

蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验

王 秀^{1,2} 刘蒙滋^{1,2} 翟长远^{1,2} 韩长杰³ 杨 硕¹ 高原源²
(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.江苏大学农业工程学院,镇江 212013;
3.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对半自动移栽机作业效率低、作业质量差的问题,设计了一种面向蔬菜移栽机器人的夹茎式自动取苗装置。取苗装置经过整排取苗、等距分苗、精准投苗,可实现高效、高质自动化取投苗作业。建立多级剪叉分苗机构与夹苗装置的运动力学模型,对钵苗下落运动、气动系统进行模型设计及分析计算,搭建取苗试验装置。试验选取穴盘辣椒苗作为研究对象,以钵苗苗龄、基质含水率、取苗频率为试验因素,设计以取苗成功率、基质破碎率为评价指标的单因素试验。根据试验结果,采用 Box - Behnken 响应曲面分析法设计正交试验,探究了苗龄与基质含水率、苗龄与取苗频率及基质含水率与取苗频率之间的交互作用对取苗效果的影响,优化取苗参数。试验结果表明,当苗龄 33 d、钵苗基质含水率 46%、取苗频率 75 株/min 时,取苗成功率为 97.36%,基质破碎 5.07%,可满足大田自动化移栽的取苗及投苗要求。

关键词: 蔬菜自动移栽机; 夹茎式取苗装置; 气动夹苗装置

中图分类号: S223.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)09-0122-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Vegetable Transplanting Clip Stem Seedling Device

WANG Xiu^{1,2} LIU Mengzi^{1,2} ZHAI Changyuan^{1,2} HAN Changjie³ YANG Shuo¹ GAO Yuanyuan²
(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China
2. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Aiming at the problems of low operation efficiency and poor operation quality of semi-automatic transplanting machine, a stem-type automatic seedling picking device for vegetable transplanting robot was designed. The seedling pick-up device can realize efficient and high-quality automatic seedling pick-up and delivery operation through whole row of seedling pick-up, equidistant seedling separation and precise seedling delivery. The motion mechanics model of multi-stage scissors seedling mechanism and clamping seedling device was established. The model design and analysis calculation of the falling motion and pneumatic system of pot seedlings were carried out, and the seedling test device was built. Plug pepper seedlings were selected as the research object, and the seedling age, matrix moisture content and seedling frequency were taken as the experimental factors. A single factor experiment was designed to evaluate the success rate of seedling and matrix crushing rate. According to the test results, the Box - Behnken response surface analysis method was used to design the orthogonal experiment. The effects of the interaction between seedling age and substrate moisture content, seedling age and seedling picking frequency, substrate moisture content and seedling picking frequency on the seedling picking effect were explored, and the seedling picking parameters were optimized. The results showed that when the seedling age was 33 d, the water content of pot seedling substrate was 46%, the frequency of seedling picking was 75 plants/min, the success rate of seedling picking was 97.36%, and the substrate crushing was 5.07%, which could meet the requirements of seedling picking and throwing of field automatic transplanting.

Key words: vegetable automatic transplanting machine; clamping stem seedling device; pneumatic seedling clamping device

0 引言

移栽作业是蔬菜种植规模化不可或缺的一环,而我国的移栽作业仍以人工作业与半自动移栽机作业为主,存在作业效率低、作业质量差和劳动强度大的问题^[1-2]。为解决半自动移栽作业存在的问题,自动移栽机器人成为发展趋势之一^[3-4]。

取投苗装置是移栽机器人的核心机构,设计高效、稳定、适用性高的取苗装置是国内外自动移栽机研制的重点及难点^[5-7]。国内外学者对此展开一系列的研究。以欧美为代表的大型移栽机器人主要采用机、电、气一体技术,具有整排取苗、效率高、体积庞大的特点^[8-9]。典型机型有澳大利亚的 Urbinati RW3 型移栽机,采用气动四爪夹取机构,气缸驱动移栽爪取苗、投苗,标准化程度高,适应多种苗盘,适用于温室流水线工作^[10]。以日本为代表的小型自动移栽机自动化程度高、结构紧凑,具有小块地垄上移栽的特点^[11-12],典型机型有洋马农机株式会社的 PF2R 型蔬菜自动移栽机,采用行星齿轮与槽型凸轮机构合成取苗爪从苗盘取苗后投入栽植器的运动轨迹^[13]。为满足国内的农艺与栽植要求,一些学者提出了顶出式^[14-15]、顶出夹取式^[16-17]、插入夹取式^[18-20]、气力式^[21-22]等形式多样的取苗机构。叶秉良等^[23-24]采用非圆柱齿轮的运动特性设计偏心齿轮-非圆齿轮行星轮系蔬菜取苗机构,建立取苗机构的运动学模型、数学模型和动力学模型,对取苗机构进行优化,具有较好的取苗效果,但取苗运动轨迹复杂,影响取苗稳定性。WEN 等^[25]结合顶出式和插入夹持式取苗的优缺点设计了一种插入顶出式取苗装置,解决了顶出式取苗机构导致钵苗翻滚等问题。冯世杰等^[26]基于自制非标活动苗盘设计出顶出托举式取苗装置,通过穴盘定位装置下方的推举机构,将自制活动苗盘顶开,将钵苗整体推出,进而机械爪取苗,取苗效果好,但取苗装置针对自制非标苗盘,难以推广。

