doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.021

给袋式柑橘育苗装钵机上袋系统设计与试验

李　震[1,2]　毛丹婷[1]　金青婷[1]　吕石磊[1,2]　曹柏薇[1]　林奕凯[1]
(1.华南农业大学人工智能与低空技术学院,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:针对柑橘容器化育苗装钵过程中上袋环节人工依赖度高、效率低的问题,设计了一种多机构协同控制的给袋式柑橘育苗装钵机上袋系统,实现了储袋、取袋、送袋、开袋与撑袋的自动化流水作业。重点突破了储袋-取袋集成化与撑袋机构轻量化高负载两大技术难点:提出了卧式 U 型凹槽底板袋仓与取袋机构集成式气动结构,使最大储袋量达到 332 枚,较常规水平底板袋仓提升 40.68%;通过仿真分析确定撑袋机械手关键承力部件采用铝合金材质,非关键部件采用聚丙烯树脂,并通过爪形单元结构选型(40 mm×45 mm×158 mm)与发泡圆管橡胶保护套的协同优化设计,显著增强摩擦性能与承载能力,基质平均装填量达 1 887 g。样机试验表明:当储袋量为 160 枚时,上袋成功率最高,达到 95.33%,单次循环作业时间为 16.22 s;系统在 125~195 枚的储袋量范围内均能保持稳定作业(成功率大于 90%)。该系统显著提高了上袋环节的自动化水平与作业效率。

关键词:柑橘;容器育苗;装钵机;自动上袋系统
中图分类号:S223.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0226-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Bag-loading System for Citrus Seedling Potting Machine

Li Zhen[1,2]　Mao Danting[1]　Jin Qingting[1]　Lü Shilei[1,2]　Cao Baiwei[1]　Lin Yikai[1]
(1. *College of Artificial Intelligence and Low-altitude Technology*, *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 manual dependency and low efficiency in the bag-loading stage of citrus containerized seedling potting, an automatic bag-feeding system for a bag-type citrus seedling potting machine was designed based on multi-mechanism coordinated control. The system achieved automated sequential operations, including bag storage, retrieval, conveyance, opening, and holding. Key breakthroughs were made in two technical challenges: the integration of bag storage and retrieval, and the lightweight, high-load design of the bag-holding mechanism. Specifically, an integrated pneumatic structure combining a horizontal U-shaped groove base plate bag storage unit with a bag retrieval mechanism was proposed, increasing the maximum bag storage capacity to 332 bags—an effective capacity improvement of 40.68% compared with that of conventional horizontal base plate storage. Through simulation analysis, aluminum alloy was selected for key load-bearing components of the bag-holding manipulator, while polypropylene resin was used for non-critical parts. Collaborative optimization of the claw unit structure (40 mm×45 mm×158 mm) and foam rubber protective sleeves significantly enhanced friction performance and load capacity, achieving an average substrate filling weight of 1 887 g. Prototype tests showed that with a storage capacity of 160 bags, the bag-loading success rate reached 95.33%, and the single-cycle operation time was 16.22 s. The system maintained stable operation (success rate >90%) within a storage capacity range of 125 bags to 195 bags. This system significantly improved the automation level and operational efficiency of the bag-loading process and it can provide technical reference for the development of automated citrus seedling equipment.

Key words: citrus; container seedling cultivation; potting machine; automatic bag feeding system

收稿日期:2025-09-02　修回日期:2026-01-13
基金项目:国家自然科学基金项目(32271997、31971797)、广州市重点研发计划项目(2024B03J1309)和财政部和农业农村部: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,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,主要从事农业信息化研究,E-mail:lvshilei@scau.edu.cn

0　引言

中国是全球最大的柑橘生产国[1]，产量约占世界总产量的 1/3[2-3]。在现代化柑橘种苗培育中，容器育苗技术因苗木品质高、移栽成活率高等优势已被广泛采用[4-6]。目前，容器育苗的部分环节如播种、灌溉、转运等已初步实现机械化[7-8]，但育苗钵上袋环节仍主要依赖人工操作，劳动强度大、生产效率低，严重制约产业规模化发展。因此，研发高效、可靠的自动上袋装置对于实现柑橘育苗全程机械化具有重要意义[9-11]。

柑橘容器育苗普遍采用薄壁塑料软钵，其口小、袋深、质软的特点在保护苗木根系的同时[12]，也给机械化上袋带来了严峻挑战：柔软材质在抓取、输送、撑开过程中极易变形、粘连，对动作精准控制要求高；袋深结构则加大了稳定开袋与撑袋的难度。在自动化装钵技术方面，国外研究多集中于硬质容器[13-14]，例如，德国 Mayer 公司的 TM2700、比利时 Demtec 公司的 SMART 以及荷兰 Visser 公司的 VTF Filler 系列产品[15]，这些设备均采用流水线作业模式，能够高效完成硬钵的上盆、供料、装填与压实工序，且部分机型可与后续移栽环节衔接，形成连续作业线，具有较高的作业效率和可靠性[16-17]。然而，上述设备均针对硬质容器设计，其结构难以适应软质、深袋型育苗钵的柔性特征。在软质包装自动化方面，Jaafar 等[18]提出的一种自动聚丙烯袋组装机，可实现抓取、搬运与进料 3 个工序；Habibi 等[19]设计的一种双指机器人夹持器，通过机械手实现柔性袋体的抓取与扩张，为软质容器的处理提供了技术参考，但目前尚未形成完整的自动上袋流程体系。

