

田素博, 谢天, 王鹤锦, 等. 蔬菜移栽机可调式喂苗装置设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(3): 464-472.

TIAN Subo, XIE Tian, WANG Hejin, et al. Design and experiment of adjustable seedling-feeding device for vegetable transplanting machine[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(3): 464-472.

蔬菜移栽机可调式喂苗装置设计与试验

田素博^{1,2}, 谢 天¹, 王鹤锦¹, 张雪峰¹, 张 堃¹, 白晓虎¹, 孙周平²

(1 沈阳农业大学 工程学院, 辽宁 沈阳 110866; 2 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:【目的】为扩大移栽机适用性,实现对多种规格蔬菜穴盘苗的自动取喂苗作业,本文设计了一款蔬菜移栽机可调式喂苗装置。【方法】设计了带有可调节取喂苗爪的取喂苗臂,优化了喂苗爪的相关参数,并进行了运动学分析。通过调节取喂苗臂上的取喂苗爪数量及间距,选择不同的 PLC 控制程序,可以配套使用不同穴孔数的穴盘。通过对取喂苗工作过程分析,综合考虑影响喂苗成功率的关键性因素,以苗坨含水率、穴盘苗苗高、苗针入土深度为试验参数,选取 72、105、128 穴规格的生菜穴盘苗为试验对象,进行单因素试验和多因素正交试验,探究各因素对喂苗成功率的影响。【结果】当穴盘苗基质含水率(w)为 40%、苗高为 50 mm、入土深度为 38 mm 时,可调式喂苗装置的喂苗成功率最高,72、105、128 穴生菜穴盘的喂苗成功率分别为 95.83%、96.19% 和 96.48%。【结论】可调式喂苗装置设计符合蔬菜移栽机取喂苗的技术要求,移栽效果较好,可为通用全自动蔬菜移栽机的研制与开发提供参考。

关键词: 蔬菜; 穴盘苗; 移栽机; 可调式取喂苗爪; 正交试验

中图分类号: S223.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)03-0464-09

Design and experiment of adjustable seedling-feeding device for vegetable transplanting machine

TIAN Subo^{1,2}, XIE Tian¹, WANG Hejin¹, ZHANG Xuefeng¹, ZHANG Kun¹, BAI Xiaohu¹, SUN Zhouping²

(1 College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2 Key Laboratory of Horticultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objective】In order to expand the applicability of transplanter and realize the automatic feeding of plug seedlings of various specifications of vegetables, this paper designs a universal automatic seedling-feeding device for vegetable transplanting machine. 【Method】The seedling-feeding arm with an adjustable feeding claw was designed, the key parameters were optimized and kinematic analysis was performed. Plug trays with different number of holes could be used by adjusting the number and distance of feeding claws on the seedling-feeding arm and choosing different PLC control programs. The key factors affecting the success rate of seedling feeding were comprehensively considered by analyzing the working process of seedling feeding. Taking the water content of the plug, the height of plug seedling, and the depth of seedling needle into soil as the test parameters, the plug seedlings of lettuce in 72-, 105- and 128-hole plug as the test objects, single factor experiment and multi-factor orthogonal experiment were carried out to explore the effect of different factor on the success rate of seedling feeding. 【Result】The test results showed that when the water content of plug seedling substrate was 40%, seedling height was 50 mm, and the depth of seedling needle into soil was 38 mm, the success rates of seedling feeding for adjustable seedling feeding device were the highest, and the seedling-

收稿日期: 2022-05-07 网络首发时间: 2023-03-11 10:02:00

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230310.1536.005.html>

作者简介: 田素博, 教授, 博士, 主要从事设施园艺智能装备的研制及开发, E-mail: tiansubo@syau.edu.cn; 通信作者:

孙周平, 教授, 博士, 主要从事设施蔬菜栽培与生理、设施环境调控等研究, E-mail: sunzp@syau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFD1000300)

feeding success rates of lettuce in 72-, 105- and 128-hole plug trays were 95.83%, 96.19% and 96.48%, respectively.

【Conclusion】 The design of adjustable seedling-feeding device meets the technical requirements of vegetable transplanting machine for feeding seedlings, and the transplanting effect is good, which can provide a reference for research and development of the universal automatic vegetable transplanting machine.

Key words: Vegetable; Plug seedling; Transplanting machine; Adjustable feeding claw; Orthogonal test

机械化栽植具有提高农产品产量、缩短生长周期,减少人工劳动强度等优势^[1-3]。国外移栽机械以大型化、农场式为主,目前国内移栽机械以半自动移栽机为主^[4-5]。我国蔬菜种类丰富,需要多种类适应不同穴孔数穴盘育苗移栽作业的蔬菜移栽机^[6-9],因此,设计适用于多种规格穴盘的全自动蔬菜移栽机的可调式喂苗装置具有重要意义。

严宵月等^[10]和胡建平^[11]设计了一款纯机械式整排取苗间隔投苗装置,运用 6 个凸轮控制 6 个钢丝绳驱动 6 个苗爪落苗时序,更换不同穴孔数的穴盘时需要更换凸轮。魏新华等^[12]采用伺服电机驱动直线模组控制取苗机械手在取投苗位置进行往复运动,但单个机械手取苗速度受限,很难实现快速取苗的要求。任玲等^[13]和王侨等^[14]运用两排投苗台交替运动实现无间断投苗,有效解决了投苗不连续的问题,但整排取苗手不可调,无法适用于不同穴孔数穴盘。王超等^[15]设计了一种气动下压式高速取苗装置及配套组合式穴盘,可实现 120 株/min 的高速作业,但基质破碎率较高,通用性不强。刘念聪等^[16]和文永双等^[17]提出了一种全自动单摆式取喂苗装置,确定了苗盘输送机构与苗穴的运动轨迹,实现了对穴盘苗的快速平顺移栽,但机构较大,不能满足设施农业实际生产需求。沈阳农业大学研究了一种 128 穴生菜自动喂苗装置,与日本井关 PVHR2-E18 蔬菜移栽机配套使用,结构简单,但是不适用多种穴盘^[18-20]。

