

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.05.011

柑橘育苗钵装填成穴生产线的设计与试验

何林^{1,2}, 蒋杰², 李家操², 张福凯²,
易时来², 郑永强², 吕强²

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 柑桔研究所, 重庆 400712

摘要: 柑橘工厂化容器育苗的砧木苗在带基质移栽过程中, 育苗钵装填和移栽穴成型均由人工作业完成, 劳动强度大、效率低、作业质量较差。针对这一问题, 研究设计了一种育苗钵装填成穴生产线。整机主要由装填模块、浇灌模块、冲孔模块 3 部分组成, 配合以 8 个育苗钵为一组的转运框, 进行流水作业。主要设计了具有苗钵支撑和快速卸载功能的转运框、具有均匀装填功能的分流-刮土装置、定量浇灌装置和冲孔装置, 并开发了整机的控制系统。分析了生产线关键工作过程, 并采用正交试验法优化了工作参数。以装填量、装填均匀性为评价指标开展装填试验, 结果表明当营养土体积含水率为 3%、提升机速度为 0.25 m/s、卸料高度为 580 mm 时装填效果最好。以孔径收缩率、育苗钵塌陷高度和营养土沉降高度为评价指标开展浇灌-冲孔试验, 结果表明当浇灌总量为 450 mL、浸润时间为 19 s、冲孔柱锥尖角度为 35°、冲孔速度为 200 mm/s、冲孔柱穴底停留时间为 2 s 时成穴效果最好。最优参数组合下, 整机工作效率大于 2 300 钵/h, 且装填成穴效果好, 能够满足柑橘育苗钵装填成穴在线自动化生产需求。

关键词: 柑橘; 工厂化育苗; 育苗钵; 装填; 冲压成穴;

移栽穴; 正交试验

中图分类号: S223.1; S666

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)05-0108-14

Design and Test of Seedling Pot Filling and Hole Punching Processing Line for Citrus

HE Lin^{1,2}, JIANG Jie², LI Jiacao², ZHANG Fukai²,
YI Shilai², ZHENG Yongqiang², LYU Qiang²

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Citrus Research Institute, Southwest University, Chongqing 400712, China

Abstract: In the process of transplanting rootstock seedlings attached with substrate in the factory production of container citrus seedlings, the filling substrate to the seedling pots and forming the holes for transplanting are completed by manual operation, which are labor-intensity, low efficiency, and poor operation

收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-gksbX0095); 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2019C072).

作者简介: 何林, 硕士研究生, 主要从事智能农机装备方面的研究.

通信作者: 吕强, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师.

quality. A seedling pot filling and hole punching processing line has been designed to solve these problems. The equipment consists of three parts: filling module, watering module, and hole punching module. The flow operation was carried out with eight seedling pots as a group in a transporting box. A series of devices were designed and developed, including the transporting box with seedling pot support and fast unloading function, the split-scraping device with uniform filling function, the quantitative watering device, the hole punching device, and the control system of the whole machine. The critical working process of the processing line was analyzed, and the working parameters of the prototype were optimized using the orthogonal test. The filling test was carried out with the filling volume and uniformity as the evaluation indexes. The results show that the best filling effect was achieved when the volumetric moisture content of the nutrient soil was 3%, the hoist speed was 0.25 m/s, and the discharge height was 580 mm. The watering-punching test was carried out with the hole diameter shrinkage rate, the seedling pot collapse height, and the soil settlement height as evaluation indexes. The results show that the transplanting hole-forming effect was the best when the accumulated flow of watering was 450 mL, the water infiltration time was 19 s, the head angle of the punching column was 35°, the punching speed was 200 mm/s, and the hole bottom dwell time was 2 s. Under the combination of optimal parameters, the working efficiency of the whole machine is more than 2 300 pots/h, and the effect of filling and forming holes is the best, which can meet the production demand.

Key words: citrus; factory container seedling; seedling pot; filling; punching hole; transplanting hole; orthogonal test

柑橘是我国产量第一大水果,种植面积广,苗木需求量大^[1-2]. 工厂化育苗是实现柑橘苗木大规模生产的有效途径,已得到广泛推广和应用. 相对于传统露地育苗,容器育苗病虫害少,育苗周期短,且易于精准管理,更适合工厂化培育^[3-5]. 柑橘砧木苗移栽是容器育苗过程中的重要一环,为满足营养与生长空间需求,需要将生长至一定程度的砧木苗移栽至育苗钵中培养^[6]. 早期采用苗床培育裸根砧木苗,向育苗钵移栽时操作复杂且优苗率较低. 对于大规模工厂化容器育苗,通常采用穴盘或苗杯培育带基质砧木苗,不仅在培育时易于管理、长势更好,移栽时操作也更简单,移栽后成活壮苗率高^[7-8]. 柑橘带基质砧木苗移栽过程中,育苗钵装填和移栽穴成型是工作量最大的环节,在我国仍靠人工作业完成,劳动强度大,生产效率低,且作业质量不稳定. 为提高装填成穴的效率与质量,亟需研制满足工厂化育苗的高效装填成穴设备.

