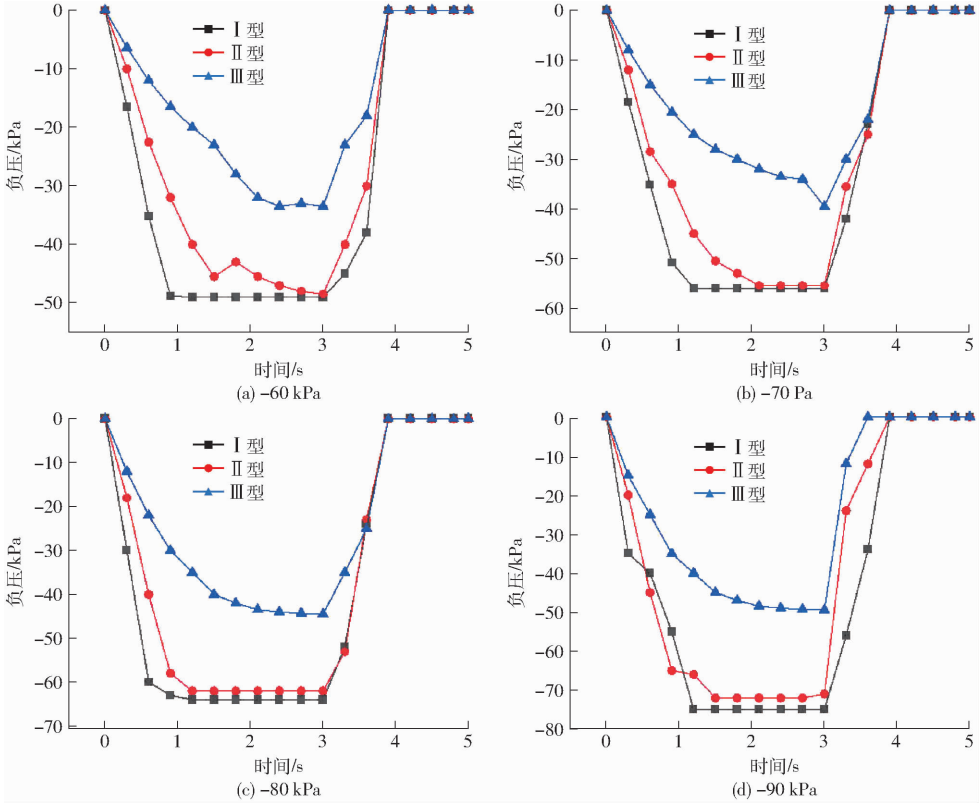


图 6 真空吸盘压力变化曲线

Fig. 6 Pressure variation curves of vacuum suction cup

械手、撑袋气缸、撑袋摆台气缸及其连接件组成,开袋机构将育苗袋开口后,机械手下行气缸推动机械手垂直向下插入育苗袋内,随后撑袋气缸收缩使机械手张开,将育苗袋撑开并保持育苗袋被撑开的状态。