目前研制的喂苗装置,在喂苗速率及成功率方面有了很大提升^[21-22]。但是适用于不同穴孔数育苗盘的可调式喂苗装置的研究较少。本文在前期研究基础上设计了一种可调式喂苗装置,通过分析取喂苗工作过程的运动轨迹和苗坨夹取时的运动学模型,完成该装置的结构设计与参数优化,最后进行田间试验验证,以期为通用全自动蔬菜移栽机的研制与开发提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

本文研制的可调式喂苗装置,主要包括取喂苗臂、取喂苗爪、水平传动部件、垂直传动部件、换盘装置、机架、电池及控制箱,如图 1 所示。整机采用

直流 48 V 电源驱动,可实现连续运行 20 h 以上。该装置可与日本井关 PVHR2-E18 蔬菜移栽机配套,栽植效率可达到 3 600 株/h。

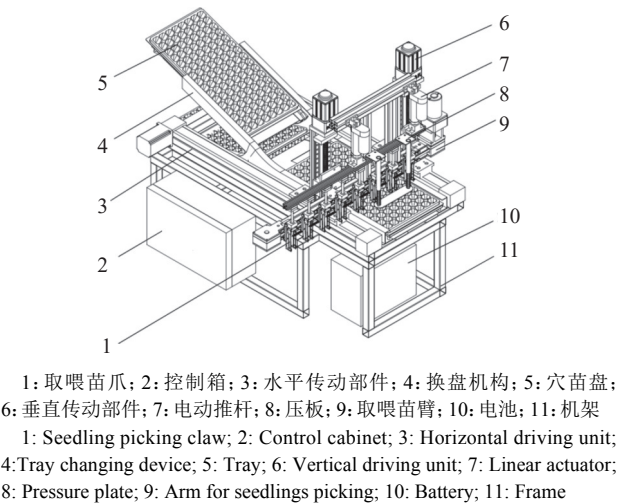


图 1 可调式喂苗装置整机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of adjustable seedling-feeding device

1.2 工作原理

可调式喂苗装置工作原理如图 2 所示,电池为整机动力源,控制系统采用西门子 PLC,通过安装在各位置的传感器接收信号并反馈至控制系统控制每台电机的启动、停止及正反转,以实现取喂苗臂的精确定位和取喂苗爪的精准取喂苗作业。

该机工作过程可分为 8 个步骤:开始工作前先进行复位,水平传动部件和垂直传动部件带动取喂苗臂运动至投苗杯正上方,电动推杆缩回,即 A 位置;水平传动部件带动取喂苗臂运动到穴盘第 1 排穴盘孔的正上方,即 B 位置;竖传动部件带动取喂苗臂下降至取喂苗爪爪针距离穴盘高度 10 mm 处,即 C 位置;电动推杆伸出推动取喂苗爪苗针下降合拢抓取苗坨;垂直传动部件上升回到 B 位置;水平传动部件前进,取喂苗臂回到 A 位置,在此过程中取喂苗臂上的 8 个取喂苗爪运动到对应苗杯上方实现等距展开;竖传动部件下降,电动推杆缩回使取喂苗爪苗针上升,苗坨投入到对应的投苗杯当中,完成投苗;8 个取喂苗爪收拢,竖传动部件上升,回到复位 A 状态,完成一次取喂苗作业。然后水平传动

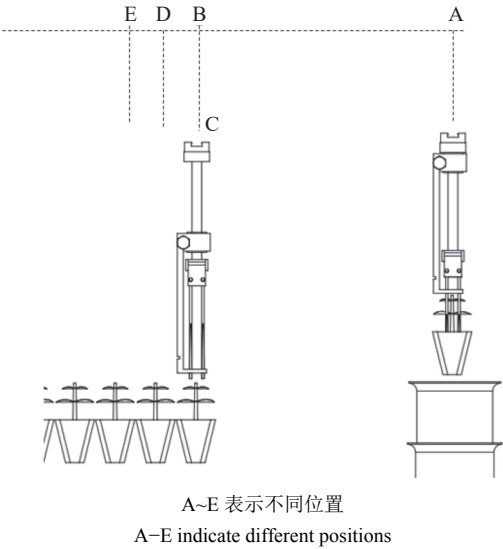


图 2 可调式喂苗装置工作过程图

Fig. 2 Working process diagram of adjustable seedling feeding device

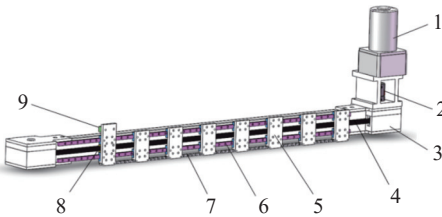
部件依次运动至苗盘穴盘孔的第 2 排、第 3 排、直至最后一排正上方，完成整盘穴盘苗的取喂苗作业，通过换盘机构更换穴盘进行不间断连续移栽。

