

朱家庭,刘传鑫,卢璐,等.柑橘育苗软钵振动装填生产线的设计与试制[J].华中农业大学学报,2026,45(2):250-258.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.026

柑橘育苗软钵振动装填生产线的设计与试制

朱家庭,刘传鑫,卢璐,李善军,张衍林,徐勤超

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 为解决我国柑橘育苗软钵基质装填作业耗时费力的问题,提出一种柑橘育苗软钵的振动装填方案,并设计一种单次可装填36钵塑料软钵或4钵无纺布大钵的柑橘育苗软钵振动装填生产线。采用理论分析和仿真计算方法对基质的混合与输送单元、装填单元、托盘输送单元的主要零部件进行结构设计和参数确定,试制样机并通过装填作业试验测试样机性能与工作效率。结果显示:该生产线运行稳定,作业效果优良。塑料软钵和无纺布大钵装填垮塌与漏装数量均为0,工作效率分别为4 320、480钵/h,装填均匀性较好。

关键词 柑橘;柑橘育苗;基质装填;振动装填;育苗生产线

中图分类号 S126 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0250-09

我国柑橘产量与种植规模均位居世界首位。南方柑橘产区的黄龙病导致柑橘果实变质、产量骤降,对柑橘幼苗的需求量增加^[1-3]。柑橘育苗是柑橘产业链中的关键环节,传统裸地育苗条件下,露天环境利于传播病害的木虱繁殖,幼苗抗病力弱且管理防控难,极易染病,给果农造成巨大经济损失。柑橘容器育苗技术可通过人为调控创造适宜的育苗环境,使幼苗脱离带毒风险,其操作流程为:预先在育苗容器内灌装混合均匀的营养基质,待基质装填完成后将裸根苗移栽至容器内,进而开展后续培育工作^[4-5]。该技术可为柑橘产业健康发展提供有力支撑。目前国内柑橘容器基质灌装主要依靠人工作业,劳动强度大,生产效率低下。为解决该问题,需研制柑橘育苗钵机械化装填设备,以提高容器育苗整体效率。

随着机械化技术的发展,育苗基质机械式装填方式的优化与革新日益受到关注^[6-10]。德国Mayer公司研发的TM2105型自动花盆上土机,借助刮板提升机将营养土提升至设定高度后抛出,再通过导流仓将营养土引流至下方的花盆内完成装填。该设备已实现较高度度的自动化作业,但主要适用于规模化大型花卉种植基地,不适用较大软苗钵的装填作业。Xu等^[11]研发了专用于柑橘塑料育苗软钵

装填的生产线,但其转运框结构复杂且成本高,通用性较差,不适合在工厂化育苗中使用。何林等^[12]开发柑橘育苗钵装填、浇灌、压穴一体化生产线,但其落料方式不精准导致余土量较大。总体而言,当前针对柑橘育苗软钵的精准定量装填输送技术的相关研究仍较为匮乏。

本研究提出了一种适用于柑橘塑料育苗软钵和无纺布育苗大钵的连续式振动装填生产线。确定整体结构方案与关键部件的结构参数,对样机进行作业性能与效率试验,以验证产线的结构设计合理性与装填效率,并为后续柑橘育苗软钵装填机械的研制和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 柑橘育苗软钵装填生产线设计

1)总体结构。柑橘育苗软钵装填生产线主要由多种物料混合单元、装填单元、托盘输送单元3部分组成。物料混合单元包括混料仓、2条倾斜输送带和暂存仓等,采用目前市场上较成熟的设备构成;装填单元包括落料机构、振动机构和支架;托盘输送单元由装填托盘和4段滚筒输送线组成。具体结构如图1所示。

2)工作原理与流程。柑橘育苗软钵自动装填生

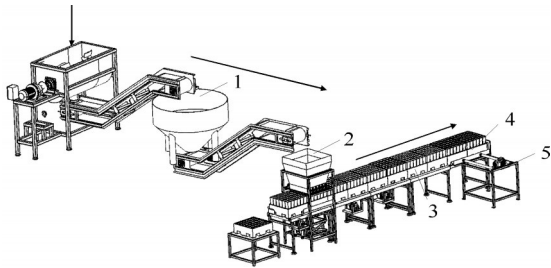
收稿日期:2025-10-16

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2021BBA091);江西省农机装备研产推用一体化项目(YCTY202503);中央高校基本科研业务费专项(2662024GXYPY014)

朱家庭,E-mail:3252605113@qq.com

通信作者:徐勤超,E-mail:hlxqc@mail.hzau.edu.cn

产线基质运输方向如图1所示。生产线启动后,分别将河沙、泥炭土、稻壳、珍珠岩进行混合;混合完成的基质通过倾斜输送带输送至暂存仓直至装满。随后根据待装填育苗钵的类型,在装填装置支架处更换对应的导流盖板,确保所有装置均处于初始位置。将育苗钵放入对应的托盘后,将托盘放置在生产线开始端,装填输送线启动,托盘沿输送方向向后输送。当到达导流盖板正下方时,装填输送线立即制动,振动机构上升抬起托盘,直至导流盖板的导流口插入育苗钵中;同时6组旋转刮板启动,将落料仓中的基质刮落至育苗钵内。装填基质时,振动电机运行,边振边装,保证装填的密实效果。装填完成后,振动机构下降,装填输送线启动,暂存输送线上的两框育苗钵输送至转运生产线,过渡输送线上的两框育苗钵输送至暂存输送线。满足转运条件后,转运推板将两框育苗钵推送至转运车,推板伸出至最大行程后,立即缩回至初始位置。



1. 混料生产线 Production line mixer; 2. 装填装置 Filling device; 3. 主体输送线 Main conveyor line; 4. 装填托盘 Tray based filling; 5. 转运装置 Transfer device.