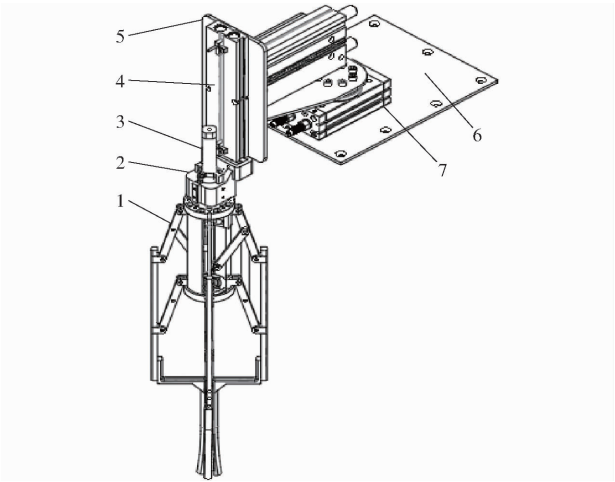


图 7 撑袋机构示意图

Fig. 7 Structure of bag-holding manipulator

1. 撑袋机械手 2. 机械手安装块 3. 撑袋气缸 4. 机械手下行气缸 5. 气缸安装板 6. 撑袋机构安装板 7. 撑袋摆台气缸

2.4.2 撑袋机械手尺寸设计

如图 8 所示,撑袋机械手在执行撑袋动作时,微型气缸收缩,带动微型气缸下端的连接件由撑袋前位置 A 运动到撑袋后位置 A' ,通过杆 AC 带动 4 组以微型气缸为中心的四连杆机构,实现撑袋爪以 MP 为半径向上摆动 θ 的弧线轨迹运动,最终完成撑袋动作。

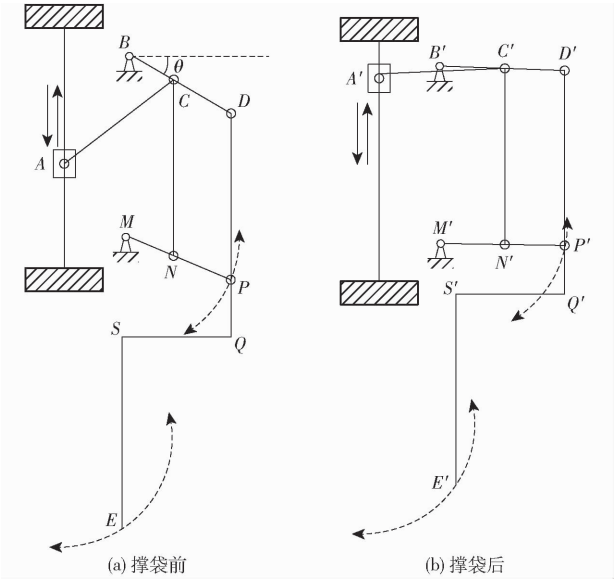


图 8 撑袋机械手运动轨迹

Fig. 8 Motion trajectory of bag-supporting manipulator

如图 9 所示,育苗袋完全撑开后,可以视作边长 a 约为 100 mm 的正方形,为了能够将育苗袋完全撑

开,并且保持支撑,机械手移动位移 l 及杆长 l_{BD} 计算式为

$$l = l_{BD}(1 - \cos\theta) \tag{3}$$

$$l_{BD} \geq \frac{a}{\sqrt{2}(1 - \cos\theta)} \tag{4}$$

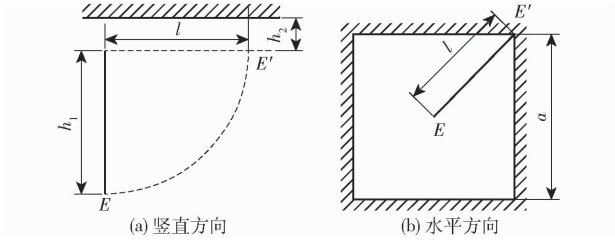


图 9 机械手位移示意图

Fig. 9 Schematics of robotic arm displacement

为使机械手结构更加紧凑,根据撑袋前后机械手的状态,选用标准行程为 60 mm 的气缸驱动机械手。为了避免与零件产生干涉,限制 θ 最大值为 80° 。由式(4)可得 l_{BD} 为 85.19 mm,考虑实际加工因素,杆长 l_{BD} 设计为 85 mm。

如图 9a 所示,机械手在完全撑袋状态时,机械手撑开所形成的正方形边长计算式为

$$a = \sqrt{2}l = 101.4 \text{ mm} \tag{5}$$

因此,机械手完全撑袋时形成的正方形边长 a 大于育苗袋完全撑开时的边长,满足撑袋要求。

2.5 下料机构设计

为给育苗袋装填基质土,设计了下料机构,如图 10 所示,主要由下料管道、仓门气缸、气缸固定件、仓门挡板和料仓组成。下料机构通过仓门气缸的伸缩控制下料仓门的开合,为提高下料的流畅度与一致性,在下料仓底部装有气动振动器,用于振动基质土^[28],减少因粘性和湿度造成的堵塞现象;为提高下料准确性,在下料口连接 1 根下料管道,用于将基质土送入育苗袋。