相较而言，国内的相关研究处于探索阶段，何林等[12]设计的装填成穴生产线实现了基质的定量装填与冲压成穴；徐勤超等[20]研发的间歇式装填转运机通过模块化设计提升了作业效率；张鉴[21]开发的自走式装填摆码机具备输送与装填功能。然而，这些设备的上袋环节均未实现自动化，仍需人工置钵。在包装机械领域，杨传民等[22]研究的给袋式包装机能够实现取袋、送袋功能，但缺乏关键的开袋与撑袋环节；朱永昌[23]设计的新型给袋式包装机虽实现了上袋的完整流程，却因面向食品包装的特殊要求，无法满足育苗钵的上袋需求。

现有技术难以有效实现软质、深袋型柑橘育苗钵的自动化上袋。为此，本研究设计一种多机构协同控制的给袋式柑橘育苗装钵机。研究聚焦上袋环节关键结构设计，通过袋仓卧式布局保障供袋稳定性，气动协同式取袋机构实现精准抓取与输送，复合材质撑袋机械手解决软袋撑开难题，为软质深袋柑橘育苗钵自动化上袋提供技术方案。

1　上袋系统整体设计

1.1　整机结构与工作原理

给袋式柑橘育苗装钵机的上袋系统整体结构如图 1 所示，主要由袋仓、取袋机构、送袋机构、开袋机构、撑袋转送机构 5 部分组成[24]。首先，将育苗袋水平放置于袋仓内部，装钵机启动后，取袋气缸活塞杆伸出，驱动真空吸盘阵列接触并吸附袋体表面，真空传感器实时监测吸附状态是否正常。若吸附成功，取袋气缸活塞杆缩回，摆台气缸驱动取袋气缸旋转 90°至水平位置后活塞杆再次伸出，将育苗袋转送至送袋位置；若吸附失败，则机构复位并重新吸取。育苗袋到达送袋位置后，送袋气缸活塞杆伸出，两对称的真空吸盘通过正压、负压（切换）实现吸附与释放，完成育苗袋从取袋机构到送袋机构的交接。交接成功后，摆台气缸驱动送袋气缸旋转 90°，将育苗袋传送至开袋位置，此过程由传感器进行监测。若转运过程中，育苗袋出现掉落或吸附位置歪曲等异常情况，相应机构自动复位并重复执行；若多次尝试失败则报警停机等待人工处理。完成送袋动作后，系统程序随即触发开袋指令。开袋气缸活塞杆伸出，驱动活动开袋吸盘推动育苗袋靠近固定开袋吸盘，一对相向的吸盘共同作用将育苗袋吸附并压紧袋口于中间位置，随后活塞杆缩回，育苗袋在吸附力作用下被打开，传感器检测吸附状态以判断开袋是否正常。开袋完成后，撑袋下行气缸驱动撑袋机械手下移并进入袋体内，在气动作用下撑袋机械手张开，将育苗袋完全撑开，同时开袋气缸活塞杆退回到初始位置。随后，撑袋转送机构的摆台气缸旋转 90°，带动撑袋机械手及育苗袋整体转移至下料口，至此自动上袋环节流程全部完成，实际作业流程如图 2 所示。

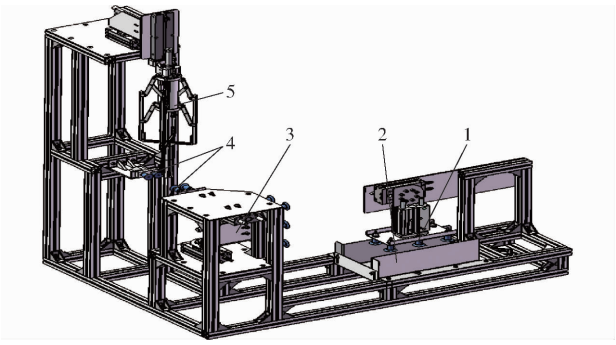


图 1　给袋式柑橘育苗装钵机上袋系统结构示意图

Fig. 1　Schematic of bag-loading system in bag-feeding citrus seedling pot-filling machine

1. 取袋机构　2. 袋仓　3. 送袋机构　4. 开袋机构　5. 撑袋转送机构

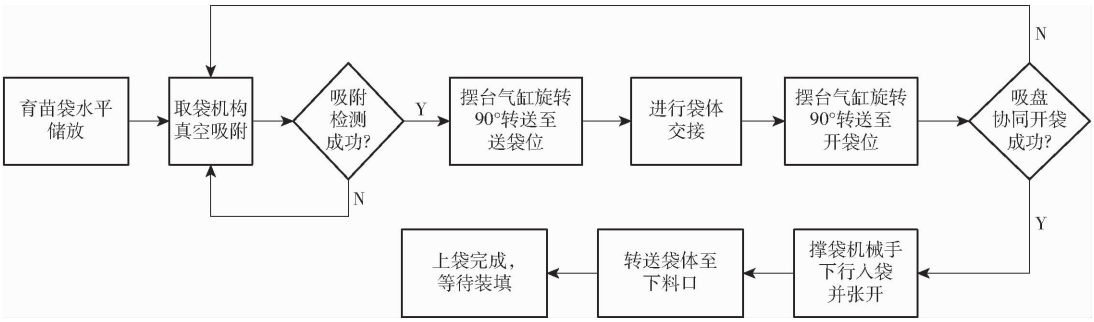


图 2 上袋系统实际作业流程图

Fig. 2 Actual operation flowchart of bag-loading system

1.2 控制系统设计

该装钵机以空气压缩机(deli1200W - 25L 型)和真空泵(武藤 1300V - 30L 型)作为气动动力源。真空泵为系统提供负压,驱动真空吸盘实现袋体的可靠吸附与释放;空气压缩机为系统提供压缩空气动力源,驱动各执行气缸动作。主要技术参数见表 1。

表 1 给袋式柑橘育苗装钵机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of bag-type citrus seedling potting machine

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	1 787 × 1 353 × 1 280
空气压缩机压力/kPa	500 ~ 700
真空泵相对表压力/MPa	-0.1 ~ -0.08
生产率/(钵·h^{-1})	130