基于以上分析,为实现自动化移栽,提高自动移栽机的取苗质量及稳定性,本文设计夹茎式取苗装置,采用气动夹苗装置完成钵苗夹取,多级剪叉机构实现等距分苗,经过理论分析后对关键部件设计优化,完成取苗装置的搭建,选择辣椒苗作为试验对象,进行单因素试验和正交试验,验证取苗机构的作业可靠性及稳定性。

1 自动取苗装置试验平台结构与工作原理

1.1 试验平台整机结构

设计的蔬菜移栽取苗装置试验平台如图 1 所

示,取苗装置试验平台由送盘装置、取苗装置、栽植装置、气动系统及控制系统等组成。取苗装置由夹苗装置、分苗装置、提升装置及移位装置组成。作业时送盘装置通过步进电机将放置在推苗杆上的苗盘送到取苗位置,夹苗装置夹取苗茎,由分苗机构将夹取的钵苗等距分开,移位气缸将钵苗移动到苗杯上方,当苗杯探测传感器接收到投苗信号后,控制系统控制夹苗装置将钵苗投入苗杯中。变频电机为试验平台的栽植装置提供动力,栽植装置中的苗杯运动到栽植器上方时苗杯打开,将苗杯中的钵苗依次投入栽植器中,完成一次取苗周期。

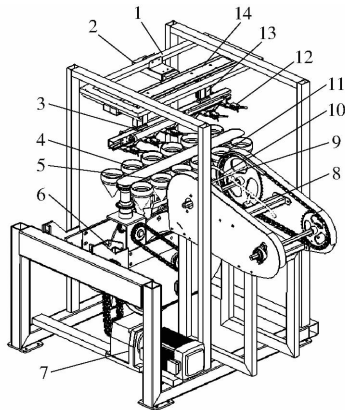


图 1 整排夹茎式取苗装置结构简图

Fig.1 Structure diagram of whole row of stem-clamping seedling picking device

- 1. 取苗固定架 2. 移位气缸 3. 分苗机构 4. 苗杯 5. 苗杯探测传感器 6. 栽植器 7. 变频电机 8. 穴盘定位杆 9. 推苗杆 10. 苗盘定位传感器 11. 苗爪定位传感器 12. 夹苗装置 13. 提升气缸 14. 移位固定板

1.2 工作原理

取苗装置作业过程如图 2 所示。推苗杆顺着链条均匀布置在送盘装置上,作业时推苗杆支撑苗盘并与苗盘定位杆配合定位苗盘。取苗过程分为以下 4 个阶段:①夹苗,送盘装置的步进电机带动推苗杆运动进而推动苗盘前进,苗盘定位传感器检测到苗盘到达并发出苗盘到位信号;检测到夹苗装置到达取苗位置,苗爪定位传感器信号触发。苗盘到位信号与夹苗装置到位信号同时存在时,夹苗装置夹持苗茎。②取苗,夹取完成后,提升气缸收缩,将钵苗从苗盘中取出。③移位,分苗气缸带动多级剪叉分苗机构使钵苗等距分开,分苗气缸停止运动时,相邻钵苗之间的距离与相邻苗杯之间的距离相等,同时移位气缸收缩将钵苗从送盘装置上方移动到苗杯上方。④投苗,苗杯探测传感器检测苗杯位置信息,当获取 6 个苗杯信号后,夹苗装置的苗爪张开,钵苗落入苗杯中,投苗后整个取苗机构按照原路返回,完成一次取苗周期,等待下次取苗。

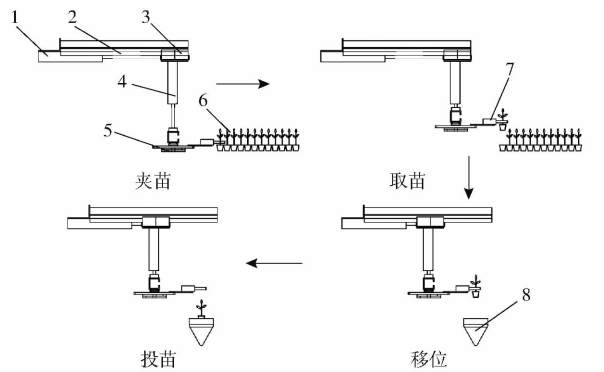


图 2 取苗装置取苗过程示意图

Fig.2 Schematic of seedling picking process of seedling picking device

1. 移位气缸 2. 移位导轨 3. 移位滑块 4. 提升气缸 5. 剪叉分苗机构 6. 钵苗 7. 夹苗装置 8. 苗杯

2 试验平台关键部件设计

2.1 取苗装置

2.1.1 分苗装置设计

取苗装置采用取苗-分苗-投苗的自动化控制方式,取苗装置将钵苗从苗盘中取出自动投入到苗杯中,分苗过程采用多级剪叉分苗机构实现钵苗等距分散,图 3 为多级剪叉分苗机构作业原理图,剪叉分苗机构的剪杆中心连接 6 个滑块,第 4 个滑块与导轨固定连接。其中图 3a 为分苗机构收缩状态,夹苗装置之间的距离与苗盘穴口间距相同。分苗气缸伸出过程中推动第 1 个滑块运动,除与导轨固定连接的滑块外,余下滑块随着第 1 个滑块等速、等距在导轨上分散,夹苗装置固定板与滑块固定连接,固定板上的夹苗装置随滑块分散,分苗气缸停止运动时,夹苗装置之间的距离与相邻苗杯之间的距离一致,分苗机构展开状态如图 3b 所示。