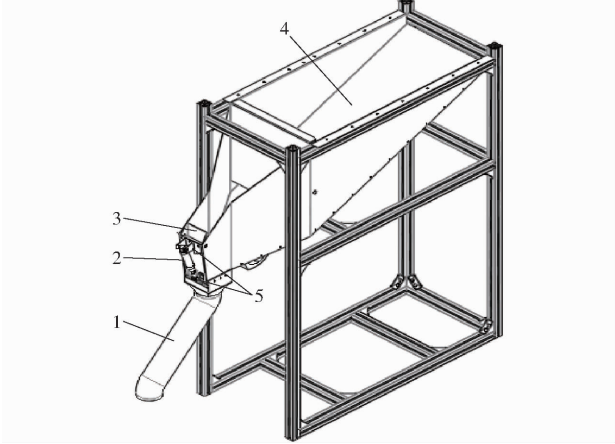


图 10 下料机构结构示意图

Fig. 10 Schematic of feeding mechanism

1. 下料管道 2. 仓门气缸 3. 下料仓门 4. 料仓 5. 气缸安装件

根据土壤流动休止角 39.28° ，标准差 0.42° ^[29]，为保证土壤流动性，料仓倾斜角 β 计算式为

$$\beta = \alpha + \Delta\beta \tag{6}$$

式中 α ——土壤休止角，取 39°

$\Delta\beta$ ——安全裕度角，取 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$

经计算可得，料仓倾斜角 β 为 $45.5^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ ，为便于加工，料仓倾斜角取 45° ，同理，下料管道倾斜角取 45° 。

根据前期测量，装填 1 枚育苗袋需要约 1.5 L 基质土，为避免人工频繁补充基质土，同时考虑设备体积不宜过大，设计料仓主体长为 700 mm，宽为 310 mm，高为 360 mm，则料仓有效容积可达 78 L，满载情况下可为 52 枚育苗袋装填基质土，满足设备的装填需求。

由于下料管道需要在撑袋机械手内部工作，根据机械手设计尺寸可得，其内部为 1 个边长 100 mm 正方形，为避免机构间相互干涉，同时保证满足下料需求，设计下料管道直径为 80 mm，下料管道与下料口连接处尺寸为 95 mm × 95 mm。

根据料仓及下料口尺寸，设计仓门挡板宽为 80 mm，长为 200 mm，为给仓门提供足够的开合角度，保证下料流畅度，设计仓门气缸行程为 25 mm。

3 控制系统设计

控制系统主要由台达 DVP40ES200T 型可编程控制器，4V210-08/DC24V 型气动二位五通电磁阀，VT307V-G51-02 型二位三通真空电磁阀，压力传感器（DPA01M-P 型）和气缸磁性开关（D-A93 型）等组成。控制系统框图如图 11 所示，展示了 PLC、气动元件及传感器之间的连接关系，以及控制信号流向。