2 关键部件设计

2.1 取喂苗臂设计

取喂苗臂由步进电机、联轴器、带轮箱、齿形带、安装板、导轨、滚子链、固定块和传感器感应元件组成，如图 3 所示。8 个取喂苗爪通过安装板固定在滑块上且可在取喂苗臂上往复滑动，最外侧的安装板通过固定块和齿形带连接，并安装有传感器感应元件，8 个安装板通过滚子链连接在一起，电机使齿形带运动可以实现取喂苗爪的分合。

当取喂苗爪散开时，左侧第 1 个取喂苗爪随齿形带水平向左移动，其余取喂苗爪在滚子链拉动下均匀散开，当传感器感应元件触碰到限位开关时步进电机停止工作，完成分散过程；当取喂苗爪合拢



1: 步进电机; 2: 联轴器; 3: 带轮箱; 4: 齿形带; 5: 安装板; 6: 导轨; 7: 滚子链; 8: 固定板; 9: 传感器感应元件
1: Stepper motor; 2: Coupling; 3: Belt wheel box; 4: Cog belt; 5: Mounting plate; 6: Guide rail; 7: Roller chain; 8: Fixed block; 9: Sensor-sensing element

图 3 取喂苗臂结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of seedling-feeding arm structure

时，步进电机带动齿形带转动，最左边取喂苗爪向右移动，推动其余取喂苗爪向右运动，当传感器感应元件触碰到限位开关时直流电机停止工作，完成合拢过程。

取喂苗爪水平开合通过梯形齿形带实现，则同步带直线模组平均移动速度 (v) 为:

$$v = \frac{L_S}{t}, \tag{1}$$

$$P_L = \frac{Fv}{1\,000\eta}, \tag{2}$$

$$P_{\text{同}} \geq K_A P_L, \tag{3}$$

$$n = \frac{60v}{\pi d}, \tag{4}$$

式中， L_S 为取喂苗爪最大位移，为 371 mm； t 为电机运行时间，设运行时间约为 1 s，其中，电机启动和停止时间均为 0.25 s； P_L 为负载功率，kW； F 为水平传动同步带直线模组总牵引力，通过拉力计测量最大为 20 N； η 为带传动效率，取 0.98； $P_{\text{同}}$ 为同步带设计功率，kW； K_A 为工况系数，取 2； n 为同步带带轮转速，r/min； d 为带轮直径，按照设计尺寸要求查询《现代机械设计手册机械—传动设计》^[23] 表 1-104 选择带轮直径为 45.48 mm，即 0.046 m。计算得 $n=307.2$ r/min。

根据 $P_{\text{同}}=0.037$ kW 和 $n=307.2$ r/min，并查阅《现代机械设计手册机械—传动设计》^[23] 选取“L”型带，则：

$$P_0 = \frac{(F_a - mv^2)v}{1\,000}, \tag{5}$$

$$b_s \geq b_{s0}^{1.14} \sqrt{\frac{P_d}{K_Z P_0}}, \tag{6}$$

$$P_r = K_Z K_w P_0, \tag{7}$$

$$K_w = \left(\frac{b_s}{b_{s0}}\right)^{1.14} = 1, \tag{8}$$

式中， P_0 为基准额定功率，kW； F_a 为带宽为 b_{s0} 的许用工作拉力，N； m 为带宽为 b_{s0} 的单位长度质量，kg/m； b_s 为最小带宽，mm； b_{s0} 为同步带基准宽度，取 25.4 mm； K_Z 为啮合齿轮系数，取 1。解得同步带的最小带宽 $b_s=6.4$ mm； P_r 为同步带额定功率，kW； K_Z 为啮合齿轮系数，取 1； K_w 为带宽系数，根据式 (8) 解得 $K_w = 1$ ， $P_r=0.18$ kW，最终确定同步带的型号为 700 L 100。

2.2 取喂苗爪设计

2.2.1 取苗夹持受力分析 取喂苗爪的爪针在抓取

苗坨时既要有一定的刚性来抓紧苗坨,又要有一定的弹性保证苗坨不被破坏。取喂苗爪执行取苗动作时,2组4根苗针以一定角度插入穴盘苗苗坨,当苗针插入到一定深度后,以 α 角度夹持钵体,在取喂苗臂带动下将苗坨从穴盘孔穴中取出,如图4a所示,取喂苗爪取苗时钵体受力分析简化如图4b所示。

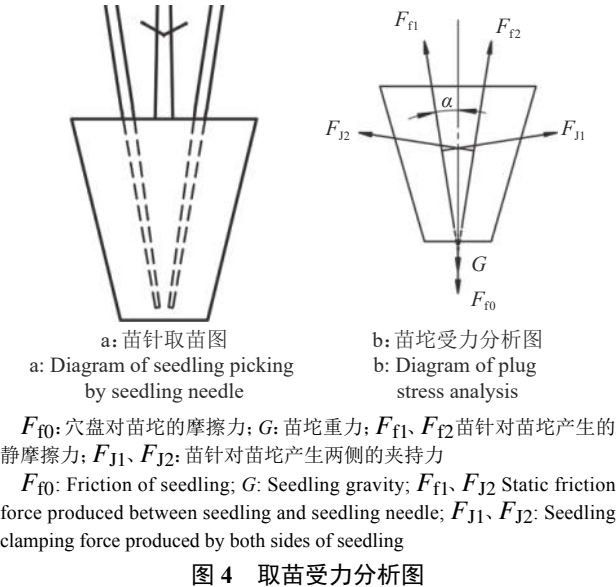


图4 取苗受力分析图
Fig. 4 Stress analysis diagram of seedling picking

当成功取苗时,有

$$F_L = F_{f0} + G = (F_{f1} + F_{f2}) \cos \alpha + (F_{J1} + F_{J2}) \sin \alpha, \quad (9)$$