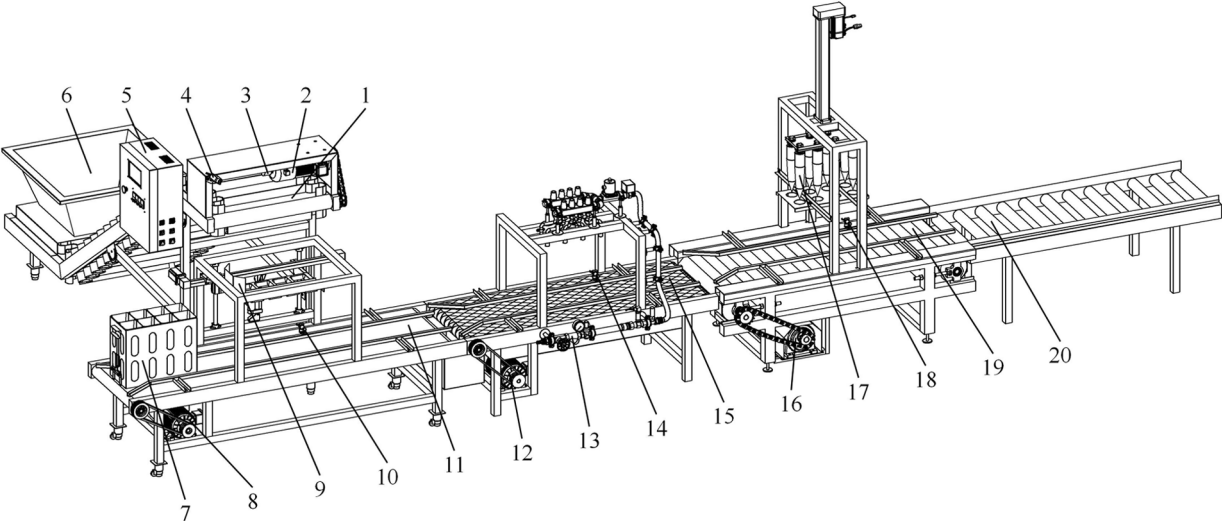
我国柑橘容器育苗常采用薄壁塑料育苗钵,具有口小、袋深、质软的特点,与蔬菜、花卉、林木容器育苗常用的硬质容器相比,其装填与成穴机械化作业难度更大;小口限制了装填流量,使进入育苗钵内的营养土动能较小,不利于紧实装填,容易产生沉降,而较大的袋深会进一步加大沉降导致的土面高度下降,因此需要设计合理卸料方式增加营养土的动能;此外,苗钵形状不规则且质地较软,在装填成穴作业时需要辅助支撑,且装填时需要采用一定的措施防止被下落的营养土压塌. 目前,国外关于硬质容器的装填成穴设备已较成熟,且部分机型实现了与后续自动移栽环节的对接^[9-12]. 德国 Mayer 公司的 TM2700、比利时 Demtec 公司的 Evo²-D、荷兰 Visser 公司的 FF Filler 等花盆装填机,均采用流水线方式作业,使用挡板提升机装填,采用旋转提斗旋土或冲穴柱冲压方式成穴^[13-14],但有关薄壁质软容器的相关设备研发未见报道. 国内对两种容器装填成穴的相关设备均有所研究,但仍处于起步阶段^[15-17]. 杭州赛得林公司的 2YB-P10 盆栽装土机和胡建平^[18]设计的温室钵苗移栽机采用流水线方式作业,适用于花盆装填与成穴;徐勤超^[19]设计的柑橘育苗钵间歇式装填转运机和张鉴^[20]设计的自走式育苗钵装填摆码机适用于柑橘育苗钵装填,没有成穴功能,且采用间歇式作业,难以满足工厂化育苗连续作业需求.

总之,现有的装填成穴设备不能满足柑橘工厂化容器育苗高效装填成穴需求. 为此,本研究设计了一种基于流水线作业方式的柑橘育苗钵装填成穴设备,确定了关键部件和控制系统设计,结合理论分析与样机正交试验,优化了整机关键参数,初步实现了柑橘育苗钵装填与移栽穴成型的自动化作业.

1 整机结构与工作原理

1.1 总体结构

柑橘育苗钵装填成穴生产线主要由装填模块、浇灌模块和冲穴模块 3 部分组成. 装填模块主要包括挡板提升机、皮带输送带、育苗钵转运框、分流-刮土装置; 浇灌模块主要包括链网输送带、供水装置; 冲穴模块主要包括链板输送带、冲穴装置. 整机具体结构如图 1 所示, 主要技术参数如表 1 所示.



1 为挡板提升机; 2, 8, 12, 16 为电机; 3 为编码器; 4 为反射式光电开关; 5 为控制箱; 6 为料斗; 7 为育苗钵转运框; 9 为分流-刮土装置; 10, 14, 18 为接近开关; 11 为皮带输送带; 13 为供水装置; 15 为链网输送带; 17 为冲穴装置; 19 为链板输送带; 20 为无动力输送带.

图 1 柑橘育苗钵装填成穴生产线结构示意图

表 1 主要技术参数

参数	数值	参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/mm	6 500×3 100×1 700	装填成穴效率/(钵·h ⁻¹)	>2 300
电机总功率/kW	2	装填均匀性变异系数/%	<1.2
转运框容量/钵	8	成穴位置偏差/mm	±3.5

1.2 工作原理

首先, 将营养土装入提升机的料斗内, 将育苗钵放入转运框隔间内. 启动生产线后, 提升机将营养土提升至上部卸料口, 触发反射式光电开关感应后停止. 然后, 各输送带将转运框输送至不同的工位进行装填、浇灌和冲穴等操作, 期间由接近开关感应转运框到位并制动输送带. 在装填工位, 分流-刮土装置下降盖住转运框, 使营养土从分流盖板的导流孔均匀地落入各育苗钵中, 并由编码器记录提升机电机的圈数来控制营养土的装填量, 部分营养土从分流盖板两侧掉落在输送皮带上. 提升机卸料完成后, 刮板刮除分流盖板上的浮土, 分流-刮土装置上升释放转运框, 落土随转运框至两输送带间隙处掉落收集. 在浇灌工位, 供水装置开启并按设定流量和总量向各育苗钵中注入水流, 使营养土浸润并增加其可塑性. 在冲穴工位, 冲穴柱先下降后上升, 在育苗钵中挤压出移栽穴. 最后, 在无动力输送带处进行带基质砧木苗移栽, 并在转运框内将育苗钵卸载后放入空苗钵, 进行下一轮作业.

2 关键部件设计与分析

2.1 装填模块

2.1.1 转运框设计

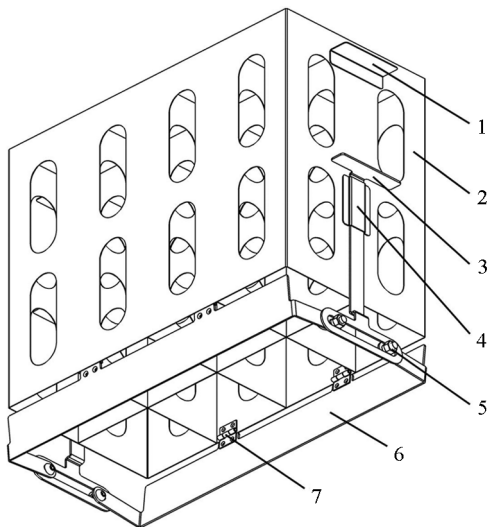
转运框是装填成穴生产线的关键部件之一, 用于装填成穴过程中对薄壁塑料育苗钵的支撑, 以及在完成装填成穴与后续砧木苗移入后, 实现育苗钵的卸载. 育苗钵的放置和卸载由转运框卸料机构实现, 该机构的运动由滑块槽销机构实现, 卸料机构如图 2 所示. 装入育苗钵时, 动提手移至最上端位置, 翻板旋转至水平位置, 处于放置状态, 装入育苗钵后抓握动提手搬运转运框. 卸载育苗钵时, 使用静提手提起转运

框, 翻板在重力作用下旋转至竖直位置, 处于卸载状态, 释放育苗钵, 同时动提手滑落至最下端位置。

为确定卸料机构参数, 对滑块槽销机构进行运动分析, 滑块槽销机构运动简图、机构位置示意如图 3 所示。根据滑块槽销机构中动提手和翻板的空间位置要求, 确定动提手竖直移动范围 $h < 120\text{ mm}$, D, E 两点间距 $k = 206\text{ mm}$, 放置或卸载状态下摇杆 DB 水平投影长度 $l > 51\text{ mm}$, 两摇杆轨迹最近间距 $n > 30\text{ mm}$; 摇杆 BD 与固连的翻板 DI 夹角 $\angle IDB = 45^\circ$, 摇杆 BD 的轨迹极限转动夹角 $\angle BDB' = 90^\circ$, 且由此可得 $\angle BDI' = 90^\circ$ 。为确定摇杆长度 p 和滑槽长度 q 的取值, 由图 3b, 可得几何关系如式(1)所示。