上袋环节中,控制系统以台达 DVP40ES200T 型可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)为核心,利用其高可靠性、灵活时序编程和强抗干扰能力,实现对袋仓取袋、送袋、开袋、撑袋及转送 5 个执行机构的顺序动作控制与逻辑决策。该系统的技术路线如图 3 所示,PLC 通过数字量输入模块接收各磁性开关(用于检测气缸极限位置)、气压传感器等信号,实时监测各机构状态与系统工况。经内部程序运算后,PLC 通过数字量输出模块控制相应气动电磁阀与真空电磁阀的启停,从而驱动导杆气缸、摆台气缸、真空吸盘等执行元件按预设时序动作,形成完整的闭环控制系统。

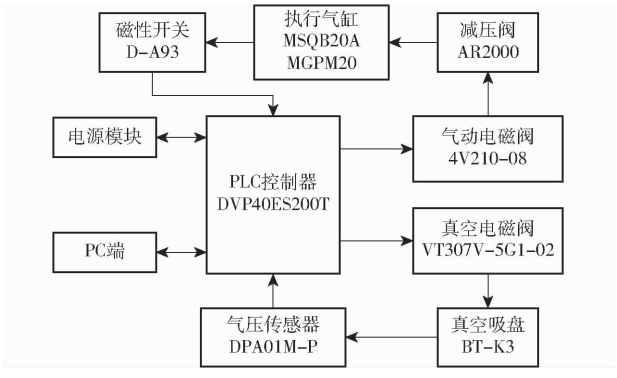


图 3 控制系统技术路线图

Fig. 3 Control system technology roadmap

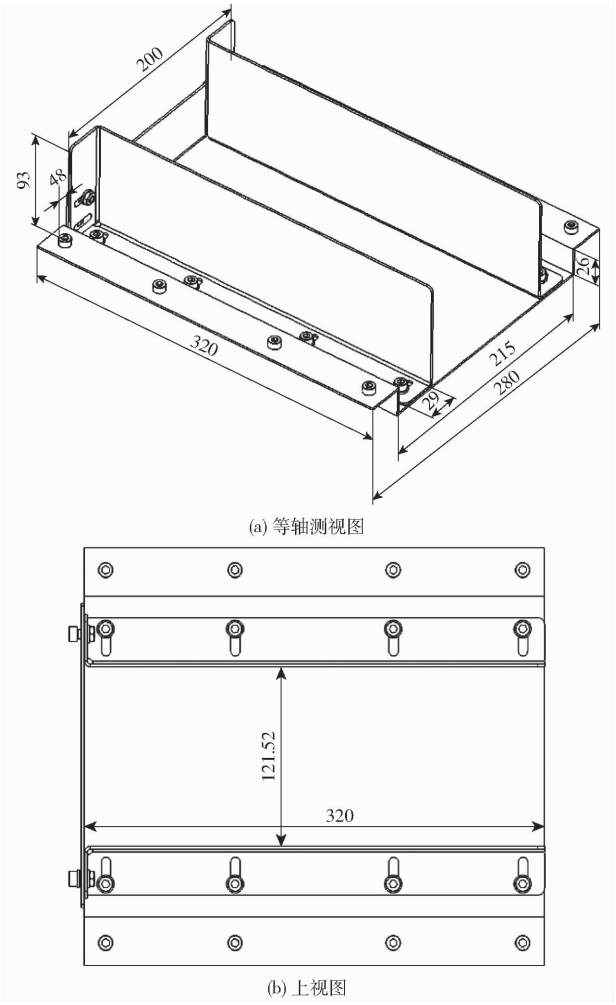
2 关键部件设计

2.1 储袋-取袋集成式气动机构设计与分析

储袋-取袋集成式气动机构旨在实现育苗袋的高容量存储与自动精准抓取,由袋仓和取袋机构协同构成。袋仓采用卧式 U 型凹槽底板设计,其具体结构如图 4 所示。该设计在整机预留的固定安装空间(长 540 mm,宽 280 mm)内,通过加工深度为 26 mm 的 U 型凹槽,有效增加了育苗袋的纵向堆叠空间,从而在不改变外部尺寸的前提下显著提升了单次储袋量,为后续连续、稳定的取袋作业奠定了基础。相较于常规水平底板,其具体的储袋能力提升效果,将结合取袋机构的运动约束分析予以量化。

取袋机构位于袋仓正上方,采用气动驱动与真空吸附相结合方案,主要由导杆气缸、摆台气缸、真空吸盘阵列组以及配套安装板组成。其中,导杆气缸安装板与摆台气缸安装板分别设有 ±5 mm 和 ±22.5 mm 的轴向调节范围,吸盘安装板配置 BT-K3 型真空吸盘阵列(6 组 × φ33 mm)实现育苗袋吸附。设计过程中,为保障可靠取袋并满足储袋量的需求,取袋机构需满足导杆气缸竖直伸缩运动与摆台气缸旋转运动的约束条件,导杆气缸竖直伸缩运动简图如图 5a 所示,导杆气缸竖直方向完全伸出时,真空吸盘表面与袋仓底面的间距需趋近于零,以确保最底层育苗袋亦可被吸附取出;摆台气缸旋转运动简图如图 5b 所示,导杆气缸执行机构随摆台气缸旋转至最低点时,需与袋仓内的袋体保持无干涉状态。因此,根据运动约束分析,关键参数应满足公式

$$\begin{cases} D_1 + S + \Delta h \leqslant H \\ D_3 = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \\ D_3 + d \leqslant H \\ \quad (\Delta h \approx 0, d \geqslant 0.26\ \text{mm}) \end{cases} \tag{1}$$



(a) 等轴测视图

(b) 上视图

图 4　袋仓结构示意图(水平底板加工成 U 型凹槽)