式中, F_L 为苗针应能克服穴盘苗从穴盘孔里拉拔出来的力, N; F_{f0} 为穴盘对苗坨的摩擦力, N; G 为苗坨重力, N; F_{f1} 、 F_{f2} 为苗针对于苗坨产生的静摩擦力, N; F_{J1} 、 F_{J2} 为苗针对于苗坨两侧产生的夹持力, N, 理论上 $F_{f1} = F_{f2} = \mu F_{J1} = \mu F_{J2}$; μ 为苗针和苗坨的静摩擦系数。

通过穴盘苗拉拔试验,测得72穴甘蓝苗的含水率(w)在40%左右时,拉拔力平均为2.5 N。由式(9)可以看出,拉拔力取决于夹持力(F_J)、静摩擦因数(μ)、夹持角度(α),其中,夹持力是作用力,计算公式为:

$$F_{J1} = \sigma S_J, \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{F}{S_Y}, \quad (11)$$

式中, S_J 为苗针夹持苗坨的面积, mm^2 ; σ 为钵体抗压强度, Pa; F 为苗坨抗压力, N; S_Y 为苗针压缩的面积, mm^2 。穴盘苗苗坨抗压力-变形关系^[24]为非线性曲线, 关系式为:

$$F = 0.065 0x^3 - 0.674 2x^2 + 3.602 0x - 0.754 8, \quad (12)$$

式中, x 为苗坨夹持变形量, mm。

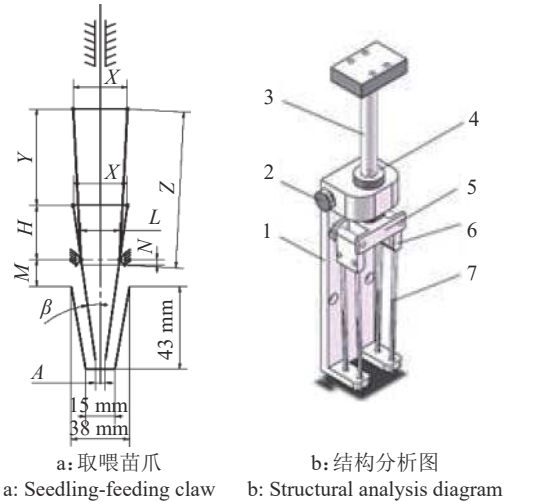
由式(9)~(12)联立可得

$$F_L = \frac{2FS_J(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{S_Y}. \quad (13)$$

经过以上分析,在测定穴盘苗的拉拔力、钵体抗压力、钵体与夹取针的摩擦因数等3个参数基础上,通过式(12)、(13)建立夹取针的夹持角度、钵体的面积、钵体夹持变形量之间的依赖关系,这3个参数是取喂苗爪设计的关键技术参数。

2.2.2 结构设计 本文针对整排同时取苗,设计了一款“2指4针”的喂苗爪,如图5a所示,主要由固定板、直线轴承、推杆、苗针连接板,苗针安装板、苗针等组成。抓苗时,推杆下降,苗针进入苗坨,推杆越低,苗针角度越大,越夹紧苗坨,当推杆下降到最低处时,苗针对苗坨的夹持力达到最大;落苗时,推杆上升,苗坨被固定板限制住,苗针对苗坨的夹持力减小,当推杆上升到最高处时,苗坨依靠重力自由落入苗杯中。根据其结构及工作原理,建立数学模型,如图5b所示。

各运动件之间的关系如下:



a 图中, X : 苗安装板转动中心之间的距离; Y : 苗针下降到最低点的距离; Z : 苗针和苗针连接板的长度; H : 苗针下降到最低点后安装板和固定板之间的距离; L : 固定板下方孔中心距; M : 安装板和穴盘之间的距离; N : 苗针在最上方时苗针离安装板的距离; A : 苗针下降到最低点后针尖之间的距离; β : 苗针在最低处时与竖直方向的夹角; b 图中, 1: 固定板; 2: 限位螺栓; 3: 推杆; 4: 直线轴承; 5: 连接板; 6: 苗针安装板; 7: 苗针

In figure a, X : Distance between rotation centers of seedling mounting plate; Y : Distance of needle dropping to the lowest point; Z : Length of plate connecting seedling needles; H : Distance between mounting plate and fixed plate after seedling needle dropping to the lowest point; L : Center distance of the square hole under the fixed plate; M : Distance between mounting plate and tray; N : Distance from seedling needle to the mounting plate at the top of the seedling needle; A : Distance between tip of the needle after needle dropping to the lowest point; β : Angle between seedling needle at the lowest point and vertical direction; In figure b, 1: Fixed block; 2: Limit bolt; 3: Push rod; 4: Linear bearing; 5: Junction plate; 6: Seedling needle mounting plate; 7: Seedling needle

图5 喂苗爪结构图

Fig. 5 Structure of seedling-feeding claw

$$\begin{cases} 2Z\sin\beta + A = X \\ Y + H + N = Z \\ 2H\tan\beta + L = X \\ L < X \end{cases}, \quad (14)$$