图1 柑橘软质育苗钵通用自动装填生产线
Fig.1 Universal automatic filling line for citrus soft seedling pots

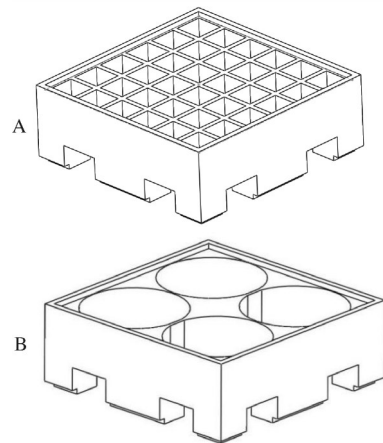
1.2 装填托盘

装填托盘对育苗软钵进行装填定位,并辅助输送线对苗钵进行输送,具体结构如图2所示。根据柑橘类作物种苗培育工艺标准,设定装填单元单次作业循环中可容纳的塑料育苗钵数量为36个,无纺布育苗钵数量为4个,托盘对应设置36、4个模腔。

塑料育苗钵装填托盘隔间形状是与塑料育苗钵形状相同的棱台,育苗钵的上开口为100 mm×100 mm的正方形,底面是75 mm×75 mm的正方形,经式(1)计算可得塑料育苗钵锥度 $T=0.1178$ 。

$$T=(D-d)/h \quad (1)$$

式(1)中: T 为塑料育苗钵的锥度; D 为塑料育苗钵上开口外接圆的直径,为141.42 mm; d 为塑料育苗钵底面外接圆的直径,为106.07 mm。



A: 塑料育苗钵装填托盘 Plastic seedling pot trays; B: 无纺布育苗钵装填托盘 Non-woven fabric seedling pot trays.

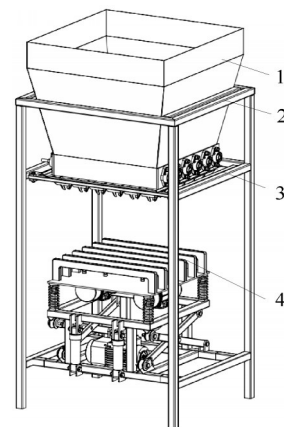
图2 育苗钵装填托盘示意图

Fig.2 Schematic diagram of seedling pot trays

隔间底面尺寸为75 mm×75 mm,通过前期预试验得到育苗软钵站立稳定的最小高度为120 mm,进而得到上开口为85 mm×85 mm的正方形。转运框中每个隔间底部中心设有直径为20 mm的圆孔,用于育苗钵浇灌后渗水。确定无纺布转运框内部隔间高度为120 mm,隔间形状与无纺布育苗钵展开后的圆柱状相同。

1.3 装填装置

1)结构。装填装置负责育苗钵基质的装填和振实,主要由落料机构、振动机构和支架3部分构成,如图3所示。

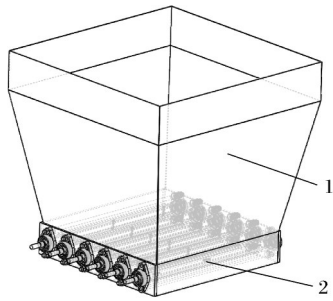


1. 料仓 Hopper; 2. 支架 Support frame; 3. 齿轮 Gear; 4. 振动机构 Vibration mechanism.

图3 装填装置结构图

Fig.3 Filling device structural diagram

2)落料机构。落料机构包括料仓和旋转刮板,如图4所示,其主要功能为储存育苗基质以及间歇式供料。



1. 落料仓 Feed hopper; 2. 旋转刮板 Rotary scraper.

图4 料仓示意图

Fig.4 Schematic diagram of hopper

为保证生产过程中料仓基质充足,对料仓容积进行计算。生产线在实际工作时,装满1盘塑料软钵所需育苗基质质量相比无纺布大钵较大,为实现连续化生产作业,拟定料仓中储存的基质可满足3个塑料育苗钵转运框的装填需求。考虑到每次使用前调试需要使用基质的质量,经式(2)计算,落料仓中的基质质量 G 为 145.53 kg。

$$G = (3 \times 36 \times m)(1 + 10\%) \quad (2)$$

式(2)中: G 为落料仓中应装填基质质量,kg; m 为单个育苗钵装填后的质量,kg。

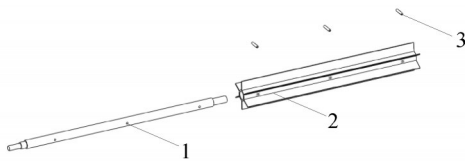
代入式(3)得,料仓的容积为 0.22 m^3 。

$$V = \frac{G}{\rho} \quad (3)$$

式(3)中: V 为料仓容积, m^3 ; G 为基质质量,kg; ρ 为基质堆积密度, $\rho = 670 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