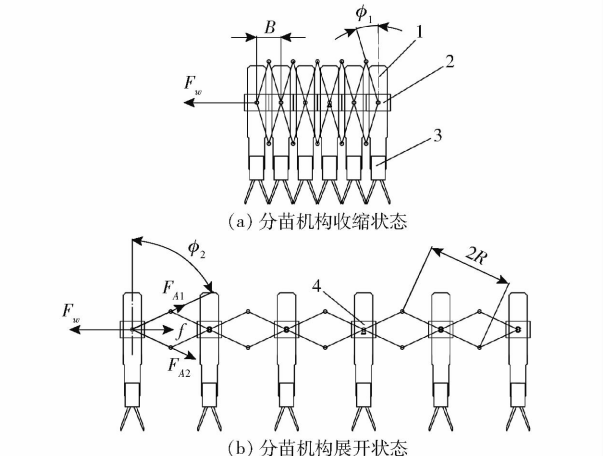


图 3 分苗机构工作原理图

Fig.3 Working principle of seedling mechanism

1. 夹苗装置固定板 2. 滑块 3. 夹苗装置 4. 固定滑块

本研究采用山东火绒农业科技有限公司设计的

2ZBX-1 型半自动移栽机作为栽植装置。其相邻苗杯的间距 L 为 127 mm,取苗系统针对 72 穴盘的育苗盘,苗盘穴口间距 X 为 42 mm,滑块的长度应小于苗盘穴口间距 X ,选用滑块的长度为 40 mm。如图 3 所示,对多级剪叉分苗机构进行分析,剪杆的中心在导轨上做直线运动,剪叉的剪杆长度为 $2R$,有

$$U = 3J - 3B \tag{1}$$

$$U = 6R\sin\phi_2 - 6R\sin\phi_1 \tag{2}$$

$$J = L \tag{3}$$

$$B = X \tag{4}$$

式中 U ——多级剪叉分苗机构行程,mm
 J ——分苗机构展开相邻滑块之间距离,mm
 R ——剪叉分苗机构的半剪杆长,mm
 B ——分苗机构收缩相邻滑块之间距离,mm
 ϕ_1 ——未展开时剪杆在竖直方向夹角, ($^\circ$)
 ϕ_2 ——展开时剪杆在竖直方向夹角, ($^\circ$)

故臂长为

$$2R = \frac{U}{3(\sin\phi_2 - \sin\phi_1)} = \frac{B}{\sin\phi_1} \tag{5}$$

由此可以得到

$$B = \frac{U\sin\phi_1}{3(\sin\phi_2 - \sin\phi_1)} \tag{6}$$

对于剪叉分苗机构 $\phi_1 \geq 10^\circ, 40^\circ \leq \phi_2 \leq 55^\circ$,随着 ϕ_1 的减小,所需气缸推力会急剧增大。 $\phi_2 \leq 40^\circ$ 时,剪叉分苗机构臂长未能最大程度利用, $\phi_2 \geq 55^\circ$ 时,角度增大对位移的增长效果减小^[27]。将数据代入式(1)、(3)、(4)计算得出 $U = 255$ mm,将 $\phi_1 = 12^\circ, \phi_2 = 55^\circ$ 代入式(2),并对剪杆长度进行圆整,选取剪杆长度 $2R = 140$ mm,半剪杆长 $R = 70$ mm。

取苗装置在一次取苗周期中,分苗气缸、提升气缸、移位气缸、夹苗气缸分别伸缩 1 次,共有 8 个动作,取苗频率在 90 株/min 下,气缸平均开合时间为 0.5 s,分苗机构的收缩与张开时间应小于 0.5 s。分苗气缸在带动负载情况下,先做加速运动,达到最大速度后为匀速运动,故

$$v_m = \frac{U}{t_z} \tag{7}$$

$$a_q = \frac{v_m}{t_j} \tag{8}$$

式中 v_m ——分苗气缸最大速度,m/s
 t_z ——分苗气缸运动时间,s
 a_q ——分苗气缸作用滑块的加速度,m/s²
 t_j ——分苗气缸加速时间,s

假定剪叉分苗机构的剪杆为轻杆,连接剪杆之间的光滑铰链作为理想铰,如图 3b 所示,对气缸直接作用滑块进行受力分析,有

$$F_w - F_{A1} \sin \phi - F_{A2} \sin \phi - f = m_z a_a \quad (9)$$

$$Z = O \cos \theta_3 \tag{17}$$

式中 s ——苗爪闭合后两苗爪之间的宽度,mm
 S ——苗爪张开时的最大宽度,mm
 c ——苗盘穴口宽度,mm
 Z ——苗爪长度,mm
 O ——苗爪到圆柱副之间的距离,mm
 K ——苗爪张开时的最大深度,mm
 W ——转动副之间的距离,mm
 θ_3 ——苗爪顶端到转动副之间的连线与苗爪的夹角,(°)
 β ——苗爪张开在水平方向的夹角,(°)