式中, X 为苗安装板转动中心之间的距离, mm; Y 为苗针下降到最低点的距离, mm; Z 为苗针和苗针连接板的长度, mm; H 为苗针下降到最低点后安装板和固定板之间的距离, mm; L 为固定板下方孔中心距, mm; M 为安装板和穴盘之间的距离, mm; N 为苗针在最上方时苗针离安装板的距离, mm; A 为苗针下降到最低点后针尖之间的距离, mm; β 为苗针在最低处时与竖直方向的夹角, ($^{\circ}$)。

为实现整排无间隔取苗, 喂苗爪固定板之间的距离应为最小规格穴盘的中心距 (32 mm), 除去苗针连接板的厚度, X 最大取 28 mm; 取苗角度越大, 则取苗抓取力越大, A 取 2 mm; 苗针的上升和下降采用电动推杆实现, 结合电动推杆的规格, 选用 50 mm 行程的电动推杆, 故 Y 取 50 mm; 为实现落苗时不带苗, N 取 4 mm; 则取喂苗爪设计尺寸如表 1 所示。

表 1 取喂苗爪不同参数的设计尺寸¹⁾

Table 1 Dimensions of different parameters of seedling feeding claw

$\beta/(^{\circ})$	Z/mm	H/mm	L/mm
10	74.86	74.86	74.86
9	83.10	83.10	83.10
8	93.41	93.41	93.41
7	106.67	106.67	106.67
6	124.37	124.37	124.37

1) β 为苗针在最低处时与竖直方向的夹角; Z 为苗针和苗针连接板的长度; H 为苗针下降到最低点后安装板和固定板之间的距离; L 为固定板下方孔中心距

1) β is angle ketneen seedling needle at the lowest point and vertical direction; Z is the length of the connecting plate between the needles; H is the distance between the mounting plate and the fixed plate after the needle drops to the lowest point; L is the center distance of the square hole under the fixed plate

H 过大, 影响取喂苗爪的整体尺寸, 加工难度增大, H 过小, 苗针座设计空间太小。综合考虑 H 的取值范围设计尺寸, H 为 35 mm, 则 Z 为 89 mm, α 为 8.4° , L 为 17.7 mm, 苗针粗 2 mm, 尖端为锥形状。对取喂苗爪利用 SolidWorks 进行三维建模并基于 ADAMS 对其运动过程进行仿真, 对苗针的末端添加标记点, 形成 2 条白色的运动轨迹, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 苗针的运动轨迹为上端开

口大, 下端逐渐缩进的倾斜曲线, 可以加持更多的土壤, 使其拥有更大的加持力。当插入深度取 40 mm, 得到夹取针夹持钵体的面积为 160 mm^2 , 夹持角度为 8.4° , 静摩擦因数 (μ) 取平均值 0.5, 平板压缩面积取苗坨外表面积为 1417.5 mm^2 , 由式 (10) 解得 F_{J1} 为 1.95 N, 由式 (12)、(13) 解得夹持变形量为 7.8 mm。即当变形量大于 7.8 mm 时, 苗坨刚好能被抓起, 从仿真结果可以看出取喂苗爪的开合满足设计要求。



图 6 苗针运动轨迹图

Fig. 6 Seedling needle trajectory

2.2.3 可调式方案设计 对不同孔穴的穴苗盘, 需要通过更换限位螺栓来调节相邻取喂苗爪的间距对应穴苗盘两穴孔的间距, 拆装取喂苗爪对应穴苗盘单排的穴孔数, 按照取喂苗臂上的标识标识调整传感器的位置, 选取对应的 PLC 控制程序, 完成调整过程, 从而实现取喂苗臂上安装的取喂苗爪数量与 8×16 型 128 穴、 7×15 型 105 穴、 6×12 型 72 穴的窄边穴孔数对应, 不同规格的穴盘相邻穴孔之间的间隙及取喂苗爪数不一样, 128 穴苗盘的穴孔间距为 32 mm, 使用 8 个取苗爪; 105 穴苗盘的穴孔间距为 37 mm, 使用 7 个取苗爪; 72 穴苗盘的穴孔间距为 43 mm, 使用 6 个取苗爪, 取喂苗爪安装如图 7 所示。

2.3 控制系统设计

控制系统采用西门子 S7-200SMART 型 PLC 控制器, 包括硬件和软件, 硬件部分主要由 PLC 控制器、传感器、步进电机、驱动器、电磁开关等组成, 如图 8 所示。基于 PLC 设计取喂苗控制系统, 整排取苗控制流程图如图 9 所示, 开始工作前, 先按下复位按钮, 进入复位状态, 然后按下启动按

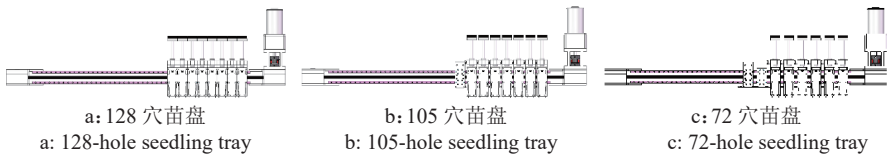


图 7 3 种取喂苗爪安装效果图

Fig. 7 Installation effect diagram of three kinds of seedling picking and feeding claws