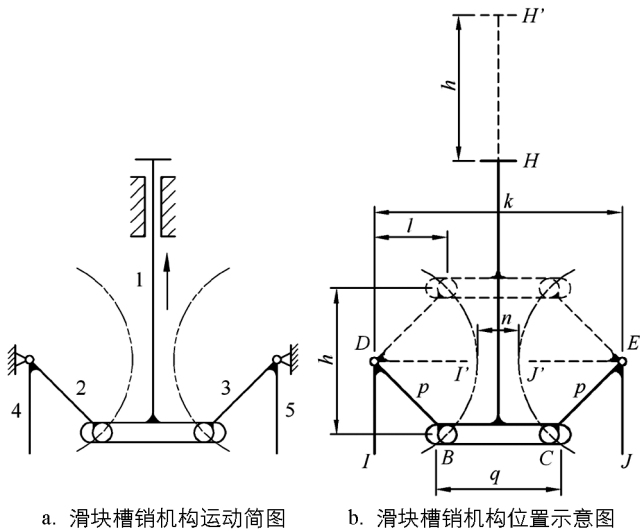
$$\begin{cases} l = p \cdot \cos \angle BDI' \\ k = 2p + n \\ h = 2p \cdot \sin \angle BDI' \\ q \geq k - 2l \end{cases} \quad (1)$$

将已知量带入式(1)计算得 $72.1\text{ mm} < p < 84.9\text{ mm}$, $q > 92.9\text{ mm}$, 取 $p = 80\text{ mm}$, $q = 95\text{ mm}$, 即摇杆长度为 80 mm , 滑槽长度为 95 mm 。



1 为静提手; 2 为转运框主体; 3 为动提手; 4 为动提手约束扣; 5 为销轴; 6 为翻板; 7 为合页。

图 2 转运框卸料机构图

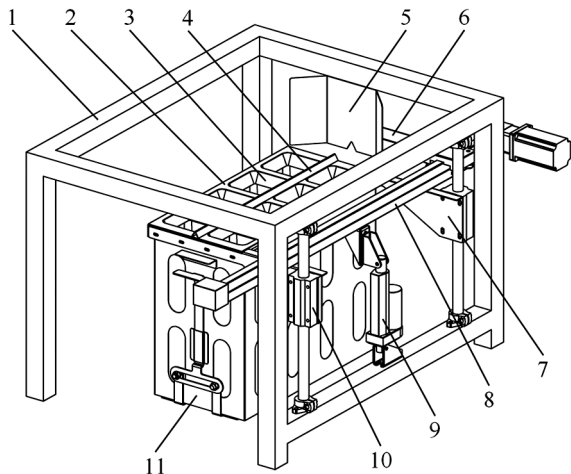


1 为动提手; 2, 3 为摇杆; 4, 5 为翻板。

图 3 滑块槽销机构图

2.1.2 分流-刮土装置设计

提升机卸料过程中, 分流-刮土装置能确保转运框内各育苗钵中装填量均匀一致, 同时保护育苗钵不被落下的营养土压塌; 卸料结束后, 能实现分流盖板上方堆积营养土的刮除, 以免其在分流盖板升起时落入育苗钵影响装填效果。分流-刮土装置结构示意图如图 4 所示, 包括刮板机构和升降机构两部分。刮板机构主要由刮土板、刮土板支架和直线模组组成, 直线模组的滑台与刮土板支架固连, 带动刮土板做直线运动, 实现刮土功能; 刮土板俯视图呈“U”形, 开口一侧朝向浮土, 在刮土过程中具有聚拢作用, 确保将浮土顺利刮至前方, 减少在转运框两侧的泄漏。升降机构主要由分流盖板、分流盖板支架、直线导轨、刮板机构、直线模组和电动推杆组成, 分流盖板支架同时与直线导轨的滑块和直线模组的导轨固连, 直线模组的导



1 为机架; 2 为分流盖板; 3 为导流孔; 4 为倒“V”形梁; 5 为刮土板; 6 为刮土板支架; 7 为分流盖板支架; 8 为直线模组; 9 为电动推杆; 10 为直线导轨; 11 为育苗钵转运框。

图 4 分流-刮土装置结构示意图

轨中部与电动推杆的输出杆固连,使电动推杆带动分流-刮土装置整体升降。

装填前,分流盖板下降盖住转运框中的育苗钵,其上呈 2×4 排列的倒四棱台形导流孔深入育苗钵内部,保护育苗钵不被压塌;装填过程中,分流盖板的导流孔和倒“V”形梁将下落的营养土流均匀分流落入 8 个育苗钵,实现均匀装填;装填和刮土结束后,分流盖板上升,释放转运框。

2.2 浇灌模块

2.2.1 供水装置设计

供水装置以设定的流量与总量对转运框内 8 个育苗钵均匀浇灌,原理示意如图 5 所示。浇灌作业时,控制器打开电磁阀,水流依次流经手动阀门、过滤器、稳压阀、流量计、水锤消除器、电动阀和电磁阀,进入分水器,经分水器各出水口均匀流入下方转运框内的育苗钵,各出水口水流大小由分水器上对应旋钮调节。经实测,调节后各流量下 8 个出水口出水量的变异系数均小于 1.3%,满足均匀性要求。浇灌过程中,控制器由流量计获取脉冲信号实时计算当前流量与总量,用 PID 算法调节电动球阀的开度,保持浇灌流量在目标值位置稳定,待总量到达设定值后关闭电磁阀,完成浇灌作业。

2.2.2 浇灌过程分析

浇灌工序以定流量与总量方式浇灌,由于水流在营养土中浸润速度有限,为保证浇灌工序效率与整机效率匹配,同时避免浇灌时水流溢出育苗钵,并确保浇灌后水流浸润时间足够,对浇灌过程进行分析,如图 6 所示。作业时,链网输送带带动转运框进入浇灌工位进行定量浇灌,此时上一转运框处于静置位置;浇灌完成后,链网输送带带动转运框到达静置位置,同时上一转运框脱离链网输送带进入下一工序,下一转运框进入浇灌工位。