通过2号倾斜输送线的宽度,确定料仓上开口尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,为保证装填过程中无基质掉落到育苗钵外,料仓下开口的尺寸设计为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。通过滑动角测定装置与测定方法^[13],得出本研究中所使用育苗基质的滑动角平均值为 45.1° ,根据上述落料仓部分参数,结合育苗基质滑动角,确定落料仓倾角为 79° 。

旋转刮板结构组成如图5所示,主要由转轴、套筒及钢板等部件组成,5条钢板均匀分布于套筒上。为实现刮板失效后可更换,套筒和转轴通过弹簧销过盈连接。6组旋转刮板等距安装于落料仓底部。



1. 转轴 Rotating shaft; 2. 刮板 Scraper; 3. 弹簧销 Spring pin.

图5 旋转刮板示意图

Fig.5 Structural diagram of the rotary scraper

根据料仓下开口和装填托盘中每列育苗钵的间隔尺寸,设定各刮板中心距为 100 mm 。旋转刮板刮取基质示意图与原理图分别如图6和图7所示,刮板之间通过钢板隔离,由控制器控制启停,装置待机时,刮板不发生转动,其与相邻隔板组成密闭空间,保证基质不发生掉落,装置工作时,6组刮板通过电机链传动带动转动,将落料仓中的基质刮落。

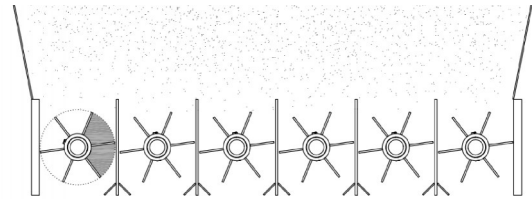


图6 刮板刮落基质体积示意图

Fig.6 Schematic diagram of the volume of substrate scraped off by the scraper

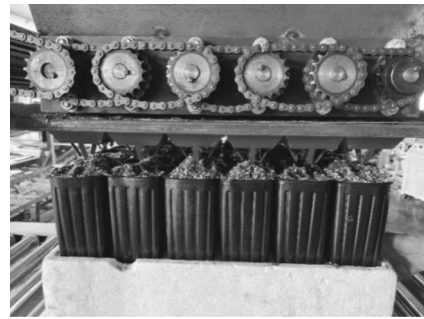


图7 料仓工作原理图

Fig.7 Working principle diagram of the hopper

考虑到安装位置的限制,电机通过链条和链轮直接与刮板转轴相连。传动系统齿轮传动比为 $1:1$ 。选用减速电机减速比为 120 ,功率为 1100 W 。

为保证装置定量装填,需计算落料机构工作时间。通过计算刮板旋转1周所刮落到育苗钵中基质的体积,可推算装填装置装填1排育苗钵所用时长。根据落料仓和转运框的结构尺寸,确定落料轴上刮板的尺寸为 $596 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,套筒外圈直径为 34 mm 。忽略每条刮板厚度,旋转刮板转动1周时,其刮取基质体积为:

$$V_z = \pi \times (R^2 - r^2) \times l \quad (4)$$

式(4)中: R 为外圆刮板半径,mm; r 为套筒半径,mm; l 为刮板长度,mm。

单组旋转刮板对应1列托盘中的6个塑料育苗钵或3组旋转刮板对应2个无纺布育苗钵,则刮板转动1周,落入每个育苗钵的基质体积为:

$$V_s = V_z / 6 \quad (5)$$

$$V_w = 3V_s / 2 \quad (6)$$

塑料育苗钵的形状为棱台状,计算其体积为:

$$V_1 = \frac{h}{3} (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}) \quad (7)$$

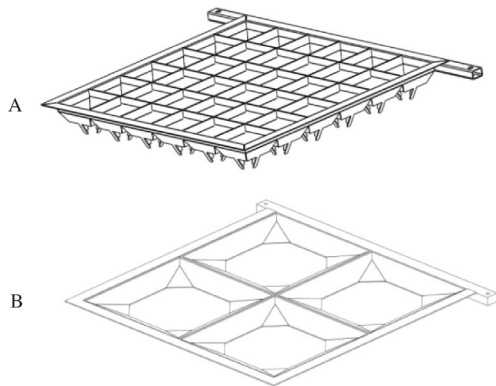
无纺布育苗钵的形状为圆柱状,计算其体积为:

$$V_2 = S_3 \cdot h_3 \quad (8)$$

式(8)中: S_3 为无纺布育苗钵底面的面积, mm^2 ; h_3 为无纺布育苗钵的高度, mm 。

得到 $V_1=0.0023 \text{ m}^3$, $V_2=0.0211 \text{ m}^3$ 。结合落料装置的电机转速,得到装填塑料育苗钵和无纺布育苗钵理论所需时间分别为20.0、20.6 s。

3)导流盖板。塑料育苗钵与无纺布育苗钵基质导流盖板结构如图8所示。其主要功能是利用导流口引基质至育苗钵中,防止装填过程中苗钵出现垮塌。需根据待装填育苗钵的类型选用对应的导流盖板,确保装填过程中盖板导流口与育苗钵开口精准贴合,以实现基质向育苗钵内顺利流入。



A: 塑料育苗钵导流盖板 Flow-diverting cover plate for plastic seedling pots; B: 无纺布育苗钵导流盖板 Flow-diverting cover plate for non-woven fabric seedling.