Fig. 4　Schematics of bag storage structure (horizontal bottom plate processed into U-shaped groove)

式中　D_1——固定点至吸盘吸附表面的距离(导杆气缸安装板调至轴向调节行程下极限),为 201 mm

S——导杆气缸行程,mm

Δh——吸盘完全伸出后其吸附表面至袋仓底面的距离,水平底板对应 Δh_1,U 型凹槽底板对应 Δh_2,mm

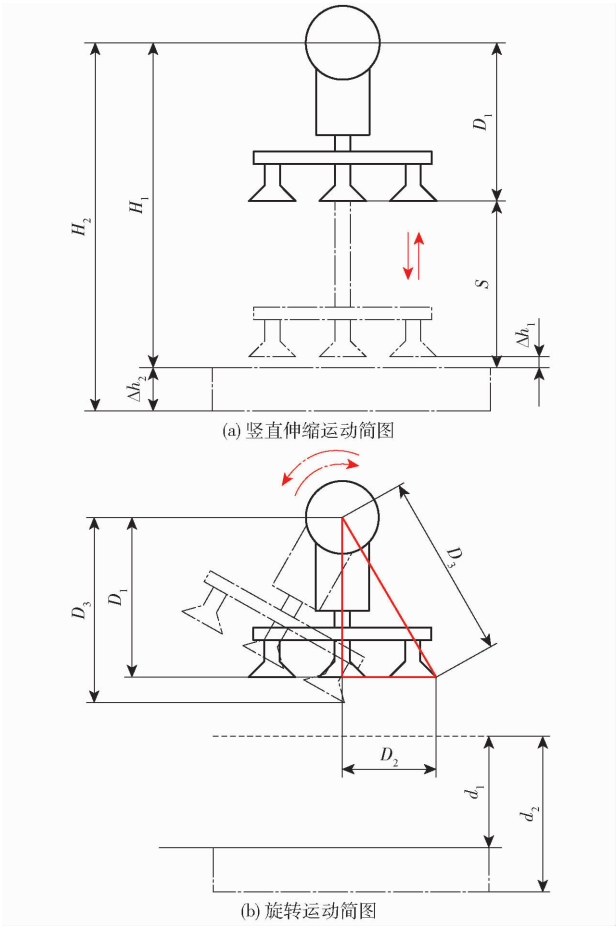
H——固定点相对于袋仓底板的高度,水平底板对应 H_1 = 276.5 mm,U 型凹槽底板对应 H_2 = 301.5 mm

D_2——中间吸盘中点至末端吸盘最远点的距离,为 101 mm

D_3——固定点至末端吸盘最远点的距离,为预留安全间隙,取 225 mm

d——堆叠袋体最大厚度(d_1、d_2),分别表示水平底板和 U 型凹槽底板袋仓中袋体堆叠的最大厚度,单袋厚度为 0.26 mm

根据公式(1),袋仓为水平底板设计时,气缸行程 S 选择 75 mm,堆叠袋体最大厚度 d_1 为 51.5 mm;



(a) 竖直伸缩运动简图

(b) 旋转运动简图

图 5　取袋机构运动简图

Fig. 5　Sketches of movement of bag picking mechanism

袋仓为 U 型凹槽底板设计时,气缸行程 S 选择 100 mm,堆叠袋体最大厚度 d_2 为 76.5 mm。配合导杆气缸安装板上方 ±5 mm 的轴向调节范围,水平底板袋仓的结构设计可容纳最大储袋量为 236 枚,而 U 型凹槽底板袋仓的结构设计可容纳最大储袋量为 332 枚,有效容量提升 40.68%,且为取袋机构预留了更多的行程余量。因此,袋仓采用 U 型凹槽底板设计,对应取袋机构的导杆气缸型号为 MGPM20 - 100Z(行程 100 mm)。在实际作业中,为适应袋堆压缩状态变化并实现可靠取袋,导杆气缸的下降位置以理论计算位置为基准,并通过真空传感器实时反馈吸附状态;若首次吸附失败,PLC 将控制气缸进行微距步进下探并重新尝试,直至吸附成功。这一基于实时反馈的动态调节机制,使取袋动作能够自适应袋堆的实际高度变化,从而在满足运动约束的前提下,确保对从上至下各层育苗袋的稳定抓取。储袋-取袋集成式气动机构如图 6 所示。

2.2　撑袋机械手结构设计与分析

撑袋机械手的核心功能是通过开合动作完成袋口扩张,其采用微型气缸驱动四连杆机构的设计方案,4 组爪形单元以气缸缸体为中心轴呈圆周对称

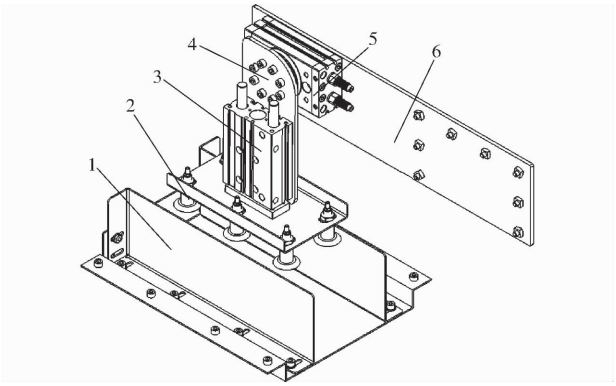


图 6 储袋-取袋集成式气动机构示意图

Fig. 6 Schematic of integrated bag storage and retrieval pneumatic mechanism

1. 袋仓 2. 真空吸盘阵列组(数量 6) 3. 导杆气缸 4. 导杆气缸安装连接板 5. 摆台气缸 6. 摆台气缸安装连接板

分布,如图 7 所示。为实现撑袋机械手将育苗袋袋口撑开并维持撑开状态,以确保下料达到柑橘基质育苗的标准装填量,需重点研究材料选择、爪形单元尺寸参数确定及其与育苗袋间的摩擦力等因素。