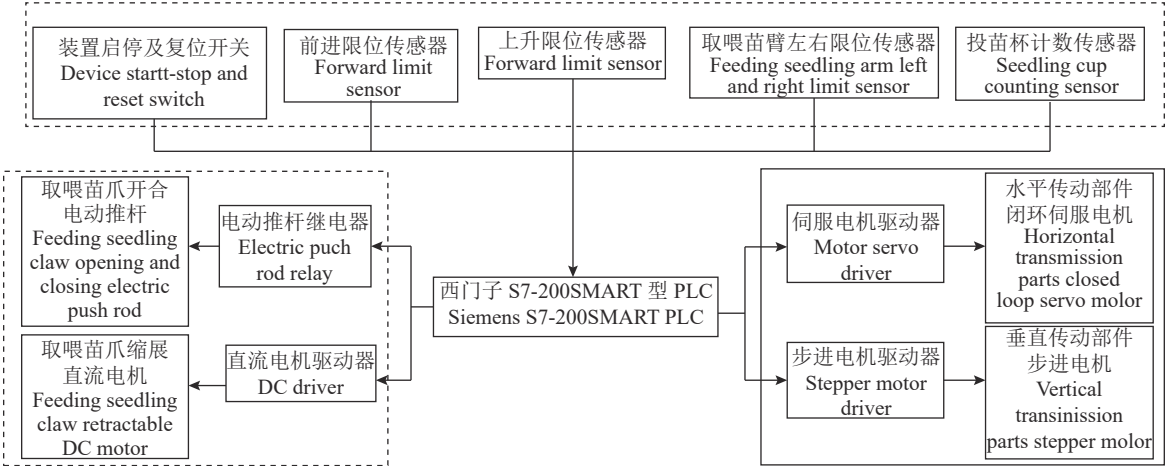


图 8 控制系统硬件组成

Fig. 8 Hardware composition of control system

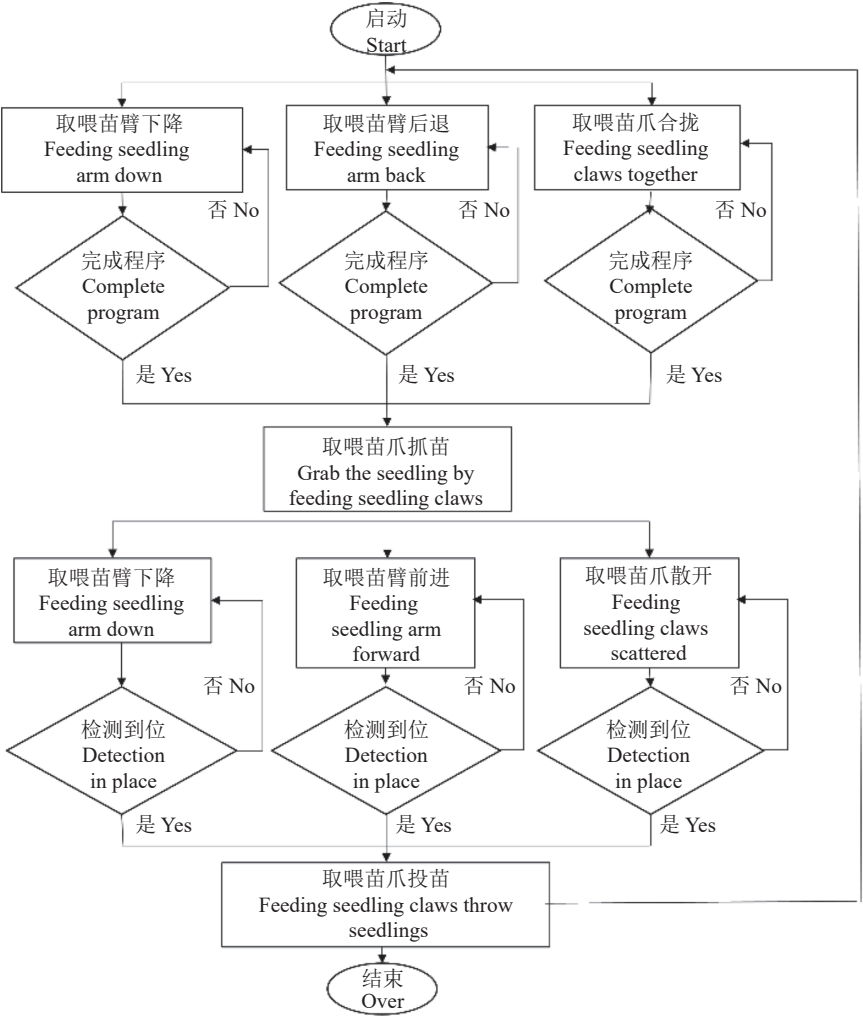


图 9 控制流程图

Fig. 9 Flow chart of control

钮, 喂苗装置按照系统程序^[25-27]运行, 完成取喂苗作业。

3 样机田间试验

3.1 试验条件

为验证该喂苗装置实际喂苗效果, 寻求最优参数组合, 2021 年 8 月, 在北京市永盛园内进行样机田间试验 (图 10)。试验对象选用其专门培育的 72、105、128 穴的生菜苗, 穴苗盘为国家标准穴盘, 尺寸为 540 mm×280 mm×40 mm。



图 10 样机田间试验
Fig. 10 Prototype and field experiment

3.2 试验因素和指标

当基质含水率较低时, 穴盘苗易脱水, 影响成活率, 含水率较高时, 苗坨易松散, 影响取苗; 苗株较小的穴盘苗根须不够发达, 苗坨易松散, 苗株较大的穴盘苗叶片较大, 抓取过程中容易造成破坏, 影响定植后的成活率; 苗针入土深度越深则抓取力越大, 但也对苗坨的破坏性越大。故在 3 种穴盘规格下, 选择基质含水率、苗高、苗针入土深度为试验因素。