图8 导流盖板结构示意图

Fig.8 Structural schematic diagram of the flow-diverting cover plate for seedling pots

塑料育苗钵导流盖板采用倒锥形的导流口结构,导流口的倾角需大于前文所测量基质的滑动角,取倾角为 60° ,根据塑料育苗钵的开口面积,确定导流口的部分尺寸如图9所示。

由于无纺布育苗钵尺寸规格较大,在利用转运框对无纺布育苗钵进行支撑固定后,根据无纺布育苗钵的开口形状和直径,确定采用圆形的导流口结构,初步确定无纺布育苗钵装填盖板导流口直径为200 mm,无纺布育苗钵导流盖板其他的尺寸设计参考塑料育苗钵导流盖板,如图10所示。

4)振动机构设计。振动机构是装填装置的主要工作部分,其结构由振动台、振动电机、隔振弹簧、升降支架等结构组成,如图11所示。

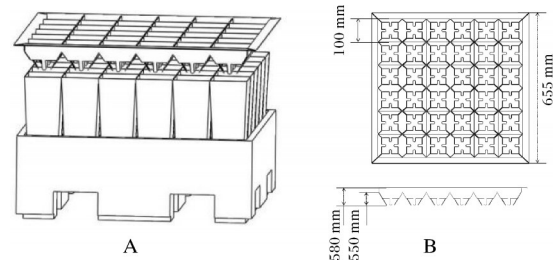


图9 塑料育苗钵导流盖板和苗钵位置关系(A)及部分尺寸示意图(B)

Fig.9 Diagram of the position relationship(A) and partial dimensions of the flow-diverting cover plate for plastic seedling pots(B)

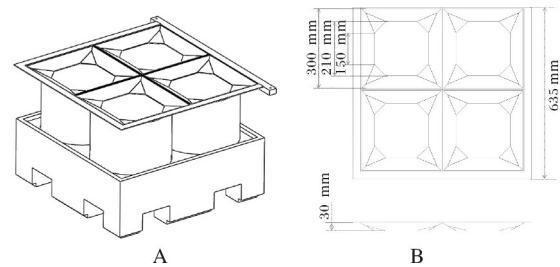
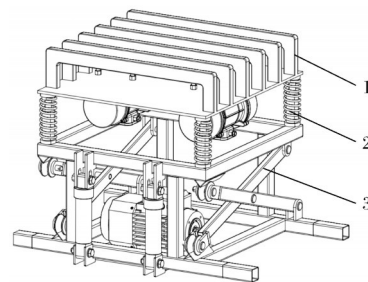


图10 无纺布育苗钵导流盖板和无纺布育苗钵位置关系(A)及部分尺寸示意图(B)

Fig.10 Diagram of the position relationship(A) and partial dimensions of the flow-diverting cover plate for non-woven cloth seedling pots(B)



1. 振动台 Vibrating plate; 2. 隔振弹簧 Vibration isolation spring; 3. 剪叉式升降机 Scissor lift.

图11 振动机构效果图

Fig.11 Vibration mechanism rendering

为保证工作过程中,振动机构与输送线不发生运动干涉,输送线采用滚筒传送形式,振动台由钢板与6条格栅组成,6条格栅均匀布置。当育苗钵运输至振动装置上方时,振动装置从滚筒输送线下方升起,穿过输送线将育苗钵顶起。本研究采用双激振电机对称安装于激振平台基座的布局方案,使电机转轴轴线保持平行配置且旋向相反,确保振动系统合成激振力为垂直方向^[14-15],装置整体在振动电机作用下实现垂直方向振动过程。振动电机在选型时,要求按照激振力大于参振质量2倍以上选型,塑

料育苗钵自然填充质量为 $36 \times 1.23 = 44.3$ kg, 振动台质量约为 30.0 kg, 所以振动电机激振力大于 $2 \times (44.3 + 30.0) \times 9.8 = 1\ 456.28$ N, 研究选取 2 台型号为 DY-MV100/3 的振动电机, 单台电机激振力为 1 kN, 额定功率为 0.04 kW, 工作频率为 50 Hz。

为保证振动台工作稳定性, 同时考虑成本与操作空间, 升降机构采用剪叉式液压升降方式。工作时, 电液推杆带动剪叉臂完成在垂直方向上的高度调节。电液推杆行程为 100 mm, 速度为 30 mm/s。

振动装置运行时, 振动电机产生的激振力会传递到底座以及其他零部件上, 可能对设备造成损害, 所以需要在振动台与支撑机构之间布置合适的隔振装置, 隔离振动能量传递^[16-17]。研究选用圆柱螺旋压缩弹簧作为隔振装置, 其隔振效果可通过隔振效率来衡量, 即隔振装置所消除振动的百分率(ϵ)。

$$\epsilon = \left(1 - \frac{\sqrt{1 + (2\xi z)^2}}{\sqrt{(1 - z^2)^2 + (2\xi z)^2}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

式(9)中: 频率比 $z = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n}$; 阻尼比 $\xi = \frac{c}{c_r}$ 。