前期对钵苗物理特性研究可知,穴盘苗 20 ~ 50 d 时苗茎直径通常介于 2.5 ~ 3.7 mm,为保护苗茎及模拟人工手指取苗,在苗爪上粘贴了 1 mm 硅胶垫,考虑硅胶垫的弹性,选取闭合时苗爪的间距 $s = 4$ mm。72 穴标准苗盘穴口长、宽为 40 mm,将上述数据代入式(14) ~ (17)中,经过参数圆整, $W = 16$ mm, $Z = 44$ mm, $O = 44.5$ mm, $\beta = 70^\circ$ 。

夹取钵苗时,为使夹苗装置将钵苗从苗盘中取出,苗爪夹持的苗茎需要满足

$$F_f = F_j > F_T \tag{18}$$

式中 F_f ——苗茎受到的最大静摩擦力,N

如图 5a 所示,夹苗机构夹取钵苗时,对夹苗状态下的夹苗机构进行受力分析,根据力矩平衡可得

$$\begin{cases} \frac{F_l}{2} l_1 \cos \theta_1 = F_{i1} l_2 \cos \theta_1 \\ \frac{F_l}{2} l_1 \cos \theta_1 = F_{i2} l_2 \cos \theta_2 \end{cases} \tag{19}$$

式中 F_l ——夹苗气缸的拉力,N
 F_{i1} ——苗爪对苗茎的单侧压力,N
 l_1 —— F_l 到圆柱副的力矩长度,mm
 l_2 —— F_{i1} 到圆柱副的力矩长度,mm
 θ_1 ——销轴中心到圆柱副的连线与水平方向之间夹角
 θ_2 ——苗茎受力点到圆柱副的连线与竖直方向之间夹角

可根据计算出的压力计算夹苗装置夹苗时苗爪对钵苗的摩擦力为

$$F_j = F_f = \mu_1 (F_{i1} + F_{i2}) \tag{20}$$

式中 μ_1 ——苗爪与苗茎之间的摩擦因数

根据式(19)、(20)可计算出夹苗气缸所需拉力

$$F_l = F_{i2} \frac{2 l_2 \cos \theta_2}{l_1 \cos \theta_1} \tag{21}$$

夹取装置将钵苗从苗盘中取出,且钵苗不掉落视为取苗成功,假设夹取钵苗在苗爪中间,根据前文

的尺寸计算得出 $l_2 = 20$ mm, $l_1 = 11$ mm, $\theta_1 = 12^\circ$, $\theta_2 = 18^\circ$,硅胶垫与苗木之间的摩擦因数取 $\mu_1 = 0.6$,由式(21)计算得出气缸理论最小推力为 $F_l \geq 10.3$ N,选取夹苗气缸为 MD/CDU10 - 10,在 0.5 MPa 压力下,输出推力可达 14.9 N。

2.2 钵苗运动分析

夹苗装置取苗后,经分苗、移位后运动到苗杯上方,夹苗装置张开将钵苗投入苗杯中。如图 6 所示,苗杯探测传感与钵苗在同一竖直平面内,苗杯检测传感器检测到苗杯边缘时,夹钵苗与苗杯之间的垂直高度为 y ,在苗杯高速运动过程中防止投苗失败,应使钵苗在落入苗杯时恰好处于苗杯中心,在夹苗装置将钵苗投入苗杯的过程中,对钵苗进行运动学分析,在夹苗装置释放钵苗时,钵苗的动力学方程为