选择试验指标为喂苗成功率, 喂苗成功的标准是把穴苗从穴盘中取出, 苗坨不松散, 并准确投入到投苗杯中。喂苗成功率 (η) 计算公式为:

$$\eta = \frac{N_t - N_u - N_p - N_v}{N_t} \times 100\%, \tag{15}$$

式中, N_t 为每组试验的总株数; N_u 为未取出的株数; N_p 为取出苗坨松散或伤苗的株数; N_v 为未投入苗杯的株数。

3.3 单因素试验结果与分析

选取 72、105、128 穴的生菜苗, 分别进行以下试验。基质含水率的单因素试验, 在苗高为 50 mm、苗针入土深度为 38 mm 的条件下, 3 种穴盘各取 10 盘, 分成 15 组, 每组 2 盘, 待浇完水后, 正常放置在大棚里, 在基质含水率 (w) 为 60%、50%、40%、30%、20% 时进行喂苗试验。试验结果如图 11a 所示, 当基质含水率降低时, 喂苗装置的喂苗成功率不断提高, 达到一个峰值然后开始降低。故基质含水率 (w) 在 30%~50% 时, 适宜进行移栽作业。

选取苗高为 30、40、50、60、70 mm 的幼苗进行试验。3 种穴盘各取 10 盘, 共分成 15 组, 每组 2 盘, 在基质含水率 (w) 为 40%、苗针入土深度为 38 mm 的条件下进行试验。试验结果如图 11b 所示, 随着苗高的增加喂苗成功率不断提升, 达到峰值然后开始降低, 这是因为随着苗高的增加, 穴盘苗的根系更加发达, 固坨效果越好, 喂苗成功率也更高; 苗过高时, 幼苗叶片较大, 在喂苗过程中容易对叶片造成破坏, 植株完整率较低。故苗高为 40~60 mm 时, 适宜移栽作业。

在苗针入土深度的单因素试验中, 在基质含水率为 40%、苗高为 50 mm 的条件下, 3 种穴盘各取 10 盘, 分成 15 组, 每组 2 盘, 在苗针入土深度为 32、34、36、38、40 mm 时进行喂苗试验。试验结果如图 11c 所示, 随着入土深度的增加 (32~38 cm), 喂苗装置的成功率明显提高, 当入土深度达到最深 (40 cm) 时, 苗坨出现了破损, 喂苗成功率降低。综合考虑, 入土深度在 36~40 mm 时, 适宜移栽作业。

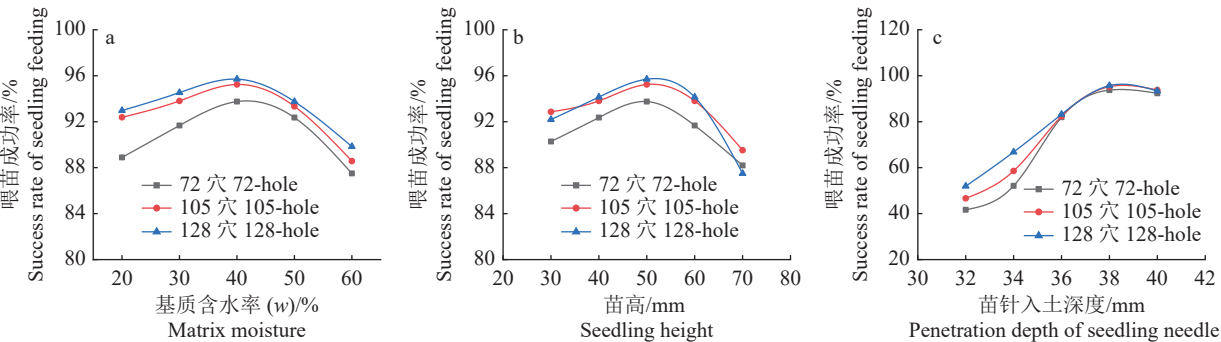


图 11 各单因素对喂苗成功率的影响

Fig. 11 Effects of single factors on success rate of seedling feeding

3.4 多因素试验

为了获得上述 3 个因素的最优值, 选择育苗盘规格、基质含水率、苗高、苗针入土深度作为试验因素, 各因素取值范围由单因素试验结果确定, 以喂苗成功率为试验指标, 选取 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行 9 组正交试验, 另外再进行 3 组优选方案验证试验,

每组试验 2 盘穴苗, 共计 24 盘。每完成 1 组试验, 由式 (18) 算喂苗成功率, 因素水平编码值如表 2 所示, 试验方案与结果如表 3 所示。采用极差分析法对试验结果进行分析, 结果见表 4, 采用方差分析法对试验结果进行分析, 结果见表 5。

表 2 正交试验因素水平表
Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平 Level	育苗盘规格/穴 Seedling tray specification (A)	基质含水率(w)/% Matrix moisture (B)	苗高/mm Seedling height (C)	入土深度/mm Depth of penetration (D)
1	72	30	40	36
2	105	40	50	38
3	128	50	60	40

表 3 正交试验方案及结果
Table 3 Experiment scheme and results of orthogonal test

序号 No.	因素及水平 Factors and levels				喂苗成功数/株 No. of successful seedling picking	喂苗成功率(η)/% Success rate of seedling feeding
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	115	79.86
2	1	2	3	2	129	89.58
3	1	3	2	3	126	87.50
4	2	1	3	3	189	90.00
5	2	2	2	1	176	83.81
6	2	3	1	2	193	91.90
7	3	1	2	2	239	93.36
8	3	2	1	3	233	91.02
9	3	3	3	1	216	84.38