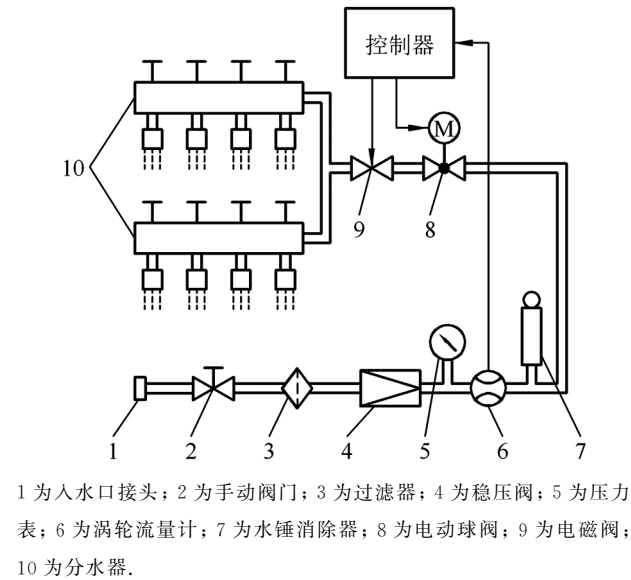


图 5 供水装置原理示意图

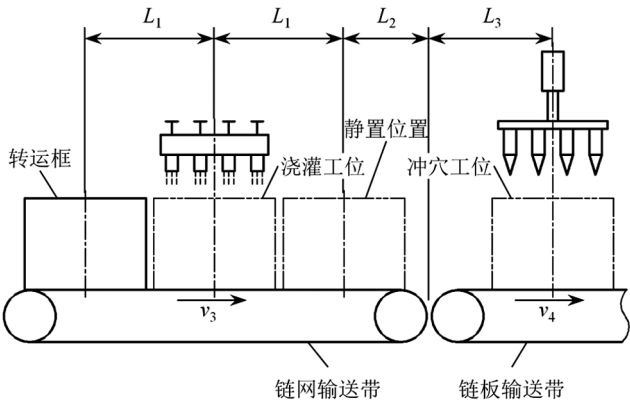


图 6 浇灌工序分析

对浇灌工序效率进行分析,设装填工序效率为 η_1 ,为保证整机效率匹配,浇灌工序效率 η_2 的计算公式如式(2)所示。

$$\begin{cases} \eta_2 = 3\,600 \frac{n}{t_2} \geq \eta_1 \\ t_2 = \frac{L_1}{v_3} + \frac{60 \cdot S}{1\,000 \cdot Q} \end{cases} \quad (2)$$

其中 n 为转运框容量,设计为 8 钵; t_2 为浇灌工序单框耗时,单位为 s; L_1 为转运框入位位移,取 $L_1 = 0.48$ m; v_3 为链网输送带速度,取 $v_3 = 0.15$ m/s; S 为浇灌总量,单位为 mL; Q 为浇灌流量,单位为 L/min。

由上式可知,为提升浇灌效率,需要在保证成穴效果的前提下尽量减小浇灌总量 S ,同时采用不至于溢出的最大浇灌流量 Q 。经试验,对于体积含水率 3% 的营养土,浇灌量大于 400 mL 时成穴基本稳定,同时考虑浇灌效率限制,由上述分析确定浇灌总量 S 范围为 400~500 mL,对应最大浇灌流量 Q 范围为 3.5~2.6 L/min。

对浇灌后水流浸润时间进行分析,浸润时间 t_3 由到达静置位置时下一转运框的浇灌工序耗时、脱离静置位置时间和进入冲孔工位时间 3 部分组成,计算公式如式(3)所示。

$$t_3 = t_2 + \frac{L_2}{v_3} + \frac{L_3}{v_4} \quad (3)$$

其中 L_2 为链网输送带静置位置后段距离,单位为 m; L_3 为链板输送带冲孔工位前段距离,单位为 m; v_4 为链板输送带速度,取 $v_4 = 0.15$ m/s。

已知所需浸润时间时,可根据上式确定所需要的 L_2 和 L_3 。为了保证静置位置的转运框在下一浇灌周期顺利进入链板输送带,同时避免过早进入链板输送带(即保证静置位置处于链网输送带上), L_2 还应满足关系如式(4)所示。

$$\frac{L_1}{2} \leq L_2 \leq L_1 \quad (4)$$

2.3 冲孔模块

2.3.1 冲孔装置设计

冲孔装置能同时对转运框内 8 个育苗钵中营养土冲孔,主要由伺服电动缸、冲孔柱和挡板组成,结构示意图如图 7 所示。冲孔柱通过安装板与电动缸输出杆连接,挡板由安装杆固连于机架,能在一定范围上下调节。冲孔柱侧面外形需要与砧木苗杯内腔相配合,本研究基于已研发的砧木苗杯生产的带基质砧木苗根土形状与尺寸^[21],设计冲孔柱外形为上部圆柱形、中部圆台形、下部圆锥形。冲孔时,伺服电动缸带动冲孔柱升降,冲孔柱下降时,营养土受挤压形成移栽穴;上升时,冲孔柱与营养土间未释放的压力产生的摩擦力会带出育苗钵,此时由挡板阻止育苗钵被带出。

2.3.2 冲孔过程分析

对冲孔柱入土过程分析,如图 8a 所示,锥尖为主要触土部位,其角度 α_1 直接影响对孔穴侧壁和底部营养土的压缩程度,压缩过小时穴壁不稳定,压缩过大时营养土过于紧实,不利于苗木生长^[22],因此需试验研究合适的冲孔柱锥尖角度 α_1 ;根据带基质砧木苗根土外形尺寸, α_1 应在 35° 以上。同时,入土过程中成穴尺寸与冲孔柱入土深度 h 相关,理想孔穴直径 d_2 计算公式如式(5)所示。

$$d_2 = d_1 + 2h \tan \frac{\alpha_2}{2} \quad (5)$$

其中 d_1 为冲孔柱小径,取 $d_1 = 44$ mm; α_2 为冲孔柱侧面角度,取 $\alpha_2 = 4.4^\circ$ 。

冲孔结束冲孔柱上升时,孔穴内腔压力释放,直径会收缩,同时完成冲孔后的育苗钵会变形,钵内营养土会沉降,如图 8b 所示。孔穴直径收缩过多会导致带基质苗无法正常移入,采用孔径收缩率 R_s 表征收缩程度,计算公式如式(6)所示。

$$R_s = \left(1 - \frac{D_a}{D_t}\right) \times 100\% \quad (6)$$

其中 D_a 为冲孔后实际孔穴直径,单位为 mm; D_t 为冲孔后理想孔穴直径,单位为 mm。

冲孔结束后, d_2 取值为 D_t , h 取值为孔穴有效深度 h_e ,带入式(5),与式(6)联立得式(7)。

$$R_s = \left(1 - \frac{D_a}{d_1 + 2h_e \tan \frac{\alpha_2}{2}}\right) \times 100\% \quad (7)$$

浇灌与冲孔两过程都会导致育苗钵的形变和营养土的沉降,分别由育苗钵塌陷高度 h_c 和营养土沉降高

度 h_s 表征, 计算公式如式(8)所示.

$$\begin{cases} h_c = h_3 - h_1 \\ h_s = h_4 - h_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中 h_1 为浇灌前育苗钵与隔间上边沿间距, 单位为 mm; h_2 为浇灌前土面与隔间上边沿间距, 单位为 mm; h_3 为冲穴后育苗钵与隔间上边沿间距, 单位为 mm; h_4 为冲穴后土面与隔间上边沿间距, 单位为 mm.