$$mg - F_k = ma_b \tag{22}$$

其中 $F_k = \mu_2 V \tag{23}$

式中 F_k ——空气阻力,N
 m ——钵苗质量,kg
 a_b ——钵苗加速度,m/s²
 μ_2 ——空气阻力系数
 V ——钵苗的下落速度,m/s

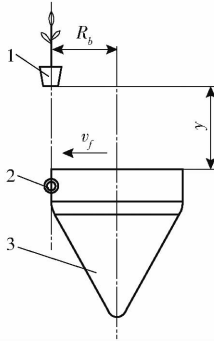


图 6 钵苗运动分析图

Fig. 6 Analysis diagram of bowl seedling movement

1. 钵苗 2. 苗杯探测传感器 3. 苗杯

将式(23)代入式(22)后对式(22)进行时间双重积分得到钵苗下落时位移与时间的关系。

在钵苗下落过程中,保证钵苗投入苗杯中心需要满足条件

$$y = \frac{m^2 g}{\mu_2^2} (e^{\frac{\mu_2 t}{m}} - 1) \tag{24}$$

$$x = v_f t \tag{25}$$

$$v_f = \frac{La}{60} \tag{26}$$

$$R_b = x + v_f t_y \tag{27}$$

式中 y ——钵苗下落位移,m
 t ——下落时间,s
 x ——钵苗下落时间内苗杯位移,mm

v_f ——苗杯速度, mm/s
 a ——取苗频率, 株/min
 R_b ——苗杯半径, mm
 t_y ——检测到苗杯信号后投苗时间, s

由于空气阻力对钵苗下落的影响忽略不计, 当趋于 0 时有

$$y = \frac{1}{2}gt \tag{28}$$

联立式(24)~(28)求出

$$t_y = \frac{60R_b}{La} - \sqrt{\frac{2y}{g}} \tag{29}$$

由式(29)可以得出在传感器检测到苗杯后经

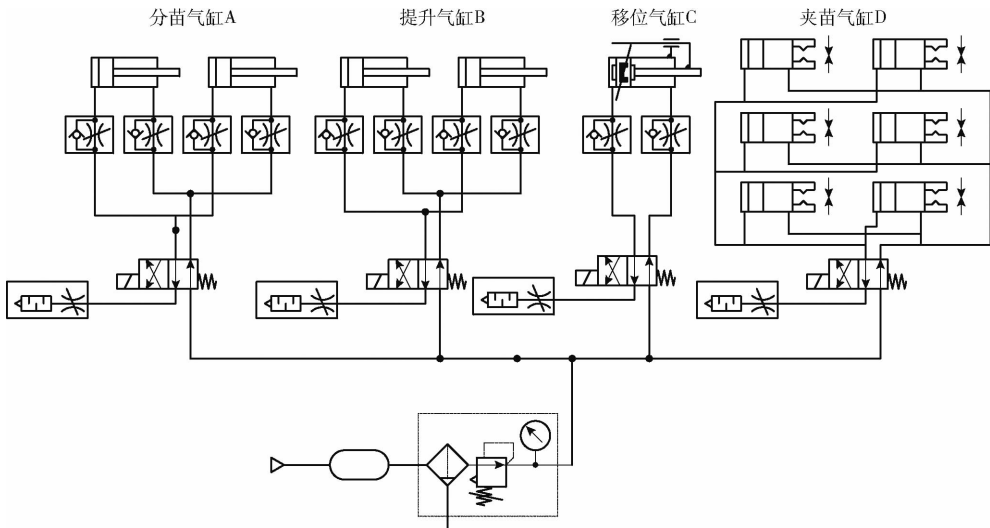


图 7 气动系统回路图
Fig. 7 Pneumatic system circuit diagram

2.3.2 气动系统耗气量计算

取苗装置气动系统的耗气量随着取苗频率增加而增加, 气动回路需要保证足够的气量确保系统工作气压稳定。在气动系统运行过程中, 气缸的耗气量计算公式为

$$Q = \frac{\pi}{2}nD^2L_q \frac{p+0.1}{0.1} \times 10^{-3} \tag{30}$$

式中 Q ——气缸消耗压缩空气的流量, L/min
 D ——气缸缸径, cm L_q ——气缸行程, cm
 p ——气动系统的工作压力, MPa
 n ——气缸活塞每分钟往复次数

取苗装置移栽平台采用的栽植装置, 经调研发现稳定工作的最高栽植频率为 90 株/min。通过计算得出气动系统总耗气量为 56.61 L/min, 选择出气量为 60 L/min 的空气压缩机作为气源。

3 取苗装置取投苗性能试验

3.1 试验条件、试验方案与评价指标

试验采用山东德瑞康蔬菜种苗有限公司培育的

过时间 t_y 后进行投苗。

2.3 气动系统

2.3.1 气动系统设计

取苗装置中的气动元件包括用于驱动分苗机构的分苗气缸 A, 用于将钵苗从苗盘中取出的提升气缸 B, 用于将钵苗从苗盘上方移动到苗杯上方的移位气缸 C, 驱动苗爪夹取钵苗的夹苗气缸 D, 气动系统如图 7 所示, 空气经由空压机加压后, 为了稳定气源系统管路的压力, 在空压机后增加储气罐, 由电磁换向阀控制气缸的伸出与收缩。自动取苗装置为整排取投苗, 6 个夹苗装置同时夹苗与投苗, 采用一个电磁换向阀控制 6 个夹苗气缸 D。

瑞苗 9 号辣椒苗作为试验对象, 该辣椒苗采用 72 孔标准苗盘培育, 穴孔之间的距离为 42 mm × 42 mm, 底部尺寸为 17 mm × 17 mm, 苗盘总体尺寸为 540 mm × 280 mm, 苗盘的材料为聚苯乙烯, 具有柔韧性耐折叠的特点。瑞苗 9 号辣椒苗采用有机营养基质培育, 育苗基质为泥岩、蛭石、珍珠岩按照体积比 2:1:1 混合制得, 基质紧实, 根系粗壮, 满足试验条件。试验仪器: 取苗装置试验台(如图 8 所示), 游标卡尺、直尺、赛多利斯 BSA124S 电子秤。

前期预试验表明钵苗苗龄、基质含水率及取苗频率对移栽效果具有显著影响, 针对钵苗苗龄、基质含水率、取苗频率设计单因素试验, 基质含水率采用干湿质量法测量, 取苗频率由控制系统控制变频电机的频率来改变, 试验台选用上海禾久减速机有限公司生产的 ESP8024 变频电机, 电机功率为 750 W。

根据 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械行业标准》结合辣椒苗栽植要求, 选用取苗成功率 Y_1 以及基质破碎率 Y_2 作为评价指标。