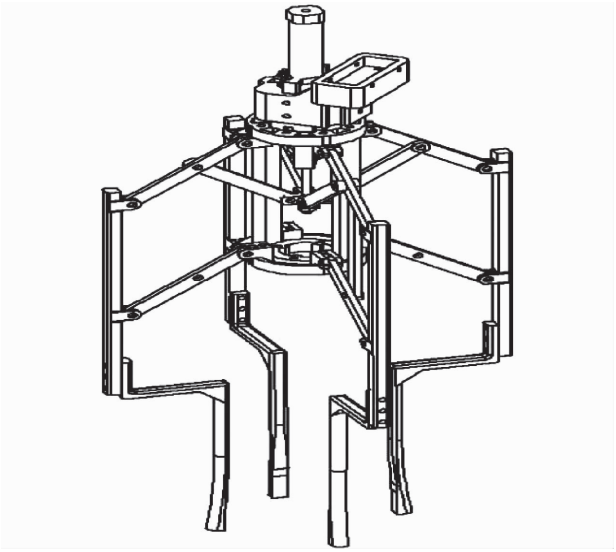


图 7 撑袋机械手结构示意图

Fig. 7 Schematic of bag-handling robot arm

2.2.1 材料选择

针对撑袋机械手的零件加工方式与成本控制要求,材料选择需优先兼顾工艺可行性与整体经济性,故首先考虑采用聚丙烯树脂。该材料具备较为良好的强度、韧性和耐疲劳特性,同时其加工成本较低,易于通过注塑成型实现复杂结构,并且对环境温湿度变化具有较好的稳定性,适合中小批量生产制造。其具体材料属性参数为:弹性模量 0.896 GPa、泊松比 0.41、屈服强度 30 MPa、密度 890 kg/m^3[25]。

利用 Solidworks Simulation 建立静力学仿真模型。根据材料参数对撑袋机械手进行聚丙烯树脂材料的定义,对其施加约束条件与载荷,往育苗袋中添加基质时,基质会对袋壁产生向外的侧向压力,这个力是垂直于撑袋机械手爪形单元内表面,方向向外。设置载荷时,假设添加 1 000 g 基质,袋子为柱体,计算公式为

$$p \approx K_0 \rho g h \tag{2}$$

式中 p——作用于爪形单元上的压力,N/m^2

K_0——静止土压力系数,取 0.5

ρ——基质密度,取 450 kg/m^3

g——重力加速度,取 9.81 m/s^2

h——基质装入育苗袋后的高度,取 0.7 m

根据公式(2),计算得到 p 为 1 545 N/m^2,因此,载荷的主要受力设置为垂直于撑袋机械手爪形单元内表面,方向向外,压力为 1 545 N/m^2 的侧向压力,结果如图 8 所示。

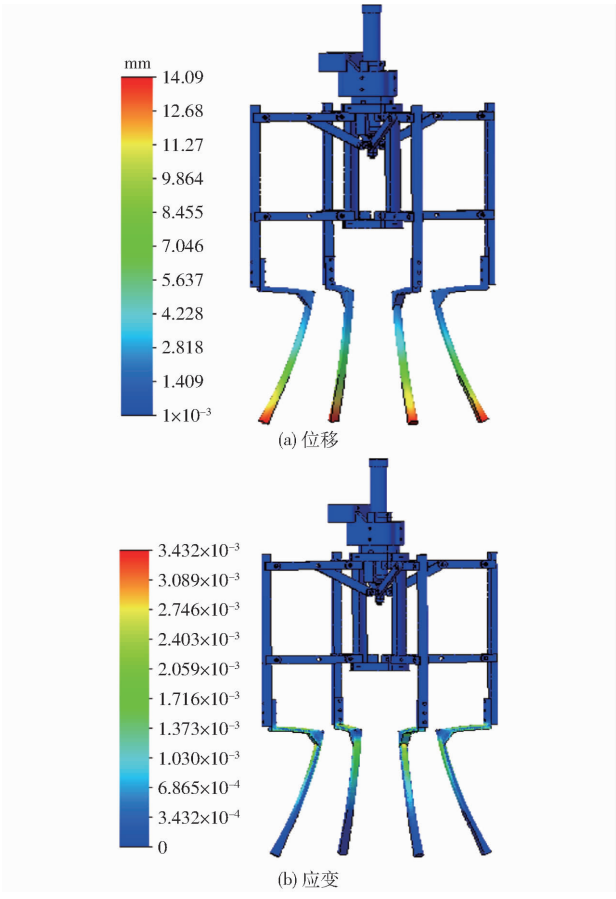


图 8 树脂材料撑袋机械手静力分析结果

Fig. 8 Static analysis results of resin material bag support manipulator

由图 8a 可知,撑袋机械手末端爪形单元为最大变形区域,越接近根部形变越大,合位移最大值达到了 14.09 mm,过大的位移易引发育苗袋破裂,影响后续下料效果。同时,图 8b 显示聚丙烯树脂材料在爪形单元处的最大应变为 3.432 × 10^{-3},该应变水平可能导致材料局部延展性失效。在持续载荷作用下,该区域零件易发生显著塑性变形并加速

老化，进而缩短撑袋机械手使用寿命。基于加工成本与性能优化的综合考量，考虑将变形最为显著的 4 个爪形单元零件替换为铝合金材质。铝合金具有更高的强度、优异的耐腐蚀性及环境适应性，其具体材料属性参数为：弹性模量 69 GPa、泊松比 0.33、屈服强度 145 MPa、密度 2 700 kg/m^3[25]。