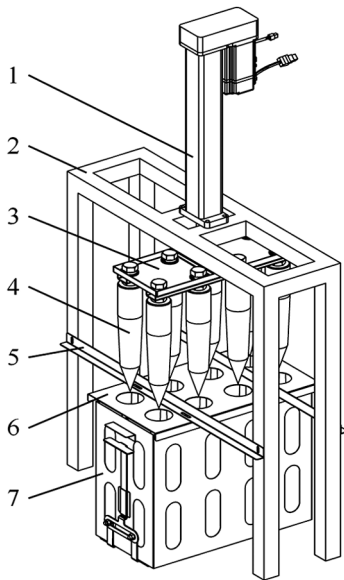
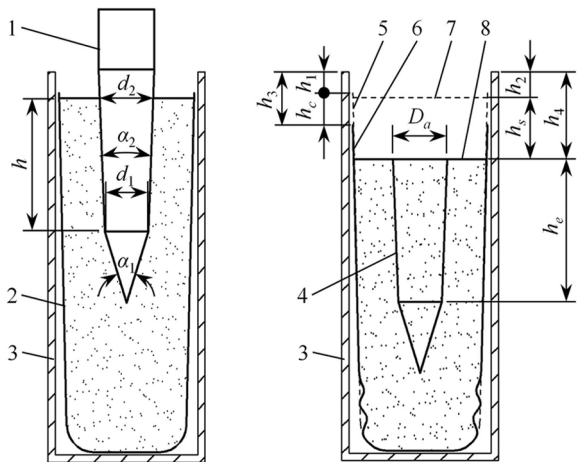


图 7 冲穴装置结构示意图

1 为伺服电动缸; 2 为机架; 3 为安装板; 4 为冲穴柱; 5 为安装杆; 6 为挡板; 7 为转运框.



a. 冲穴柱入土过程分析 b. 育苗钵变形与营养土沉降分析

1 为冲穴柱; 2 为育苗钵; 3 为转运框隔间; 4 为移栽孔穴; 5 为未变形育苗钵(虚线); 6 为变形后育苗钵; 7 为浇灌前土面位置; 8 为冲穴后土面位置.

图 8 冲穴过程分析示意图

2.4 控制系统

控制系统包括硬件和软件部分, 硬件部分主要由 STM32 控制器、传感器、驱动器、变频调速器、串口屏等组成, 如图 9 所示. 工作时, 整机按程序运行, 实现各模块相应功能, 同时串口屏显示工作数据, 且运行过程中能通过串口屏设置运行参数. 软件部分采用 freeRTOS 系统, 对装填、浇灌、冲穴、数据交互等 4 个子任务进行调度, 保证各模块工作的实时性.

3 样机试验

根据设计结果加工并装配了柑橘育苗钵装填成穴生产线试验样机, 如图 10a 所示. 试验采用规格为 10.5 cm×34 cm(口径×高)、厚度为 0.5 mm 的塑料育苗钵. 试验营养土为草炭营养土, 按草炭: 谷壳: 河沙体积比 1:1:1 混拌而成^[23-24].

3.1 育苗钵装填试验

3.1.1 试验评价指标

装填时, 育苗钵装填量越大越好, 各营养钵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的质量的影响, 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 计算公式如式(9)所示.

$$\begin{cases} m_e = \frac{m_a}{(1+W)} \\ m_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n m_k \end{cases} \quad (9)$$

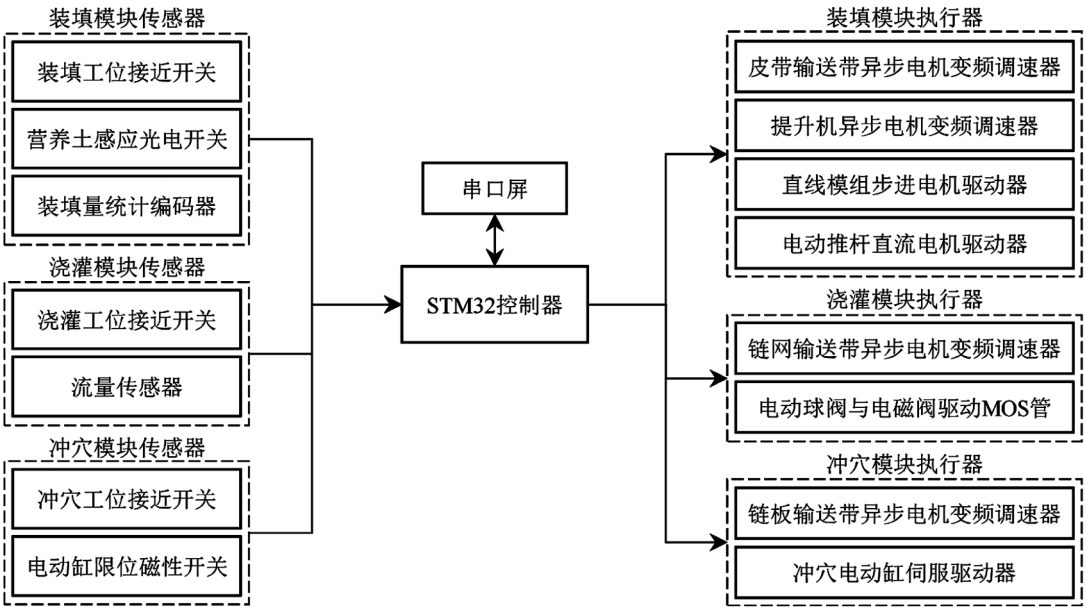


图 9 控制系统硬件组成

其中 W 为营养土重量含水率, 单位为 %; m_a 为平均装填量, 单位为 g; m_k 为同组试验内第 k 号育苗钵内装填量, 单位为 g; n 为同组试验育苗钵总数. 装填量相对极差 R_r 计算公式如式(10)所示.

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

(10)

其中 $m_{\max}$ 为同组试验内育苗钵最大装填量, 单位为 g; $m_{\min}$ 为同组试验内育苗钵最小装填量, 单位为 g.



图 10 柑橘育苗钵装填成穴生产线样机试验

3. 1. 2 试验因素及方案

选取营养土含水率、提升机速度、卸料高度作为试验因素, 其中含水率采用体积含水率, 使用 HM-

WSYP 土壤水分测定仪快速测量. 对各因素水平编码如表 2 所示, 其中体积含水率各水平对应质量含水率 W 由烘干法^[25]测定, 分别为 6.58%, 16.68%, 29.84%. 采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验方案, 每组试验重复装填 5 次, 每次装填单框 8 个育苗钵, 因此每组试验包含 40 个育苗钵, 即式(9)中 n 取值为 40.