由式(9)可知, 无论阻尼比大小如何, 如果要求振动系统产生隔振效果, 需要令频率比 $z > \sqrt{2}$, 但是频率比超过 5, 隔振效果增加不再明显。

本研究假设振动装置只有垂直方向的自由度, 因此, 不考虑弹簧的轴向刚度。其计算公式为:

$$K = 9.8 \times \frac{G \times d^4}{8 \times D_m^3 \times N_c} \quad (10)$$

式(10)中: K 为弹簧刚度系数, N/mm; G 为弹簧刚性模数, N/mm²; d 为弹簧线径, mm; N_c 为弹簧有效圈数, $N_c = \text{总圈数} - 2$; D_m 为弹簧中径, mm; $D_m = \text{弹簧外径} - d$ 。

振动系统采用 4 组并联弹簧作为弹性支撑元件并进行选型, 其结构参数如下: 线径 6 mm, 有效圈数 10, 中径 54 mm (外径 60 mm), 自由长度 150 mm。经计算得出单组弹簧刚度系数 $K_1 = 98.932$ N/mm ($i = 1, 2, 3, 4$, 对应 4 组并联弹簧), 根据并联弹簧刚度叠加原理, 系统等效总刚度 $K = \sum_{i=1}^4 k_i = 4 \times 98.932 = 395.732$ N/mm。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (11)$$

可知, 系统固有频率为 12.8, 频率比满足要求, 该设计可达到较好的减振效果。

5) 振动台模态仿真。振动台在连续作业过程中

承受来自驱动装置的周期性激振力, 当外界激励频率接近系统固有频率时, 将引发结构共振风险^[18-20], 直接影响设备运行稳定性。通过 Workbench 对振动台进行模态分析获取系统前 6 阶非零模态及其对应振型特征进行研究。振动台所用材料为 Q235 结构钢, 其性能参数为: 弹性模量 1.9×10^{11} MPa, 泊松比 0.3, 材料密度 $7\ 850$ kg/m³。

选择前 6 阶模态作为研究对象。振动台的最大变形量以及模态振型及前 6 个阶段的固有频率分别如图 12 和表 1 所示。通过对模态振型进行分析, 可以获得振动台在振动时的各个部位的振动状态和振动频率。

根据振动台前 6 阶柔性模态振型图, 可以得知振动台结构的主要变形部位为栅格, 这些部位的主要变形方式包括弯曲、扭转和摆动等。此外, 由图 12 可以看出, 振动台 1 阶振频为 109.85 Hz, 其最大变形量为 13.248 mm, 远远超过振动电机工作频率 50 Hz, 不会产生共振现象, 振动台结构较为稳定, 可以使用。

1.4 输送线

生产线确定 4 段输送线采用滚筒输送线, 其结构简单、承载能力强且适用于箱体、框体等规则形状的货物。所设计的 4 段滚筒输送线主要由滚筒、支撑架以及传动系统组成, 前 3 段输送线配有单独的动力输入, 最后 1 段输送线无动力输入, 如图 13 所示。