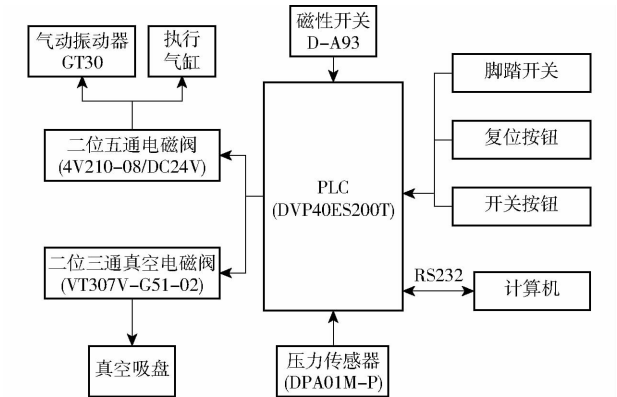


图 11 控制系统框图

Fig. 11 Block diagram of control system

系统使用台达 WPLSoft 编程软件进行梯形图编程。PLC 控制器控制功能为：通过控制二位五通电

磁阀间接控制执行气缸和气动振动器的状态，通过连接磁性开关对气缸的位置进行感应并接收状态信号进行程序抉择；控制二位三通真空电磁阀控制真空吸盘的吸附和吹气，使用压力传感器监测真空吸盘的气压并反馈信号给 PLC，PLC 通过信号判断真空吸盘的吸附是否正常；计算机端通过数据线连接 PLC 的 COM1 端口，使用软件实时监测系统状态并进行数据采集；连接 3 个自动复位按钮，通过接收按钮输入的信号，实现控制程序开关、复位等操作。

4 试验

4.1 试验材料

为验证装钵机关键部件与整机性能，确定各因素对装钵机开袋成功率、开袋时间和下料一致性的影响，并得出最优参数组合，试验现场如图 11 所示，现场试验在华南农业大学工程学院进行。试验材料为 500 枚相同规格育苗袋和 100 kg 基质土，时间记录设备为 iPhone 14，传感器为 RS485 型土壤温湿度传感器。

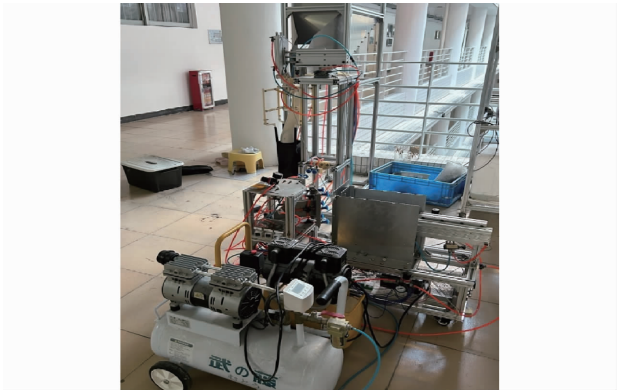


图 12 试验现场

Fig. 12 Test field

4.2 取袋-开袋试验

4.2.1 评价指标

装钵机取袋和开袋工作时，取袋开袋成功率越高，时间越短则性能越好，为了评估取袋、开袋机构性能，以开袋成功率和开袋时间为评价指标。其中，使用每成功开袋 1 次所需平均时间 $\bar{t}$ 作为平均开袋时间。平均开袋时间 $\bar{t}$ 计算式为

$$\bar{t} = \frac{T_k}{100R} \tag{7}$$

其中 $T_k = 100[(25 + B_k)R + 7]$

式中 T_k ——第 k 组试验所需时间，s

B_k ——因素 B 在 k 水平下的时间，s

R ——该组开袋试验成功率，%

4.2.2 取袋-开袋试验方案

根据前期调试评价情况，选取吸附压力和吸附

时间为取袋、开袋性能的主要因素,开袋成功率和开袋时间为评价指标,选用正交试验对取袋、开袋性能进行评价,各因素均取 3 个水平进行正交试验,正交试验因素水平见表 1。

表 1 取袋-开袋试验因素水平
Tab.1 Factors and levels in retrieval and opening test

水平	因素	
	吸附压力/kPa	吸附时间/s
1	-70	2.0
2	-80	1.5
3	-90	1.0

4.2.3 取袋-开袋试验结果与分析

取袋-开袋试验方案与结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、空列为编码,试验次数为每组 100 次。吸附压力和吸附时间的水平由真空吸盘选型试验确定。对试验数据做极差分析与方差分析如表 3 所示。