表 2 装填试验因素与水平

水平	营养土含水率(A)/%	提升机速度(B)/(m·s ⁻¹)	卸料高度(C)/mm
1	3	0.15	480
2	6	0.20	530
3	9	0.25	580

3.1.3 试验结果与分析

各评价指标测量计算结果与极差分析如表 3 所示, 用 SPSS 26.0 软件对试验数据做方差分析, 结果如表 4 所示. 结合表 3 和表 4 可知, 营养土含水率对等效平均装填量 m_e 影响极显著, 卸料高度对 m_e 影响显著, 各因素影响主次为 A, C, B, 最优组合为 $A_1B_3C_3$; 营养土含水率、卸料高度对装填量相对极差 R_r 影响显著, 各因素影响主次为 C, A, B, 最优组合为 $A_1B_3C_3$. 由于各因素对各指标影响的最优组合相同, 因此选取营养土含水率 3%、提升机速度 0.25 m/s、卸料高度 580 mm 为最优参数组合. 最优组合下, 实测装填工序单框平均耗时 12.4 s, 因此装填工序最大效率 η_1 约为 2 322 钵/h.

营养土含水率增加时, 装填量减小, 装填均匀性变差. 因为含水率越大, 干质量占比越小, 同时营养土结团越严重, 孔隙度越大, 使得干质量进一步减小; 并且孔隙在各育苗钵内生成随机, 孔隙越多时各钵内分布越不均匀, 导致装填均匀性越差. 同时, 含水率越大附着于分流盖板上的营养土越多, 对下落营养土阻力越大, 装填紧实程度降低; 而盖板各导流孔处附着量不一致, 进一步加剧落入各钵内营养土的不均匀性; 但过低的含水率会导致营养土卸料过程中扬尘过大, 作业环境恶劣.

表 3 装填试验结果与极差分析

试验号	A/%	B/(m·s ⁻¹)	C/mm	m_e/g	$R_r/\%$
1	3	0.15	480	1 573	7.93
2	3	0.20	530	1 602	5.91
3	3	0.25	580	1 624	3.75
4	6	0.15	530	1 428	6.24
5	6	0.20	580	1 445	6.82
6	6	0.25	480	1 413	8.86
7	9	0.15	580	1 325	6.51
8	9	0.20	480	1 291	11.10
9	9	0.25	530	1 309	7.65
m_e	k_1	1 600	1 442	1 425	
	k_2	1 428	1 446	1 446	
	k_3	1 308	1 448	1 465	
	R	291	6	39	
R_r	k_1	5.86	6.89	9.30	
	k_2	7.31	7.94	6.60	
	k_3	8.42	6.75	5.69	
	R	2.56	1.19	3.60	

注: A,B,C 分别为营养土含水率、提升机速度、卸料高度; m_e 为等效平均装填量, R_r 为装填量相对极差.

表 4 装填试验方差分析

指标	来源	平方和	自由度	均方和	F 值	p 值
m_e	A	128 596.22	2	64 298.11	2 666.74	0.000 4 **
	B	67.56	2	33.78	1.40	0.417 0
	C	2 284.22	2	1 142.11	47.37	0.021 0 *
	误差	48.22	2	24.11		
	总和	130 996.22	8			
R_r	A	9.86	2	4.93	29.51	0.032 8 *
	B	2.54	2	1.27	7.60	0.116 3
	C	21.08	2	10.54	63.10	0.015 6 *
	误差	0.33	2	0.17		
	总和	33.81	8			

注: ** 表示极显著($p<0.01$), * 表示差异显著($p<0.05$).

卸料高度增加时,装填量变大,装填均匀性变好.因为卸料高度越高,营养土颗粒末端动能越大,装填越紧实;同时,卸料高度越高,末端营养土散开程度越大,分流盖板的倒“V”形梁与营养土层中性面颗粒落点对齐度越好,转运框前后两排装填越均匀.但卸料高度过高也会导致提升机尺寸过大,制造成本与使用能耗都相应增加.

3.2 浇灌-冲穴试验

由于浇灌后水分浸润是一个渐变过程,难以直接观察与测量,但对后续冲穴过程有较大影响,可以通过冲穴效果来评价.因此,本研究采用浇灌-冲穴联合试验.

3.2.1 试验评价指标

成穴过程中,钵内营养土被压缩,过于紧实透气透水性差,不利于根系生长;而过于疏松会造成营养土在后期进一步沉降,也不利于植物根系生长与固定.结合前文分析,本研究选取孔径收缩率 R_s 、育苗钵塌陷高度 h_c 、营养土沉降高度 h_s 、穴壁孔隙度 P_w 和穴底孔隙度 P_b 作为试验评价指标.

孔径收缩率 R_s 按式(7)计算,孔穴直径 D_a 和有效深度 h_e 的测量采用较轻的塑料尺,以尽量减小对营养土的干扰,并测量两个方向取均值^[26],如图 10e 所示.育苗钵塌陷高度 h_c 和营养土沉降高度 h_s 的测量与计算参照式(8).穴壁孔隙度 P_w 和穴底孔隙度 P_b 根据相关文献测量与计算^[27],使用规格为 $\varphi 24\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ (外径 $\times$ 壁厚 $\times$ 长度)的自制小环刀采样,如图 10f 所示.

3.2.2 试验因素及方案

由前文分析,并考虑冲穴速度(冲穴柱下降速度)对营养土压缩程度的影响,以及孔穴定型时间对孔穴内腔稳定程度的影响,选取单个育苗钵浇灌总量、浸润时间、冲穴柱锥尖角度、冲穴速度、穴底停留时间作为试验因素.结合前文分析和前期单因素预试验研究,确定各因素水平编码如表 5 所示,其中浇灌总量各水平对应浇灌流量为 3.5 L/min, 3.0 L/min, 2.6 L/min.使用装填试验优选的体积含水率为 3%的营养土进行试验,试验中保持冲穴柱初始高度一致,每次试验冲穴柱行程均为 270 mm.采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表设计试验方案,每组试验重复 3 次,取均值作为试验结果.