(1)取苗成功率: 钵苗从穴盘中完整取出, 投入

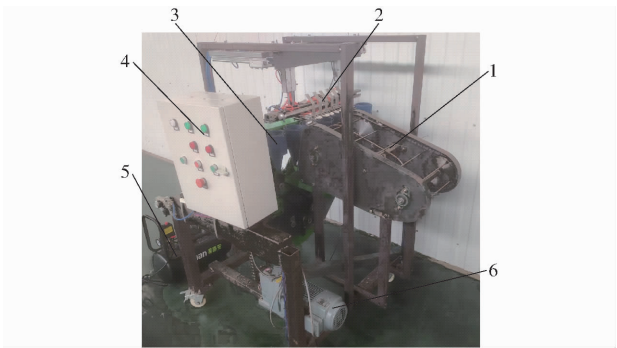


图 8 取苗试验台
Fig. 8 Seedling extraction test bench

1. 送盘装置 2. 取苗装置 3. 苗杯 4. 控制箱 5. 空气压缩机
6. 变频器

苗杯后,由苗杯将钵苗投入栽植器,完成整个流程且钵苗茎叶保持完整视为取苗成功,计算公式为

$$Y_1 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (31)$$

式中 N_2 ——取苗成功株数,株
 N_1 ——总钵苗数量,株

(2)基质破碎率:在取苗过程中基质在取苗、投苗过程中会产生破碎,以从苗盘中取出,从栽植器落下后的钵苗基质的完整度作为试验评价指标,计算公式为

$$Y_2 = \frac{M_1 - M_2 - m_x}{M_1 - m_x} \times 100\% \quad (32)$$

式中 M_1 ——穴盘苗总质量,g
 m_x ——苗盘质量,g
 M_2 ——取苗后的钵苗总质量,g

基质破碎率测量方式:在每组试验前,对整盘钵苗进行称量,试验完成后,将取苗成功后的钵苗收集到一起并称量。

3.2 单因素取苗试验

3.2.1 苗龄对取苗效果的影响

根据 NY/T 2119—2012《蔬菜穴盘育苗 通则》,苗龄决定钵苗根系和茎叶的形态,苗龄较大时钵苗根系发达,钵体具有良好的基质-根系复合特性,取苗装置取苗时基质不容易破碎,但苗龄较大茎叶缠绕,取苗强行分离钵苗可能导致茎叶受损,苗龄较低时则相反。选取基质含水率为 40%,将样机的取苗

频率设置为 70 株/min,苗龄分为 20、25、30、35、40 d 设计单因素试验。每组试验重复进行 3 次取平均值,每次试验取苗 144 株。试验结果如图 9a 所示。

由图 9a 可以看出,随着苗龄的增加,取苗成功率先逐渐上升后下降,而基质破碎率先急剧下降,最后趋于平稳。苗茎 20 d 时,取苗成功率为 90.34%,基质破碎率为 20.00%,在 5 组中取苗成功率最低,基质破碎率最大。苗龄 20 d 的钵苗苗茎细、脆性大,取苗时出现苗爪夹断苗茎的现象,导致取苗成功率低。苗龄较小时,钵苗根系不发达,钵苗根系难以缠绕基质,造成基质破碎率大。随着苗龄增加到 30 d 时,苗茎粗壮,韧性增加,苗茎断裂现象基本消失,取苗成功率最大,为 97.22%。根系逐渐强壮,基质破碎率减小到 6.14%。随着苗龄继续增大,钵苗的茎叶增大,取苗时出现苗爪夹取到后排叶片或投苗时钵苗叶片挂在苗爪与苗杯上的现象,导致取苗成功率下降。此时钵苗根系已经发育完全,根系将基质完全缠绕,基质破碎率逐渐趋于平稳。由以上分析可知,最佳取苗参数在苗龄 25 ~ 35 d 之间。

3.2.2 基质含水率对取苗效果的影响

基质含水率过低(小于 20%)时,钵苗易发生脱水,影响定植后的成活率,含水率过高(大于 60%)时,钵体抗压能力降低,造成基质破碎率增大。选取苗龄为 30 d,取苗频率为 70 株/min,设置基质含水率 20%、30%、40%、50%、60% 5 个水平设计单因素试验。每组试验重复进行 3 次取平均值,每次试验取苗 144 株,试验结果如图 9b。

如图 9b 所示,随着基质含水率的上升,取苗成功率出现先上升后下降的趋势,基质破碎率出现总体上先下降后上升的趋势。当基质含水率为 20% 时,取苗成功率最低,夹取钵苗位置出现偏移时,由于基质含水率低,钵体质量较轻,投苗时钵苗重心点不在苗杯圆心,钵苗下落过程中钵苗无法快速呈竖直状态,造成投苗失败。且基质的粘性下降,导致钵苗基质在取投苗时易碎。随着基质含水率的上升,钵苗基质质量上升,基质粘性增大,取苗成功率增加,基质破碎率总体下降,含水率到达 40% 时,取苗成功率最大,达到 97.40%,基质破碎率为 4.81%。