(1)吸附压力对成功率的极差最大,是主要影响因素,随着吸附压力增加,吸附成功率显著提高,吸附时间对成功率无显著性影响,随着吸附时间提高,取袋成功率上升。

表 3 取袋-开袋试验极差分析与方差分析

Tab.3 Range analysis and ANOVA of bag retrieval and opening tests

试验因素		k_1	k_2	k_3	极差	平方和	自由度	均方和	F	P
开袋成功率	X_1	73.33	78.33	86.00	12.67	256.22	2	128.11	46.58	<0.01
	X_2	76.00	80.00	81.67	5.67	26.89	2	13.44	4.89	>0.05
	空列	78.67	77.67	81.00	3.33					
	误差					8.22	4	2.75		
平均开袋时间	X_1	23.56	23.44	23.85	0.41	0.32	2	0.16	0.52	>0.05
	X_2	24.47	23.29	23.10	1.37	4.67	2	2.34	7.51	<0.05
	空列	23.48	23.97	23.44	0.53					
	误差					3.11	4	0.78		

4.3 下料机构装填均匀性试验

4.3.1 评价指标

为评估下料机构装填均匀性是否满足开袋装填设备作业要求,对下料机构进行装填均匀性试验。育苗袋装填时,通常将营养土装填至育苗袋的 2/3 处(约 1 800 g),各育苗袋间装填量越均匀越好。为排除不同含水率营养土中水分所占质量的影响,以等效平均装填量 m_e 作为装填量评价指标,以装填量相对极差 R_r 作为装填均匀性评价指标。等效平均装填量 m_e 计算式为

$$m_e = \frac{m_a}{1 + w} \tag{8}$$

其中

$$m_a = \frac{1}{n_1} \sum_{k=1}^{n_1} m_k$$

(2)吸附时间对平均开袋时间 $\bar{t}$ 影响显著,而吸附压力对平均开袋时间 $\bar{t}$ 无显著性。所以只需考虑吸附时间对开袋时间的影响。

(3)以提高成功率和降低开袋时间为主要评价指标,为同时满足成功率高与开袋时间短, $X_{13}X_{23}$ 为最优组合。试验结果表明,在最优组合下,开袋成功率可达 88%,平均开袋时间为 22.95 s,1 h 内可以实现约 155 枚育苗袋开袋工作。

表 2 取袋-开袋试验方案及结果

Tab.2 Experimental plan and results of retrieval and opening

序号	因素			开袋成功	平均开袋
	X_1	X_2	空列	率/%	时间/s
1	1	1	1	69	24.14
2	1	2	3	74	23.46
3	1	3	2	77	23.09
4	2	1	3	76	23.71
5	2	2	2	79	23.36
6	2	3	1	80	23.25
7	3	1	2	83	25.56
8	3	2	1	87	23.05
9	3	3	3	88	22.95

式中 w ——营养土质量含水率, %

m_a ——平均装填量, g

m_k ——同组试验第 k 号育苗钵装填量, g

n_1 ——同组试验育苗钵总数

装填量相对极差^[30] R_r 计算式为

$$R_r = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{m_a} \times 100\% \tag{9}$$

式中 $m_{\max}$ ——同组试验育苗钵最大装填量, g

$m_{\min}$ ——同组试验育苗钵最小装填量, g

4.3.2 装填均匀性试验方案

选取营养土含水率、气动振动器气源气压、料仓内营养土剩余量作为试验因素,其中含水率采用体积含水率,使用土壤温湿度传感器快速测量,体积含水率各水平对应质量含水率 w 由烘干法^[31]测定,正

交试验因素水平如表 4 所示。每组试验重复装填 5 次,每次装填 10 枚育苗袋,则每组试验包含 50 个育苗袋,即式(8)中 n_1 取 50。

表 4 装填试验因素水平

Tab.4 Factors and levels in filling test

水平	因素		
	营养土含水率/%	营养土剩余量/%	振动器气压/MPa
1	8 ~ 13	0 ~ 40	0.3
2	13 ~ 18	40 ~ 70	0.5
3	18 ~ 23	70 ~ 100	0.7

4.3.3 装填均匀性试验结果与分析

各评价指标测量计算试验结果如表 5 所示,A、B、C 为因素水平。对试验数据做极差分析和方差分析,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,A、B、C 对装填量相对极差 R_i 均有