表 5 浇灌-冲穴试验因素与水平

水平	浇灌总量(A)/	浸润时间(B)/	冲穴柱锥尖角度(C)/	冲穴速度(D)/	穴底停留时间(E)/
	mL	s	°	(mm·s ⁻¹)	s
1	400	13	35	120	1
2	450	16	50	160	2
3	500	19	65	200	3

3.2.3 试验结果与分析

各评价指标测量计算结果与极差分析如表 6 所示, 试验数据方差分析结果如表 7 所示. 由表 6 可知, 所有试验组的穴壁孔隙度 P_w 和穴底孔隙度 P_b 均在 54%~94% 范围内, 能够满足柑橘砧木苗的栽培需要^[28], 因此不对其进行极差与方差分析, 且穴壁孔隙度 P_w 总体小于穴底孔隙度 P_b , 说明冲穴过程对穴壁的压缩作用大于穴底. 结合表 6 和表 7 可知, 浇灌总量对孔径收缩率 R_s 影响极显著, 浸润时间和穴底停留时间对 R_s 影响显著, 各因素影响主次为 A, E, B, D, C, 最优组合为 $A_1B_3C_3D_2E_2$; 浇灌总量对育苗钵塌陷高度 h_c 影响显著, 冲穴柱锥尖角度对 h_c 影响极显著, 各因素影响主次为 C, A, D, B, E, 最优组合为 $A_2B_2C_1D_3E_3$; 冲穴柱锥尖角度对营养土沉降高度 h_s 影响极显著, 各因素影响主次为 C, D, A, E, B, 最优组合为 $A_2B_3C_1D_3E_1$.

表 6 浇灌-冲穴试验结果与极差分析

试验号	A/ mL	B/ s	C/ °	D/ (mm · s ⁻¹)	E/ s	R_s / %	h_c / mm	h_s / mm	P_w / %	P_b / %
1	400	13	35	120	1	9.53	17.9	34.2	55.86	60.06
2	400	16	50	160	2	10.63	22.8	44.5	60.09	61.69
3	400	19	65	200	3	9.27	25.4	45.8	59.28	62.71
4	450	13	35	160	2	9.07	17.5	40.3	59.07	61.72
5	450	16	50	200	3	14.89	10.7	41.2	56.82	61.10
6	450	19	65	120	1	11.97	28.7	48.2	59.71	63.11
7	500	13	50	120	3	12.48	17.8	41.5	57.54	62.89
8	500	16	65	160	1	13.87	23.9	52.3	61.37	60.51
9	500	19	35	200	2	10.01	11.8	37.5	62.07	62.39
10	400	13	65	200	2	7.57	27.3	49.8	61.66	61.66
11	400	16	35	120	3	10.49	22.3	40.8	58.00	61.34
12	400	19	50	160	1	9.20	23.3	44.0	58.11	60.49
13	450	13	50	200	1	17.01	12.5	38.2	62.36	61.88
14	450	16	65	120	2	13.25	18.8	45.0	60.91	63.78
15	450	19	35	160	3	12.17	12.3	36.7	56.88	58.48
16	500	13	65	160	3	10.96	25.5	54.0	60.62	60.27
17	500	16	35	200	1	16.80	8.1	34.8	60.86	59.26
18	500	19	50	120	2	10.49	19.6	40.8	61.61	60.51
R_s	k_1	9.45	11.10	11.35	11.37	13.06				
	k_2	13.06	13.32	12.45	10.98	10.17				
	k_3	12.44	10.52	11.15	12.59	11.71				
	R	3.61	2.80	1.30	1.61	2.89				
h_c	k_1	23.2	19.8	15.0	20.8	19.1				
	k_2	16.7	17.8	17.8	20.9	19.6				
	k_3	17.8	20.2	24.9	15.9	19.0				
	R	6.4	2.4	9.9	4.9	0.6				
h_s	k_1	43.19	43.00	37.39	41.75	41.95				
	k_2	41.59	43.11	41.70	45.31	43.00				
	k_3	43.50	42.17	49.19	41.22	43.33				
	R	1.91	0.94	11.81	4.08	1.39				

注: A,B,C,D,E 分别为浇灌总量、浸润时间、冲穴柱锥尖角度、冲穴速度、穴底停留时间; R_s 为孔径收缩率、 h_c 为育苗钵塌陷高度、 h_s 为营养土沉降高度、 P_w 为穴壁孔隙度、 P_b 为穴底孔隙度.

表 7 浇灌-冲穴试验方差分析

指标	来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i> 值	<i>p</i> 值
R_s	A	44.71	2	22.36	15.36	0.002 8**
	B	26.24	2	13.12	9.02	0.011 6*
	C	5.91	2	2.95	2.03	0.201 7
	D	8.46	2	4.23	2.91	0.120 5
	E	25.15	2	12.57	8.64	0.012 9*
	误差	10.19	7	1.46		
	总和	120.66	17			
h_c	A	142.44	2	71.22	7.20	0.020 0*
	B	19.92	2	9.96	1.01	0.412 6
	C	315.93	2	157.97	15.97	0.002 5**
	D	96.04	2	48.02	4.86	0.047 6
	E	1.45	2	0.73	0.07	0.929 9
	误差	69.23	7	9.89		
	总和	7 303.60	18			
h_s	A	12.68	2	6.34	0.95	0.430 2
	B	3.19	2	1.60	0.24	0.792 7
	C	428.26	2	214.13	32.21	0.000 3**
	D	59.18	2	29.59	4.45	0.056 6
	E	6.30	2	3.15	0.47	0.641 3
	误差	46.54	7	6.65		
	总和	556.15	17			

对各因素以减小孔径收缩率 R_s 、育苗钵塌陷高度 h_c 和营养土沉降高度 h_s 为目标进行优化. 浇灌总量对 R_s 和 h_c 均影响显著, 主要考虑减小育苗钵塌陷, 且浇灌量越大成穴效果越好, 浇灌总量应为 450 mL; 浸润时间对 R_s 影响显著, 选取为 19 s; 冲穴柱锥尖角度对 h_c 和 h_s 均影响显著, 且最优组合一致, 因此选取为 35°; 冲穴速度对所有指标均无显著影响, 为尽量提高作业效率, 选取为 200 mm/s; 穴底停留时间对 R_s 影响显著, 选取为 2 s. 综上, 选取单钵浇灌总量 450 mL(对应浇灌流量为 3.0 L/min)、浸润时间 19 s、冲穴柱锥尖角度 35°、冲穴速度 200 mm/s、穴底停留时间 2 s 为最优参数组合. 最优组合下, 由式(2)算得浇灌工序最大效率 η_2 约 2 360 钵/h, 略大于装填工序的最大效率 η_1 (2 322 钵/h); 同理算得冲穴工序最大效率 η_3 约 3 428 钵/h, 大于 η_1 . 为实现装填、浇灌、冲穴 3 个工序的效率匹配, 需以装填工序效率为基准, 降低浇灌和冲穴工序的效率. 为保证浇灌工序的浸润时间与试验值一致, 降低浇灌工序效率的方式为在浇灌开始之前增加等待时长, 降低冲穴工序效率的方式为在冲穴结束之后增加等待时长. 此外, 为保证浇灌工序浸润时间, 需确定链网、链板输送带的相关参数. 将浸润时间 19 s 和已知量带入式(3)可得 $L_2 + L_3 = 1.02$, 结合式(4), 取 L_2 为 0.27 m, L_3 为 0.75 m. 因此, 链网输送带静置位置后段距离设计为 0.27 m, 链板输送带冲穴工位前段距离设计为 0.75 m.