在相同约束与载荷的作用下，得到的仿真结果如图 9 所示，图 9a 表明合位移降至 0.183 7 mm，变形量有效控制在 0.1 mm 左右。图 9b 显示最大应变降至 4.205×10^{-5}，图 9c 显示 Von Mises 应力峰值为 4.188×10^{6} N/m^2，低于铝合金屈服强度（1.45×10^{8} N/m^2），满足安全设计要求。结果分析表明，撑袋机械手主体采用聚丙烯树脂材料，关键承力部件爪形单元选用铝合金的复合材质方案，在保障加工成本优势的同时，显著提升了结构可靠性与实用性能。

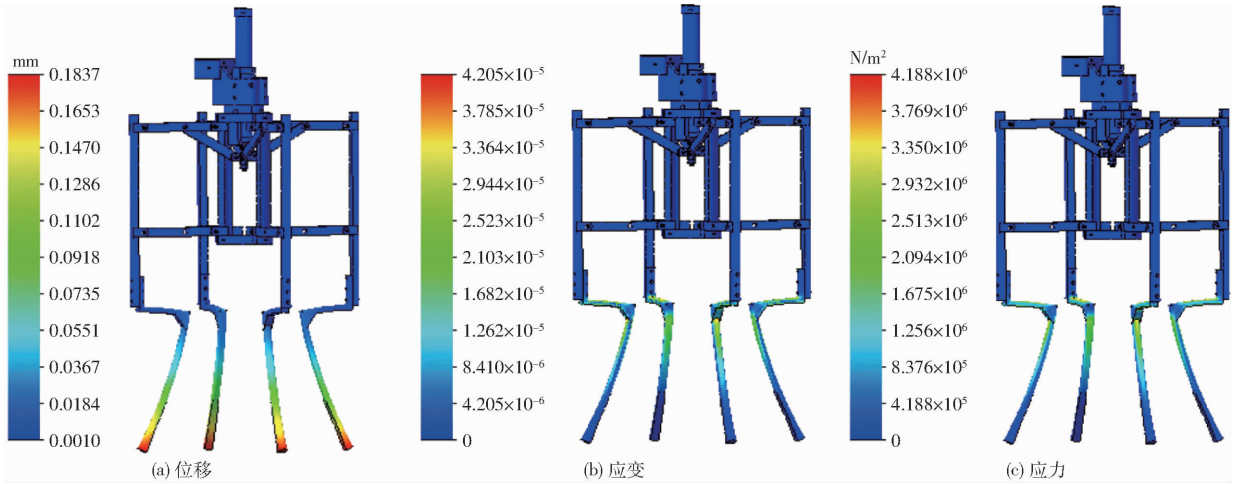


图 9　铝合金撑袋机械手静力分析结果

Fig. 9　Static analysis results of aluminum alloy bag support manipulator

2.2.2　爪形单元结构-摩擦协同优化选型

为提高撑袋机械手对育苗基质的承载能力，需对爪形单元的关键结构参数及其表面摩擦特性进行协同优化。爪形单元采用等截面直杆设计，初始截面尺寸为 40 mm×54 mm×158 mm。由图 8b 的应变结果可知，最大应变区域位于爪形单元的横向长度方向（54 mm），该结果表明，此尺寸是影响结构刚度的关键参数。为适应软质育苗袋袋口的尺寸限制并避免撑袋时撕裂袋体，本研究以适当缩短该横向长度为优化方向，探究其与保护套摩擦特性对装填性能的协同影响机制。为此，采用 3D 打印技术分别制作了横向长度为 51 mm（Ⅰ型）、48 mm（Ⅱ型）和 45 mm（Ⅲ型）的爪形末端单元，其余尺寸保持不变，具体结构如图 10 所示。

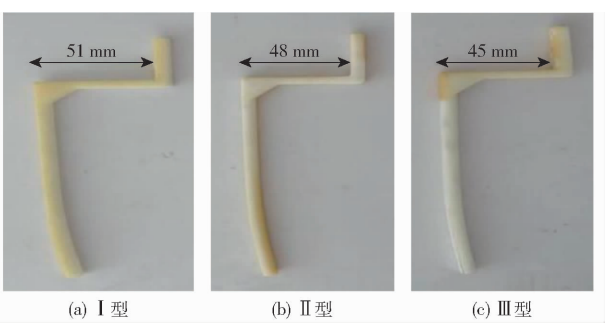


图 10　爪形单元结构型式

Fig. 10　Type of claw unit structure

同时，为增强爪形单元末端与育苗袋内壁间的摩擦力，选取了 3 种不同材质的保护套进行对比，包括发泡圆管橡胶（Ⅰ型）、透明硅胶软管（Ⅱ型）、普通橡胶（Ⅲ型），其内径均为 8.5 mm，具体结构如图 11 所示。

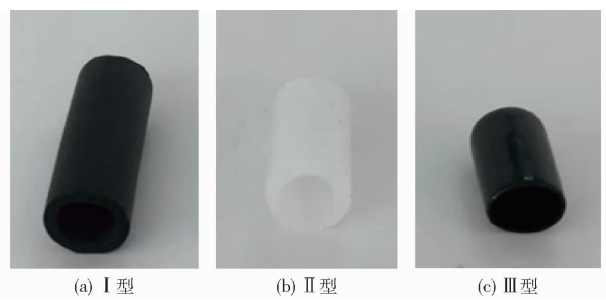


图 11　爪形单元保护套型式

Fig. 11　Type of protective sleeve for claw unit

本研究选取爪形单元横向长度和保护套类型作为影响撑袋机械手装填性能的试验因素，以基质的平均装填量（$\overline{m}$）为试验指标，选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行装填性能正交试验，各因素均设 3 个水平编码，具体因素水平设置如表 2 所示。试验过程中，将装配好保护套的爪形单元安装在撑袋机械手上，通过电磁阀驱动真空系统使撑袋机械手呈斜向上张开姿态，育苗袋被撑开。在固定高度连续添加含水率为 9% 的同一批次育苗基质，直至育苗袋因重力作用掉落至下方平台，共进行 9 组试验，每组试验重复