显著影响,各因素影响主次顺序为 A、B、C,为了获得较好的装填效果,选取最佳组合为 $A_1B_2C_1$,即营养土含水率为 8% ~ 13%、营养土剩余量 40% ~ 70%,振动器气压力 0.3 MPa。

表 5 装填试验结果

Tab.5 Results of filling test

序号	因素			平均装填量/	相对极差/
	A	B	C	g	%
1	1	1	1	1 765	36.9
2	1	2	2	1 811	19.3
3	1	3	3	1 765	27.1
4	2	1	3	1 414	57.9
5	2	2	1	1 817	26.4
6	2	3	2	1 418	20.8
7	3	1	2	917	54.5
8	3	2	3	1 075	42.8
9	3	3	1	1 033	68.8

表 6 装填试验极差分析与方差分析

Tab.6 Range analysis and ANOVA of loading tests

因素	k_1	k_2	k_3	极差	平方和	自由度	均方和	F	P
A	27.77	35.03	55.37	27.60	1 234	2	617	5.6	0.012 *
B	49.77	29.50	39.90	20.27	987	2	493	4.5	0.018 *
C	33.83	36.00	48.33	14.50	765	2	382	3.5	0.025 *
误差					123	2	61		
总和					3 109	8			

注: * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

当最优因素组合为 $A_1B_2C_1$ 时,通过验证试验可得,下料机构能够实现 7 s 左右完成 1 袋育苗袋装填工作,等效平均装填量 m_e 约为 1 800 g,根据计算可得,此时装钵机工作效率可达 120 枚/h,满足育苗袋装填需求。

5 结论

(1) 基于柑橘容器育苗人工开袋装填工艺,通过真空吸附开袋、机械手撑袋和振动下料,设计了一种实现自动开袋装填的开袋装钵机,可完成对柑橘育苗袋的储存、开袋和装填。设计了储袋机构、取袋开袋装置、撑袋机构和下料机构,确定了机构结构和关键参数,解决了柑橘育苗袋人工开袋装填成本高、效率低的问题。

(2) 制作了装钵机实体样机,并进行了样机性能试验。以吸盘吸附时间和吸附压力为因素,进行了取袋开袋正交试验;以营养土含水率、营养土剩余量、振动器气压力为因素,进行了装填均匀性正交试验。通过方差分析和极差分析得到开袋成功率和平均开袋时间受吸附时间和吸附压力影响,其中吸附压力的影响较为显著;装填均匀性的影响因素主次顺序为营养土含水率、营养土剩余量、振动器气压力。

(3) 试验结果表明,装钵机最优参数组合为真空吸盘吸附压力 - 90 kPa、吸附时间 2 s、营养土含水率 8% ~ 13%、料仓营养土剩余量 40% ~ 70%、振动器气压力 0.3 MPa。此时,装钵机工作效率可达 120 枚/h。

参 考 文 献

[1] 谭振华,谭鑫,黄佳慧,等. 不同营养土及容器对枳苗生长的影响[J]. 湖南农业科学, 2022(8): 63 - 65.
TAN Zhenhua, TAN Xin, HUANG Jiahui, et al. Effects of different nutrient soils and containers on the growth of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(8): 63 - 65. (in Chinese)

[2] 祁春节,顾雨檬,曾彦. 我国柑橘产业经济研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 58 - 69.
QI Chunjie, GU Yumeng, ZENG Yan. Progress of citrus industry economy in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 58 - 69. (in Chinese)