孔径收缩率随浇灌总量先增大后减小, 可能是营养土含水较少时, 水分对营养土颗粒间的润滑作用大于黏合作用, 导致营养土流动性随含水量增大而增大, 而含水较多时黏合作用更强, 流动性随含水量增大而减小. 同时, 浸润时间越长, 进入营养土的水分越多, 其平均含水量越大, 流动性随含水量先增大后减小的特点, 也导致孔径收缩率随浸润时间先增大再减小. 孔径收缩率随穴底停留时间先减小再增大, 可能是

停留时间太短时孔穴不足以定型,而太长时冲穴柱易与穴壁粘连,在提升过程中粘连力的水平分力导致孔穴收缩.育苗钵塌陷高度随浇灌总量先减小后增大,也可能是因为营养土流动性随含水量先增大后减小,使得冲穴柱所受阻力先减小后增大,导致其对育苗钵压缩程度相应改变.育苗钵塌陷高度和营养土沉降高度均随冲穴柱锥尖角度增大而增大,可能的原因是冲穴柱越不尖锐,冲穴柱头部对营养土作用力在竖直方向的分力越大,对营养土和育苗钵的压缩程度越大.

3.2.4 验证试验

由于正交试验表中未涉及最优参数组合,因此进行最优组合的作业效果验证试验,试验方法同前,重复 3 次,试验结果如表 8 所示.由试验结果可知,最优参数组合下,孔径收缩率为 8.98%,育苗钵塌陷高度为 16.3 mm,营养土沉降高度为 33.8 mm,穴壁和穴底孔隙度分别为 56.66%和 60.27%,均满足带基质砧木苗移栽需要.

表 8 验证试验结果

序号	$R_s/\%$	h_c/mm	h_s/mm	$P_w/\%$	$P_b/\%$
1	9.32	15.3	33.5	58.11	63.00
2	8.50	17.0	33.0	54.74	57.22
3	9.13	16.5	35.0	57.14	60.59
平均	8.98	16.3	33.8	56.66	60.27

注: R_s 为孔径收缩率、 h_c 为育苗钵塌陷高度、 h_s 为营养土沉降高度、 P_w 为穴壁孔隙度、 P_b 为穴底孔隙度.

4 结论

1) 研制了一种用于柑橘工厂化容器育苗的育苗钵装填成穴生产线,主要由装填模块、浇灌模块和冲穴模块组成,实现了育苗钵中营养土的均匀装填以及移栽穴的稳定成型.完成了生产线机械结构与控制系统的设计,分析了各模块主要工作过程,进行了参数优选试验.

2) 育苗钵装填正交试验表明,装填量和装填均匀性均主要受营养土含水率和卸料高度影响.最优装填参数组合为:营养土体积含水率 3%、提升机速度 0.25 m/s、卸料高度 580 mm.浇灌-冲穴正交试验表明,移栽穴孔径收缩率主要受浇灌总量、浸润时间和穴底停留时间影响,育苗钵塌陷高度主要受浇灌总量和冲穴柱锥尖角度影响,营养土沉降高度主要受冲穴柱锥尖角度影响,穴壁和穴底孔隙度均满足砧木苗栽培需要;最优参数组合为浇灌总量 450 mL(对应浇灌流量 3.0 L/min)、浸润时间 19 s、冲穴柱锥尖角度 35°、冲穴速度 200 mm/s、穴底停留时间 2 s.

3) 最优参数组合下,整机效率大于 2 300 钵/h,且装填成穴效果好,作业过程对育苗钵保护到位,满足柑橘工厂化容器育苗的育苗钵装填与移栽穴成型在线自动化高效生产需求.

参考文献:

[1] 奎国秀,祁春节.我国柑橘产业生产贸易的变化及机遇与挑战[J].中国果树,2021(6):93-97.

[2] 邓婉珍,黄太庆,甘磊,等.地表覆盖方式对广西柑橘果园土壤水分特征的影响[J].南方农业学报,2022,53(11):3049-3057.

[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.

[4] 李霞,张贤猛,覃正柏.柑橘容器大苗繁育关键技术[J].作物研究,2019,33(S1)130-131

[5] 权银.谈谈容器育苗技术及其在柑桔上的应用[J].中国南方果树,2008,37(2):10-13.

[6] 陈小方.柑橘容器育苗技术研究[J].四川农业科技,2015(6):22-24.

[7] SALVADOR C A, FERRAREZI R S, BARRETO C V G, et al. Method to Evaluate the Efficiency of Manual Overhead Irrigation in Citrus Rootstock Liner Production[J]. Engenharia Agricola, 2016, 36(4): 724-735.

- [8] GIULIANI J C, RIETH S, SOARES W, et al. Substrates and Containers for the Citrus Rootstocks' Production Irrigated by Capillarity [J]. CIENCIA RURAL, 2014, 44(3): 446-452.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] SELVAN M M, THANKAMANI C K, ANNAMALAI S J K, et al. Design and Development of Power-Operated Continuous-Run Potting Machine for Seedling-Nursery [J]. The Indian Journal of Agricultural Sciences, 2015, 85(6): 73-76.
- [12] SIEDLACZEK U. Machine for Potting Flower Pots: US7637052 [P]. 2009-12-29.
- [13] 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.
- [14] 张赛. 自调心筑模成穴机构工艺参数优化与塌陷视觉检测研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [15] 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.
- [16] 颜秋艳, 曾亮华, 赖丽娟, 等. 工厂化育苗生产线填土装置的设计研究 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(4): 322-323, 344.
- [17] 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.
- [18] 胡建平, 张晨迪, 王留柱, 等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 149-154.
- [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.
- [20] 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.
- [21] 吕强, 王腾, 何林, 等. 一种分体式果树砧木种苗培育装置: CN214282376U [P]. 2021-09-28.
- [22] 孟宪聪. 容器苗培育过程中存在的问题及改进方法 [J]. 吉林农业, 2013(8): 66.
- [23] 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.
- [24] 宋洋, 刘冬峰, 林绍生, 等. 容器和基质配比对酸柚实生苗生长发育的影响 [J]. 中国南方果树, 2021, 50(5): 38-41.
- [25] 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, 42(10): 335-339.
- [26] QUAN W, WU M, DAI Z, et al. Design and Testing of Reverse-Rotating Soil-Taking-Type Hole-Forming Device of Pot Seedling Transplanting Machine for Rapeseed [J]. Agriculture, 2022, 12(3): 319-341.
- [27] 白岗栓, 邹超煜, 冯光惠, 等. 激光平地对河套灌区土壤水分入渗及秋浇质量的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(2): 135-146.
- [28] 李忠. 我国容器育苗中泥炭基质替代品的研究进展 [J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 51-54.

责任编辑 王新娟