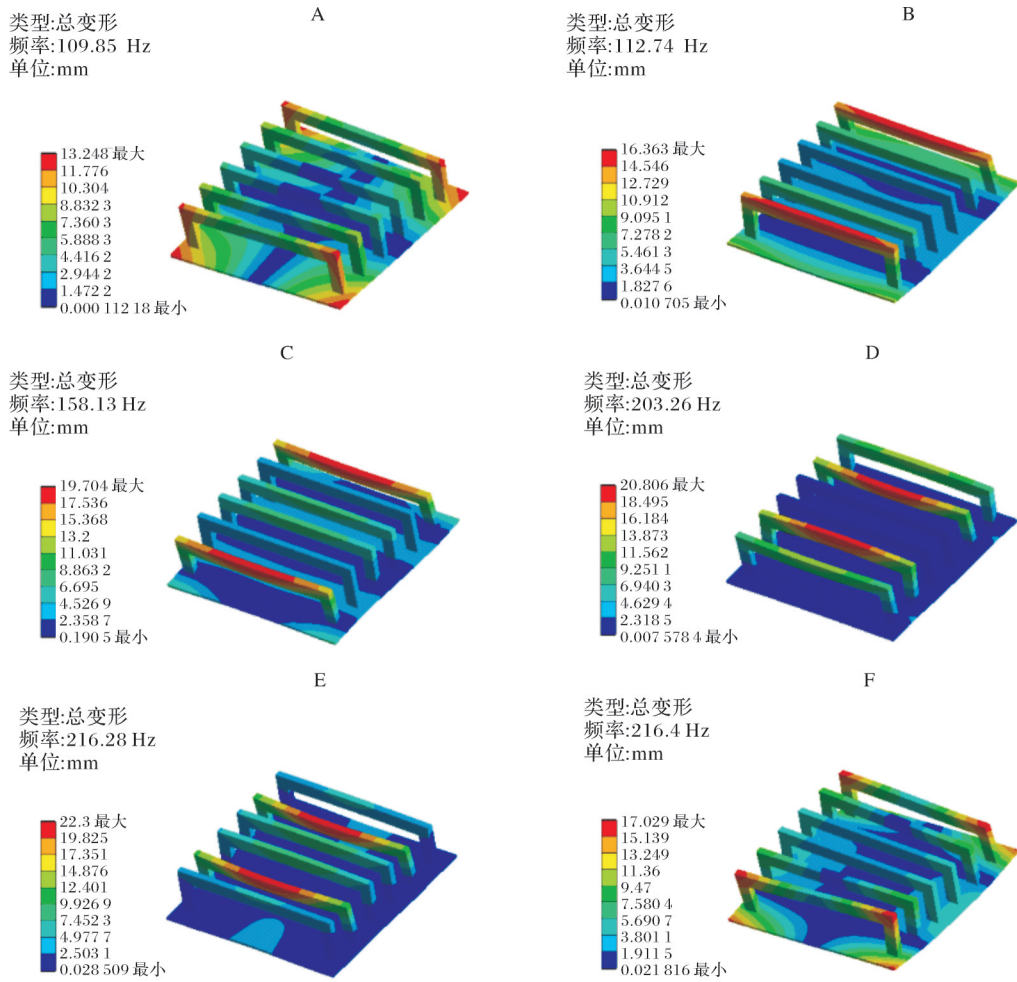
1.5 样机试制

本研究于机电工程训练中心内完成了生产线加工和装配。将选择的物料混合单元和试制的精准装填单元及托盘输送单元组成装填生产线, 关键部件与整机加工样机如图 14 所示。

1.6 装填试验方法

开展实际装填试验, 验证产线工作可靠性与稳定性。试验选用规格为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (开口边长 \times 边长 \times 高度) 的塑料育苗钵; 试验基质为河沙、泥炭土、稻壳、珍珠岩按体积比 1:1:1:1 混合而成的复合基质。依据前期预试验结果, 采用向基质中添加水分的方法^[21], 设定其含水率为 13.56% 左右, 试验对象为育苗基质装填装置整机。

以钵钵装填遗漏、基质压垮钵钵 (漏装、垮塌) 数量、装填质量分布均匀性及装置实际作业时间作为产线性能与效率评价指标。漏装与垮塌数量通过肉眼直接计数, 通过电子秤测量记录每次试验中的各钵的装填质量。育苗钵之间装填质量的均匀性通过式(12)~(13)计算其变异系数进行检验, 同时记录装



A: 一阶 First order; B: 二阶 Second order; C: 三阶 Third order; D: 四阶 Fourth order; E: 五阶 Fifth order; F: 六阶 Sixth order.

图 12 振动台模态振型

Fig.12 Vibration table modal shape

表 1 振动台模态参数

Table 1 Shaker modal parameters

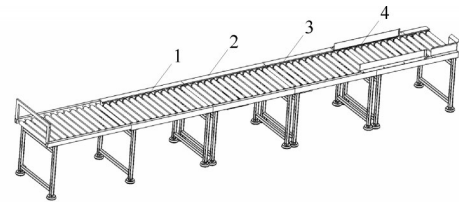
阶数 Order	频率/Hz Frequency	最大变形量/mm Maximum deformation
1	109.85	13.248
2	112.74	16.363
3	158.13	19.704
4	203.26	20.806
5	216.28	22.300
6	216.40	17.029

填各环节耗时。

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (m_{ij} - \bar{m}_{ij})^2}{mm - 1}} \quad (12)$$

$$C_{vij} = \frac{S_{ij}}{\bar{m}_{ij}} \times 100\% \quad (13)$$

式(12)~(13)中： S_{ij} 为试验样本数据标准差； C_{vij}



1. 链条盖板 Chain cover plate; 2. 传动系统 Drive system; 3. 滚筒 Roller; 4. 限位板 Limit plate.

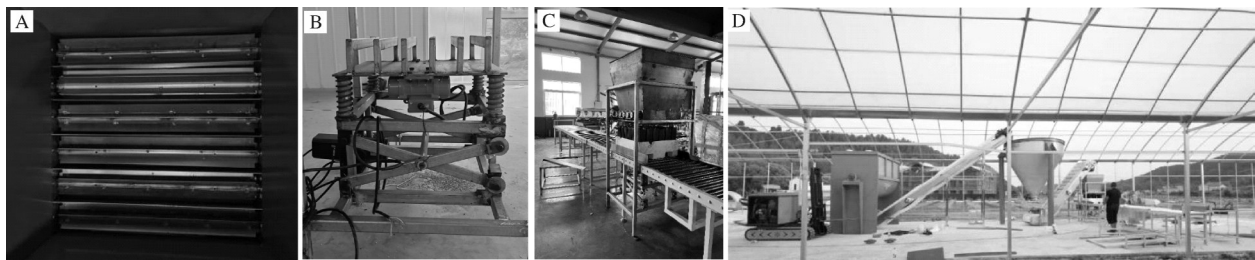
图 13 主体输送线结构示意图

Fig.13 Schematic diagram of the structure of the main conveyor line

为样本数据变异系数； \bar{m}_{ij} 为所有育苗钵平均装填质量，kg； m_{ij} 为各育苗钵装填质量，kg； m 为转运框行数， $m=6$ ； n 为装运框列数， $n=6$ 。

2 结果与分析

试验重复 3 次，取平均值，装填验证结果如图 15 所示。通过观察可得，苗钵装填效果良好。经过 3 次



A: 旋转刮板加工实物 Rotary scraper machining prototype; B: 振动机构加工实物 Vibration mechanism machining prototype; C: 整机实物 Machine prototype; D: 装填生产线实物 Filling production line equipment.