- [3] 刘曙东. 柑橘无病毒容器苗生产成本调查分析及营养土配方筛选[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
LIU Shudong. Investigation and analysis of production cost of virus-free container seedling of citrus and selection of nutrient soil formula[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [4] 黄秀, 柯甫志, 罗华国, 等. 不同基质对柑橘容器苗生长发育的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(10): 2320–2322, 2358.
- [5] 洪添胜, 杨洲, 宋淑然, 等. 柑橘生产机械化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 105–110.
HONG Tiansheng, YANG Zhou, SONG Shuran, et al. Mechanization of citrus production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 105–110. (in Chinese)
- [6] 郭文武, 叶俊丽, 邓秀新. 新中国果树科学研究70年——柑橘[J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1264–1272.
GUO Wenwu, YE Junli, DENG Xiuxin. Fruit scientific research in new China in the past 70 years: citrus[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1264–1272. (in Chinese)
- [7] 邓秀新. 中国柑橘育种60年回顾与展望[J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2063–2074.
DENG Xiuxin. A review and perspective for citrus breeding in China during the last six decades[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(10): 2063–2074. (in Chinese)
- [8] 单杨. 中国柑橘工业的现状、发展趋势与对策[J]. 中国食品学报, 2008(1): 1–8.
SHAN Yang. Present situation, development trends and counter measures of citrus industry in China[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008(1): 1–8. (in Chinese)
- [9] WILSON E R, VITOLS K C, PARK A. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada[J]. New Forests, 2007, 34(2): 163–176.
- [10] GROSSNICKLE S C, EL-KASSABY Y A. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison[J]. New Forests, 2016, 47(1): 1–51.
- [11] MENTSIEV A U, ISAEV A R, SUPAEVA K S, et al. Advancement of mechanical automation in the agriculture sector and overview of IoT[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1399(4): 44042.
- [12] 刘中正, 侯加林, 辛杰, 等. 智能化设施育苗机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 136–142.
LIU Zhongzheng, HOU Jialin, XIN Jie, et al. Design and experiment of intelligent facilities seedling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 136–142. (in Chinese)
- [13] 羊军, 刘影, 李智国, 等. 分体式蔬菜育苗基质装穴机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 224–230, 292.
YANG Jun, LIU Ying, LI Zhiguo, et al. Design and experiment of split-type substrate filling machine for vegetable plug-tray seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 224–230, 292. (in Chinese)
- [14] 杨雅婷, 陈永生, 胡桢, 等. 国内外花盆基质装填机研发现状[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 47–50.
YANG Yating, CHEN Yongsheng, HU Gui, et al. Experience of development of pot filling machine at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1): 47–50. (in Chinese)
- [15] 魏俞涌, 陆军, 盛奎川, 等. 设施园艺基质填料机设计与性能研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(3): 318–324.
WEI Yuyong, LU Jun, SHENG Kuichuan, et al. Design and performance investigation for substrate filler in protected horticulture[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2013, 39(3): 318–324. (in Chinese)
- [16] 张林, 崔秀芳, 张美斌, 等. 基于育苗袋育苗法的制备机结构设计及关键部件仿真分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(4): 539–544.
ZHANG Lin, CUI Xiufang, ZHANG Meibin, et al. Structure design and key component simulation analysis of preparation machine based on nursery bag raising method[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 48(4): 539–544. (in Chinese)
- [17] 谢俊花, 程改青, 张飞. 营养钵装料机设计[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(12): 5235–5236, 5239.
XIE Junhua, CHENG Gaiqing, ZHANG Fei. Research on the design of earth bowl machine[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(12): 5235–5236, 5239. (in Chinese)
- [18] 齐飞, 魏晓明, 张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1–9.
QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 1–9. (in Chinese)
- [19] 徐勤超, 李善军, 张衍林, 等. 柑橘育苗钵装填转运机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 66–72.
XU Qinchao, LI Shanjun, ZHANG Yanlin, et al. Design and test of seedling pot filling and transporting machine for citrus[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 66–72. (in Chinese)
- [20] 蔡嘉杰. 苗圃园营养钵自动装土机的设计[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
CAI Jiajie. Design of automatic soil filling machine for nutritional soft bowl in nursery garden[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] 高原源. 穴盘育苗压穴和覆土装备开发与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
GAO Yuanyuan. Development and test of digging and covering equipments of plug seedling[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[23] 肖珂,郝毅,高冠东. 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):137 – 145.
XIAO Ke,HAO Yi,GAO Guandong. Design and experiment of automatic ariable-distance precison spraying system in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):137 – 145. (in Chinese)

[24] 薛冰,周利明,牛康,等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):93 – 102.
XUE Bing,ZHOU Liming,NIU Kang,et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):93 – 102. (in Chinese)

[25] FU C, MA X, ZHANG L. Fuzzy-PID strategy based on PSO optimization for pH control in water and fertilizer integration[J]. IEEE Access, 2021, 10: 4471 – 4482.