10 次,使用精度为 1 g 的电子台秤称量每次装填的基质质量,取平均值作为该组的试验结果。

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factors levels of orthogonal experiment

水平	因素	
	横向长度/mm	保护套类型
1	51	发泡圆管橡胶
2	48	透明硅胶软管
3	45	普通橡胶

撑袋机械手装填性能的正交试验方案与结果如表 3 所示,爪形单元横向长度、保护套类型编码值以 A、B 表示,空列用于误差估计。采用 SPSS 27.0 软件对试验数据进行方差分析,结果如表 4 所示。

表 3 撑袋机械手装填性能试验方案与结果

Tab. 3 Test plan and results for bag-supporting manipulator's filling performance

试验号	因素				平均装填量/g
	A	B	空列	空列	
1	1	1	1	1	825
2	1	2	2	2	229
3	1	3	3	3	171
4	2	1	2	3	1 289
5	2	2	3	1	428
6	2	3	1	2	310
7	3	1	3	2	1 887
8	3	2	1	3	796
9	3	3	2	1	599

表 4 正交试验结果方差分析

Tab. 4 Variance analysis of orthogonal experimental results

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
A	716 608	2	358 304	12	0.018
B	1 684 852	2	842 426	30	0.004
误差	111 152	4	27 788		
总计	2 512.614	8			

综合分析如下:

(1)爪形单元横向长度(A)和保护套类型(B)对平均装填量($\overline{m}$)均具有显著影响($P<0.05$)。其中,因素 B 的 F 值更大、P 值更小,表明保护套类型的影响更为显著,是主导因素。误差项通过空列估计,分析结果可靠,试验设计合理。

(2)根据表 3 可知,最优组合为 A_3B_1,该组合实现了结构与表面摩擦特性的协同优化,使基质的平均装填量由原结构(54 mm,无保护套)不足 500 g 提升至 1 887 g,满足柑橘育苗基质装填的实际生产需求。

(3)在最终样机设计中,撑袋机械手的爪形单元采用铝合金制成,确定其最优结构尺寸为 40 mm × 45 mm × 158 mm,并装配发泡圆管橡胶保护套,保护套完全包覆爪形单元末端,形成稳定且高摩擦的接触界面,从而实现撑袋机械手的结构优化。

3 试验

3.1 试验条件

试验于 2025 年 4 月在华南农业大学工程学院进行。试验器材主要包括柑橘育苗装钵机样机、标准育苗袋(聚乙烯风琴式结构,规格 300 mm × 120 mm,统一厚度 0.26 mm)、电子秒表(精度 0.01 s)。试验现场如图 12 所示。

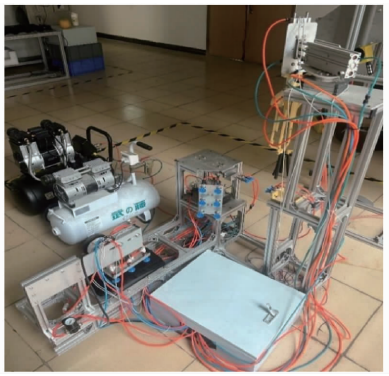


图 12 试验现场

Fig. 12 Test site

3.2 试验因素与评价指标

为验证柑橘育苗装钵机自动上袋的性能(成功率和效率),本试验以上袋成功率 R 和单次循环作业时间 T 为衡量指标,进行单因素五水平样机上袋试验,考察储袋量 N 对上袋性能的影响,水平设置储袋量分别为 90、125、160、195、230 枚,启动样机后,样机连续循环执行"取袋—送袋—开袋—撑袋"动作,每组试验重复 3 次,每次连续操作 50 个循环,记录每组试验中上袋失败的袋子总数 N_1(定义为未完成完整的"取袋—送袋—开袋—撑袋"流程),单次循环平均作业时间 T(计时从取袋机构启动信号发出直到撑袋机构完成动作信号,含失败循环耗时),具体公式为

$$\begin{cases} R = \dfrac{50 - N_1}{50} \times 100\% \\ T = \dfrac{\sum t_i}{50} \end{cases} \tag{3}$$

式中 t_i——第 i 次循环的实测作业时间,s

同时,观察试验过程中出现的问题,如育苗袋的卡滞位置、机构动作异常或失效等,用于后续分析,为机构优化提供依据。

3.3 试验结果

该装钵机在不同储袋量条件下的上袋成功率及

单次循环平均作业时间试验结果如表 5 所示。分析表明，储袋量影响上袋性能。当储袋量为 160 枚时，取袋气缸行程利用率与袋堆稳定性的平衡达到最佳，上袋成功率最高，3 次重复试验的平均成功率为 95.33%，对应平均单次循环作业时间为 16.22 s；当储袋量为 125 ~ 195 枚时，上袋成功率均维持在 90%以上，这一试验结果，验证了 U 型凹槽底板袋仓设计的优势。该结构所提供的充裕纵向空间，不仅使最大储袋量较常规水平底板袋仓提升 40.68%，还使系统能够在 125 ~ 195 枚的储袋量范围内实现高效且稳定的作业，从而增强了设备对不同生产工况的适应性。储袋量过低或过高会导致性能下降，前者因气缸行程余量不足影响吸附稳定性，后者因袋间摩擦增大导致取袋阻力上升，后续可通过调节气路减压阀，优化不同储袋量下的气压控制，进一步提升系统作业稳定性。

表 5　不同储袋量下上袋成功率与单次循环作业时间

Tab. 5　Bagging success rate and single cycle working time under different storage bag capacities