图14 关键部件与整机加工样机示意图

Fig.14 Schematic diagram of key components and complete machining prototype

试验记录,育苗钵垮塌与漏装数量为0;3次装填同一位置塑料育苗钵装填质量平均值如表2所示。

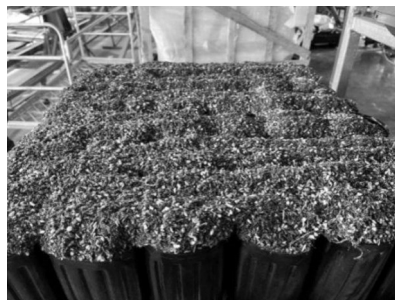


图15 验证效果图

Fig.15 Experimental effect diagram

表2 同一位置育苗钵的平均装填质量

Table 2 Average filling mass of seedling pots at the same position

行序号 Row number	不同列 Different columns					
	1	2	3	4	5	6
1	1.24	1.23	1.26	1.18	1.23	1.25
2	1.13	1.32	1.23	1.22	1.21	1.28
3	1.27	1.14	1.25	1.31	1.20	1.19
4	1.23	1.14	1.33	1.17	1.24	1.30
5	1.18	1.29	1.16	1.35	1.18	1.20
6	1.18	1.21	1.22	1.23	1.28	1.20

装填试验中育苗钵的装填质量变异系数平均值为6.09%,表明育苗钵装填质量分布均匀性良好。

在设备运行效率评估中,针对塑料育苗软钵装填6个关键工艺环节进行耗时数据采集,各环节单周期耗时数据为:摆放育苗钵和放置转运框耗时28 s,转运框运输至装填位置耗时2 s,振动装置上升耗时3 s,装填阶段耗时22 s,额外振动耗时2 s,振动装置下降耗时3 s。则单次装填作业的总耗时为:

$$t = t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 30 \text{ s} \quad (14)$$

则该装置的工作效率 η 为:

$$\eta = 36 \times \frac{t_z}{t} = 4320 \text{ 钵/h}$$

式(14)中: t 为1个作业周期的总时间; t_z 为效率计量时间, $t_z=1 \text{ h}$ 。

上述结果显示:在遵循标准操作流程运用此装置开展育苗钵装填作业时,塑料育苗钵装填作业效率可达4320钵/h,推算得无纺布育苗钵装填的工作效率为480钵/h,有效提升了育苗钵的装填效率与品质。

3 讨论

本研究设计了一种柑橘育苗软钵振动装填转运生产线,主要由物料混合与输送单元、装填单元、托盘输送单元组成。该装置可实现柑橘育苗软钵的全自动装填输送作业,具有自动化程度高、功能完善的优点,可与叉车等联合作业。

样机装填试验结果显示:产线工作效率高,塑料育苗钵装填作业效率为4320钵/h,无纺布育苗钵装填作业效率为480钵/h,育苗钵漏装与垮塌率为0%,可为柑橘育苗自动化作业提供可靠的技术装备支撑。

与传统人工装填方式相比,生产线实现了物料混合、装填、托盘输送全流程自动化。柑橘钵钵的自动化装填为柑橘育苗的标准化、规范化提供了保障。后续可围绕多品种柑橘基质成分自适应调节、远程运维系统开发等方向深化研究,提升设备智能化与适用性,为育苗自动化技术创新提供支撑。

参考文献 References

- [1] 韩鹤友,程帅华,宋智勇,等.柑橘黄龙病药物防治策略[J].华中农业大学学报,2021,40(1):49-57. HAN H Y, CHENG S H, SONG Z Y, et al. Strategies on drug prevention and control of citrus Huanglongbing[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 49-57 (in Chinese with English