[26] SONG L, HUANG J, LIANG X, et al. An intelligent multi-sensor variable spray system with chaotic optimization and adaptive fuzzy control[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2954.

[27] 汤春球,刘凤来,余自良. 基于模糊 PID 的水肥一体化灌溉控制系统设计[J]. 数字制造科学,2023,21(4):293 – 296.
TANG Chunqiu,LIU Fenglai,YU Ziliang. Design of integrated water and fertilizer irrigation control system based on fuzzy PID [J]. Digital Manufacture Science,2023,21(4):293 – 296. (in Chinese)

[28] 姚颖飞,陈学庚,纪超,等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(6):12 – 21.
YAO Yingfei,CHEN Xuegeng,JI Chao,et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(6):12 – 21. (in Chinese)

[29] VERMA B, PADHY P K. Robust fine tuning of optimal PID controller with guaranteed robustness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(6): 4911 – 4920.

[30] 朱凤磊,张立新,胡雪,等. 基于蝙蝠优化 BP – PID 算法的精准施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):135 – 143,171.
ZHU Fenglei,ZHANG Lixin,HU Xue,et al. Precision fertilizer application control system based on ba optimization BP – PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):135 – 143,171. (in Chinese)

(上接第 76 页)

[22] 刘霓红,蒋先平,程俊峰,等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 1 – 9.
LIU Nihong, JIANG Xianping, CHENG Junfeng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 1 – 9. (in Chinese)

[23] 白帆,吴昊,肖冰,等. 国内外林木育苗生产技术装备概述[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(1): 4 – 12.
BAI Fan, WU Hao, XIAO Bing, et al. Overview of tree seedling production technology and equipment at home and abroad [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(1): 4 – 12. (in Chinese)

[24] YULIANTO D, RAIBHU S. Design of semi-automatic plant media bagging machine for container plant nursery[J]. Journal of Advanced Agricultural Technologies, 2018, 5(1): 36 – 40.

[25] 张洋,范开钧,初麒,等. 育苗纸钵自动装盘装置的试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 180 – 183.
ZHANG Yang, FAN Kaijun, CHU Qi, et al. Experiment study on seedling paper-pot automatic feeding device for plug tray [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 180 – 183. (in Chinese)

[26] 渠聚鑫,郭克君,汤晶宇,等. 林业育苗穴盘基质装填机结构设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 88 – 91.
QU Juxin, GUO Kejun, TANG Jingyu, et al. Structural design of substrate filling machine for forestry nursery plug[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 88 – 91. (in Chinese)

[27] 韩绿化,毛平平,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)

[28] 惠云婷,席军辉,王俊武,等. 面向等离子体苜蓿种子处理的均匀布料系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(11):184 – 193.
HUI Yunting, XI Junhui, WANG Junwu, et al. Design and experiment of uniform distribution system for plasma treatment of alfalfa seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(11):184 – 193. (in Chinese)

[29] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 38 – 49.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(5): 38 – 49. (in Chinese)

[30] 何林,蒋杰,李家操,等. 柑橘育苗钵装填成穴生产线的设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 108 – 121.
HE Lin, JIANG Jie, LI Jiacao, et al. Design and test of seedling pot filling and hole punching processing line for citrus[J]. Journal of Southwest University(Natural Science), 2023, 45(5): 108 – 121. (in Chinese)

[31] 李旺霞,陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014(10): 335 – 339.