表 4 极差分析
Table 4 Range analysis

因素 Factor	K_1	K_2	K_3	极差 Range	最优方案 Optimal scheme
A	256.94	265.71	268.75	11.81	A_3
B	263.22	264.41	263.78	1.19	B_2
C	262.78	264.67	263.78	1.89	C_2
D	248.05	274.85	268.52	26.80	D_2
主次 Primary and secondary				$D > A > C > B$	

表 5 方差分析
Table 5 Variance analysis

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	显著性 ¹⁾ Significance
A	25.06	2	12.52	106.40	**
B	0.24	2	0.12		
C	0.61	2	0.30	2.57	
D	130.83	2	65.41	555.56	**
总和 Sum	156.74	8			

1) “**” 表示0.01水平差异显著
1) “**” means significant difference at the level of 0.01

对表 4、表 5 进行综合分析,得出最佳的取苗方案 $A_3B_2C_2D_2$,即 128 穴生菜在基质含水率 (w) 为 40%、苗高为 50 mm、苗针入土深度为 38 mm 时,喂苗成功率最高。优选方案验证试验结果显示,72、105、128 穴成功喂苗株数分别为 138、202、247 株,喂苗成功率分别为 95.83%、96.19% 和 96.48%,优选方案的喂苗成功率高于各单因素试验和正交试验,满足蔬菜穴盘苗自动旱地移栽取苗要求。试验发现,苗针入土深度对喂苗成功率影响最大,其次是育苗盘规格,苗坨含水率和苗龄在此范围内影响较小,符合农户实际农艺生产需求。

4 结论

1) 本文设计了一款可调式喂苗装置,该装置可通过调节限位螺栓,应用于 72、105、128 穴穴盘苗的移栽。优化了可调节取喂苗爪的取喂苗臂,设计了穴盘苗取喂苗爪的结构,并完成 PLC 控制系统软硬件设计,实现了对多种穴盘苗蔬菜苗的快速准确移栽。

2) 选择井关 PVHR2-E18 蔬菜移栽机作为配套材料,选取 3 种穴盘规格的生菜穴盘苗为试验对象,进行单因素试验和多因素正交试验,以基质含水率、苗高、苗针入土深度为试验因素,探究可调式喂苗装置喂苗成功率的最优工作参数。试验结果表明,当穴盘苗基质含水率 (w) 为 40%,苗高为 50 mm、苗针入土深度为 38 mm 时,蔬菜移栽机可调式喂苗装置喂苗成功率最高,72、105、128 穴生菜穴盘苗的喂苗成功率分别为 95.83%、96.19% 和 96.48%,满足设计要求。

参考文献:

[1] 玄冠涛, 韩军伟, 邵园园, 等. 我国机械化移栽自动分苗取苗技术研究现状[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 10-15.

[2] 张丽娜, 谭戡, 吕昊曦, 等. 温室穴盘苗自动移钵路径优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 65-72.

[3] 杜新武, 李灿, 李明勇, 等. 旱作移栽钵苗自动取投苗技术研究进展[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 263-268.

[4] JI J T, CHEN K K, JIN X, et al. High-efficiency modal analysis and deformation prediction of rice transplanter based on effective independent method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105126. doi: 10.1016/J.COMPAG.2019.105126.

[5] 张丽华, 邱立春, 田素博. 穴盘苗自动移栽机的研究进展[J]. 农业科技与装备, 2009(5): 28-31.

[6] 孙晓晓, 刘洋, 李斌, 等. 穴盘苗自动移栽机取苗装置研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 22-28.

[7] YANG Q Z, XU L, SHI X Y, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug

seedling transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 131-145. doi: 10.1016/j.compag.2018.02.004.

[8] 童俊华, 石虎峰, 武传宇, 等. 穴盘移栽指铲式末端执行器钵钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107-116.

[9] 田志伟, 马伟, 杨其长, 等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 22-38.

[10] 严宵月, 胡建平, 吴福华, 等. 整排取苗间隔放苗移栽设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 7-13.

[11] 胡建平, 常航, 杨丽红, 等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.

[12] 魏新华, 包盛, 刘晓凯, 等. 穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 1-7.

[13] 任玲, 赵斌栋, 曹卫彬, 等. 穴盘移栽机双旋转式分苗装置设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 10-18.

[14] 王侨, 曹卫彬, 张振国, 等. 穴盘苗自动取苗机构的自适应模糊 PID 定位控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 32-39.

[15] 王超, 刘彩玲, 李永磊, 等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 35-43.

[16] 刘念聪, 杨程文, 刘保林, 等. 全自动单摆式蔬菜钵苗取喂苗系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 87-95.

[17] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 96-104.

[18] 田素博, 赵晨希, 胡熙, 等. 蔬菜移栽机自动喂苗装置关键部件设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 586-592.

[19] 赵晨希. 生菜移栽机自动喂苗装置设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.

[20] 王宁, 任玲, 李江全, 等. 穴盘苗移栽机自动取苗技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 59-66.

[21] 金鑫. 蔬菜穴盘苗自动移栽技术与装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

[22] 俞高红, 俞腾飞, 叶秉良, 等. 一种旋转式穴盘苗取苗机构的设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 67-76.

[23] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册—机械传动设计: 单行本[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[24] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24-29.

[25] 文永双, 张宇, 田金元, 等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 123-129.

[26] 田素博, 邱立春, 张诗. 基于 PLC 的穴盘苗移栽机械手控制系统设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(1): 122-124.

[27] 陈瑜, 郑欢, 马瑞峻, 等. 基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 97-104.