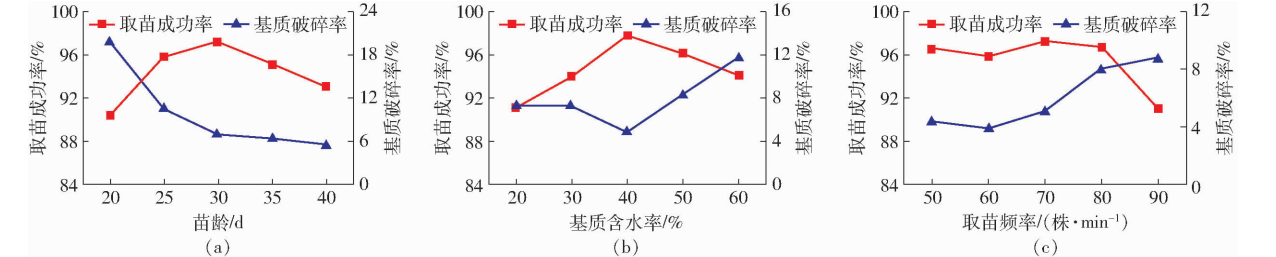


图 9 单因素试验结果
Fig. 9 Univariate test results

基质含水率大于 40%，取苗成功率下降。经仔细观察分析后发现，苗盘中劣苗的根系不发达，在基质含水率较大时，基质松散，一些劣苗出现歪倒的现象，导致钵苗定位不准，造成取苗成功率下降。同时基质松散也导致基质破碎率增大，在含水率达到 60% 时，基质破碎率达到最大，为 11.76%。以上分析可知，最佳取苗参数在基质含水率 30% ~ 50% 之间。

3.2.3 取苗频率对取苗效果的影响

选取苗龄 30 d 的辣椒苗，基质含水率 40%，取苗频率以 50、60、70、80、90 株/min 5 个水平设计单因素试验，每组试验重复进行 3 次取平均值，每次试验取苗 144 株，试验结果如图 9c 所示。

如图 9c 所示，取苗频率在 50 ~ 80 株/min 之间，取苗成功率均大于 95.00%。在达到 80 株/min 后开始下降，取苗频率为 90 株/min 时，苗杯运动速度过快，导致投苗出现误差，取苗成功率下降到最小，为 90.97%。基质破碎率随着取苗频率的上升开始逐渐增加。取苗频率在 50 ~ 70 株/min 之间时，基质破碎率均小于 4.50%。随着取苗频率的继续增加，机器振动加剧，导致基质破碎率快速增加，取苗频率达到 90 株/min 时，基质破碎率达到 9.02%。由以上分析可知，取苗频率在 50 ~ 70 株/min 时，取苗成功率及基质破碎率变化趋势不显著。在保证取苗成功率高、基质破碎率低的情况下，最佳取苗参数应选择较高的取苗频率，最佳取苗参数在 70 ~ 90 株/min 之间。

3.3 多因素仿真试验分析

3.3.1 正交试验设计

为了验证苗龄、基质含水率与取苗频率 3 个因素之间的交互对取苗效果的影响，采用 Design-Expert 8.0 软件 Box – Behnken 响应曲面分析法设计三因素三水平正交试验，共有 17 组试验，每组试验 2 次，每次取 144 株苗，试验结果取平均值。

根据单因素试验结果，选取工作气压 0.5 MPa 作为基准参数，在钵苗苗龄 (30 ± 5) d，基质含水率 40% ± 10%，取苗频率 (80 ± 10) 株/min 范围内进行细分并设计正交试验，正交试验的因素编码如表 1 所示。

表 1 正交试验因素编码
Tab.1 Orthogonal test coding

编码	因素		
	苗龄 A/d	基质含水率	取苗频率 C/
		B/%	(株·min ⁻¹)
-1	25	30	70
0	30	40	80
1	35	50	90

3.3.2 试验结果与分析

试验结果采用 Design-Expert 8.0 软件进行数据处理与分析，采用 Box – Behnken 响应曲面分析法分别建立苗龄、基质含水率、取苗频率两两交互对取苗成功率、基质破碎率影响的数学模型。试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

序号	因素			取苗成功 率/%	基质破碎 率/%
	苗龄 A/d	基质含水 率 B/%	取苗频率 C/ (株·min ⁻¹)		
1	30	40	80	97.40	7.41
2	30	30	90	91.67	12.50
3	35	50	80	97.92	10.32
4	30	50	70	97.18	5.97
5	35	30	80	94.44	5.65
6	25	50	80	96.67	9.09
7	35	40	70	96.55	5.80
8	30	40	80	95.31	6.38
9	30	50	90	90.00	10.17
10	35	40	90	92.31	6.06
11	30	40	80	96.97	5.77
12	30	40	80	97.26	7.58
13	30	30	70	98.28	4.00
14	25	40	90	92.42	17.05
15	25	30	80	93.75	13.89
16	25	40	70	95.52	8.70
17	30	40	80	98.46	5.57

表 3 为响应面拟合方差分析的结果，由表 3 中的 P 值表明，对取苗成功率的影响顺序从大到小为取苗频率、基质含水率、苗龄。而取苗频率的 P 值小于 0.05，说明取苗频率对取苗成功率具有显著性影响。对基质破碎率影响程度从大到小排序分别为苗龄、取苗频率、基质含水率，苗龄与取苗频率的 P 值均小于 0.05，说明苗龄与取苗频率对基质破碎率的影响显著。