- abstract).
- [2] THAKURIA D, CHALIHA C, DUTTA P, et al. Citrus Huanglongbing (HLB): diagnostic and management options [J/OL]. *Physiological and molecular plant pathology*, 2023, 125: 102016 [2025-10-16]. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102016>.
- [3] DONG Z H, SRIVASTAVA A K, LIU X D, et al. Interactions between nutrient and Huanglongbing pathogen in citrus: an overview and implications [J/OL]. *Scientia horticulturae*, 2021, 290: 110511 [2025-10-16]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110511>.
- [4] 卢志红. 柑橘良种无病毒容器苗木繁育技术 [J]. *果农之友*, 2017(1): 23-24. LU Z H. Breeding techniques of virus-free container seedlings of citrus varieties [J]. *Fruit growers' friend*, 2017(1): 23-24 (in Chinese).
- [5] GALLEGOS-CEDILLO V M, NÁJERA C, GRUDA N S, et al. An in-depth analysis of sustainable practices in vegetable seedlings nurseries: a review [J/OL]. *Scientia horticulturae*, 2024, 334: 113342 [2025-10-16]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113342>.
- [6] 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 Q C, LI S J, ZHANG Y L, 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 with English abstract).
- [7] 王涛, 费焱, 楼婷婷, 等. 色块苗软薄容器基质机械化装填关键技术探讨 [J]. *农业开发与装备*, 2023(11): 32-35. WANG T, FEI Y, LOU T T, et al. Key technologies for mechanized filling of soft thin-walled containers with substrate for color-block seedlings [J]. *Agricultural development & equipments*, 2023(11): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李旭, 伍硕祥, 匡敏球, 等. 蔬菜泡沫育苗盘多适应性自动叠盘装置设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 122-132. LI X, WU S X, KUANG M Q, et al. Design and test of automatic tray stacking device for vegetable foam seedling trays [J]. *Transactions of the CSAM*, 2024, 55(3): 122-132 (in Chinese with English abstract).
- [9] 孙泽强, 杜小强, 李月婵, 等. 水稻钵育苗穴盘分离套盘机设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 85-92. SUN Z Q, DU X Q, LI Y C, et al. Design and experiment of tray separating and embedding machine for rice pot seedlings [J]. *Transactions of the CSAM*, 2020, 51(S1): 85-92 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李心志, 廖庆喜, 袁华, 等. 油菜基质块移栽机苗床带整备装置设计与试验 [J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43(2): 215-226. LI X Z, LIAO Q X, YUAN H, et al. Design and test of seedbed belt preparation device for rapeseed substrate block transplanter [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(2): 215-226 (in Chinese with English abstract).
- [11] XU Q C, CHEN H Y, LIU C X, et al. Design of the filling device for *Citrus* seedling pot based on turnover box [J]. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2025, 18(3): 97-104.
- [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 L, JIANG J, LI J C, 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 with English abstract).
- [13] 刘继展, 彭海军, 李男, 等. 高架栽培配套基质自动移动摊铺机设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 58-67. LIU J Z, PENG H J, LI N, et al. Design and experiment of automatic mobile substrate paver for elevated cultivation [J]. *Transactions of the CSAM*, 2018, 49(1): 58-67 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张珺航. 马铃薯组培苗移栽机的优化与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. ZHANG J H. Optimization and experiment of transplanting machine for potato tissue culture seedling [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [15] 曹国巍. 预制混凝土构件振动台振动系统的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. CAO G W. Research on vibration system of precast concrete component shaking table [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [16] 侯和平, 刘善慧, 习大润, 等. 印刷机导向辊复合隔振装置设计与分析 [J]. *机械设计*, 2025, 42(9): 104-111. HOU H P, LIU S H, XI D R, et al. Design and analysis of composite vibration isolator for printing machine's guide roller [J]. *Journal of machine design*, 2025, 42(9): 104-111 (in Chinese with English abstract).
- [17] 章毅. 铜粉烧结式热管自动填粉机设计及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019. ZHANG Y. Design and performance study of copper powder sintered heat-pipe automatic filling machine [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李国明, 王小瑜, 李涛, 等. 多源激励下自走式残膜回收机机架模态分析和结构优化 [J]. *农机化研究*, 2026, 48(3): 103-111. LI G M, WANG X Y, LI T, et al. Modal analysis and structural optimization of self-propelled residual film recovery machine under multi-source excitation [J]. *Journal of agricultural mechanization research*, 2026, 48(3): 103-111 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王光恒, 林慧, 王玉刚, 等. 采棉机架架模态分析与优化 [J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(6): 63-71. WANG G H, LIN H, WANG Y G, et al. Modal analysis and optimization of cotton picker frame [J]. *Journal of Chinese agricultural mechanization*, 2024, 45(6): 63-71 (in Chinese with English abstract).

- [20] 郭俊先,刘颖灿,魏远俊,等. 秸秆还田残膜回收一体机振动特性分析与结构优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 155-163. GUO J X, LIU Y C, WEI Y J, et al. Vibration characteristics analysis of the optimal structure of integrated straw returning and residual film recycling machine[J]. Transactions of the CSAM, 2024, 40(2): 155-163 (in Chinese with English abstract).
- [21] KORMANEK M, MALEK S, BANACH J, et al. The influence of vibration and moisture content on the compactness of the substrate in nursery container cells determined with a multi-penetrometer [J/OL]. Forests, 2023, 14(9): 1750 [2025-10-16]. <https://doi.org/10.3390/f14091750>.

Design and prototyping of a vibration-filling production line for soft-pot seedling of citrus

ZHU Jiating, LIU Chuanxin, LU Lu, LI Shanjun, ZHANG Yanlin, XU Qinchao

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A vibration-filling scheme for soft-pot seedling of citrus was proposed and a vibration-filling production line capable of filling 36 plastic soft pots or four non-woven fabric large pots at a time was designed to address the issue of time-consuming and labor-intensive substrate filling operations for soft-pot seedling of citrus in China. Theoretical analysis and simulation calculation methods were used to design the structure and determine parameters of the key components of the substrate mixing and conveying unit, the filling unit and the tray conveying unit. The prototype was successfully developed and manufactured, and its performance and working efficiency were tested through filling operation experiments. The results showed that the production line run stably with excellent operational performance. There were no collapses or missing fills for both plastic soft pots and non-woven fabric large pots. The working efficiency of plastic soft pots and non-woven fabric large pots was 4 320 and 480 pots per hour, respectively, with high efficiency and good filling uniformity. It will provide a reference for the development and optimization of filling and transfer equipment for soft-pot seedling of citrus.

Keywords citrus; citrus seedling raising; substrate filling; vibration filling; production line of seedling

(责任编辑:陆文昌)