试验序号	储袋量 N/枚	上袋失败的袋子总数 N_1/枚	上袋成功率 R/%	单次循环作业时间 T/s
1	90	6	88	15.45
2	90	7	86	15.24
3	90	6	88	15.48
4	125	4	92	15.84
5	125	5	90	15.59
6	125	5	90	15.53
7	160	2	96	16.28
8	160	2	96	16.25
9	160	3	94	16.13
10	195	3	94	16.15
11	195	5	90	15.60
12	195	5	90	15.55
13	230	7	86	15.30
14	230	6	88	15.49
15	230	9	82	15.19

4　结论

（1）基于 PLC 提出一种给袋式柑橘育苗装钵机自动上袋系统，通过气动控制储袋、取袋、送袋、开袋及撑袋转送 5 个机构协同作业，突破软质深袋育苗钵机械化作业瓶颈。

（2）卧式 U 型凹槽底板袋仓与行程为 100 mm 导杆气缸的取袋机构形成储袋-取袋集成式气动结构，不仅使最大储袋量提升至 332 枚（较常规设计提升 40.68%），更使系统获得了宽达 125 ~ 195 枚的稳定工作区间，显著增强了设备的作业弹性与工况适应性。

（3）撑袋机械手爪形单元复合材质选型方案（以聚丙烯树脂为主体，搭配铝合金爪体），经静力学仿真验证最大形变量由 14.09 mm 降至 0.18 mm，配合 45 mm 横向长度爪形单元与发泡圆管橡胶保护套，基质平均装填量可达 1 887 g。

（4）通过储袋量单因素试验确定最优参数 N = 160 枚，此时平均上袋成功率 95.33%、单次循环作业时间 16.22 s。试验结果表明，该系统性能稳定、效率显著，为解决柑橘容器育苗自动化进程中劳动强度最大、人工依赖最高的上袋环节提供了高效、可靠的技术方案。

参　考　文　献

[1] 莫星煜，毛玲莉，王梓，等. 国内外柑橘产业发展现状综述[J]. 农村实用技术，2021(2)：9 - 10.

[2] 潘一凡，刘永忠，黄钰轩，等. 我国柑橘栽培管理技术现状调查和发展思考[J]. 华中农业大学学报，2023，42(4)：140 - 149.
Pan Yifan, Liu Yongzhong, Huang Yuxuan, et al. Investigation and development thinking on the cultivation situation and management techniques of citrus in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4): 140 - 149. (in Chinese)

[3] 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)

[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.
Huang Xiu, Ke Fuzhi, Luo Huaguo, et al. Effects of different substrates on growth and development of citrus container seedlings[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(10): 2320 - 2322, 2358. (in Chinese)

[5] 孙泽强，杜小强，李月婵，等. 水稻钵苗育苗穴盘分离套盘机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊)：85 - 92，101.
Sun Zeqiang, Du Xiaoqiang, Li Yuechan, et al. Design and experiment of tray separating and embedding machine for rice pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S): 85 - 92, 101. (in Chinese)

[6] 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 - 65，69.
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, 69. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 韩绿化，毛罕平，赵慧敏，等. 蔬菜穴盘育苗底部气吹式钵体松脱装置设计[J]. 农业工程学报，2019，35(4)：37 - 45.

Han Lühua, Mao Hanping, Zhao Huimin, et al. Design of root lump loosening mechanism using air jets to eject vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 37 - 45. (in Chinese)

[9] 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(S): 136 - 142. (in Chinese)

[10] Pan H, Xu Q, Bao X, et al. Design and test of automatic feeding device for substrate filling[J]. Applied Sciences, 2024, 14(10): 4206.

[11] 张秀花,老福兴,于洋,等. 育苗穴盘错位层叠储运式摆放机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):254 - 264,287.
Zhang Xiuhua, Lao Fuxing, Yu Yang, et al. Design and experiment of seedling tray dislocation stacking storage and transportation placement machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 254 - 264, 287. (in Chinese)

[12] 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 Edition), 2023, 45(5): 108 - 121. (in Chinese)

[13] Dian Y, Soranat R. Design of semi-automatic plant media bagging machine for container plant nursery[J]. Journal of Advanced Agricultural Technologies, 2018, 5(1): 36 - 40.

[14] Singh R R, Meena L K, Singh P. High tech nursery management in horticultural crops: a way for enhancing income[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6(6): 3162 - 3172.

[15] 杨雅婷,陈永生,胡桧,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 Hui, 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)

[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] 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 - 133,146.
Ji Dong, Hu Xi, Zhe Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126 - 133, 146. (in Chinese)

[18] Jaafar R A, Ihsan I I, Samsuri A M, et al. Design and development of actuator system for automated polypropylene bag assembly machine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 899: 50 - 60.

[19] Habibi M, Sutera G, Guastella D C, et al. Design and experimental validation of a 3D-printed two-finger gripper with a V-shaped profile for lightweight waste collection[J]. Robotics, 2025, 14(7): 87.

[20] 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)

[21] 张鉴. 自走式育苗钵装填摆码机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
Zhang Jian. Design and test of self-propelled filling and laying machine for seeding pot[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[22] 杨传民,刘铭宇,汪浩,等. 给袋式包装机取袋机构运动学分析[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):161 - 166.
Yang Chuanmin, Liu Mingyu, Wang Hao, et al. Kinematic analysis of bag-picking mechanism in automatic bag-delivering packaging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S2): 161 - 166. (in Chinese)

[23] 朱永昌. 一种新型给袋式包装机的研制[D]. 淮南:安徽理工大学,2020.
Zhu Yongchang. Development of a new type of bag feeding packaging machine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

[24] 王相友,王恒仁,吴海涛,等. 给袋式马铃薯自动装袋机设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(3):1 - 10.
Wang Xiangyou, Wang Hengren, Wu Haitao, et al. Design and test of automatic bag-feeding packaging machine of potatoes [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 1 - 10. (in Chinese)

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.