表 3 方差分析结果
Tab.3 Result of variance analysis

指标	因素	平方和	F	P
取苗成功率	A	1.02	0.34	0.577 9
	B	1.65	0.55	0.483 1
	C	55.81	18.58	0.003 5
基质破碎率	A	112.43	26.24	0.001 4
	B	6.84	1.60	0.246 7
	C	67.92	15.85	0.005 3

根据 Design-Expert 8.0 软件获得两两因素交互对取苗效果的数学模型，利用 Origin 2021 软件绘制各因素交互作用对取苗效果影响的 3D 响应曲面

图,图 10 为各因素对取苗成功率影响的响应面图,由图 10a 可以看出,苗龄与基质含水率变化时,取苗成功率均在 95.00% ~ 98.00% 之间。苗龄与基质含水率增大时取苗成功率均出现先增加后减小的趋势,但取苗成功率变化趋势不明显,说明在选取参数范围内苗龄与基质含水率对取苗成功率的影响并不显著。由图 10b 可以看出,苗龄逐渐增大时,取苗成功率存在先增加后减小的趋势,但该趋势并不明显,

但随着取苗频率的增加,取苗成功率先趋于稳定,达到 84 株/min 时,取苗成功率开始快速下降。在苗龄 25 d、取苗频率 90 株/min 时,取苗成功率达到最小,为 91.49%,说明取苗频率对取苗成功率影响显著。由图 10c 可知,基质含水率的增长对取苗成功率的影响并不显著,随着取苗频率的增加,取苗成功率先稳定后下降。图 10b、10c 表明取苗频率对取苗成功率影响显著。

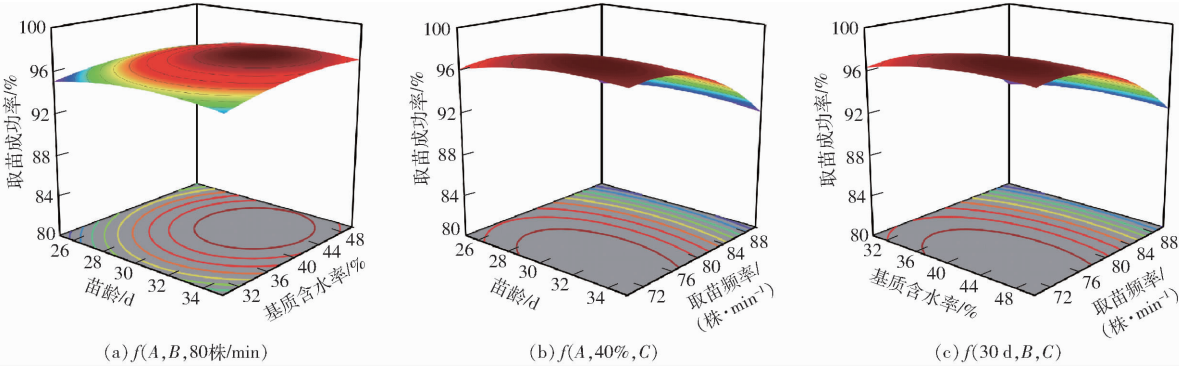


图 10 因素交互作用对取苗成功率影响的响应曲面
Fig. 10 Effects of interaction on success rate of seeding dropping

图 11 为各因素交互作用对基质破碎率影响的响应曲面图,图 11a 表明,基质破碎率随着苗龄的增加而显著减小,随着基质含水率的增加而减小,说明苗龄与基质含水率对基质破碎率有显著影响,苗龄 25 d、基质含水率为 30% 时,基质破碎率最大,达到 12.28%。另外基质破碎率随苗龄的下降速率大于随基质含水率下降速率,说明苗龄对基质破碎率的影响大于基质含水率。且当苗龄 25 d 时基质破碎率随着基质含水率的下降速率,大于 35 d 时基质破碎率随着基质含水率的下降速率,造成这种现象的原因是随着苗龄的增大,钵苗根系对基质的缠绕更强,减弱了基质含水率对基质破碎率的影响。图 11b 表明,随着取苗频率的增加,基质破碎率呈现出逐渐增大的趋势,且随着苗龄减小,取苗频率增大时,基质破碎率增长的速率明显加快,说明苗龄与取苗频率均对基质破碎率具有显著影响。当苗龄 25 d、取苗频率为 90 株/min 时,钵苗根系难以包裹

基质,加之取苗频率增大机器振动剧烈,在苗龄与取苗频率的交互作用下,基质破碎率达到最大 (17.90%)。从等高线可以看出,在苗龄低于 28 d、取苗频率大于 86 株/min 时,基质破碎率快速增加,说明苗龄与取苗频率在该区间对基质破碎率的交互影响加大。由图 11c 可知,取苗频率在 70 ~ 84 株/min 内时,随着基质含水率的上升基质破碎率总体上也呈现上升趋势。但随着取苗频率继续增加,取苗频率对基质破碎率的影响效果呈现出显著变化的趋势,取苗频率对基质破碎率的影响大于基质含水率的影响。在取苗频率大于 84 株/min 时,机器振动加大,基质含水率较低时,基质粘性下降,两方面的交互作用下,基质破碎率达到最大。

3.4 取苗参数优化及验证

正交试验结果表明,苗龄、基质含水率及取苗频率均对取苗效果有较大影响,为获得最佳取苗效果,以取苗成功率最高、基质破碎率最低为优化目标,采

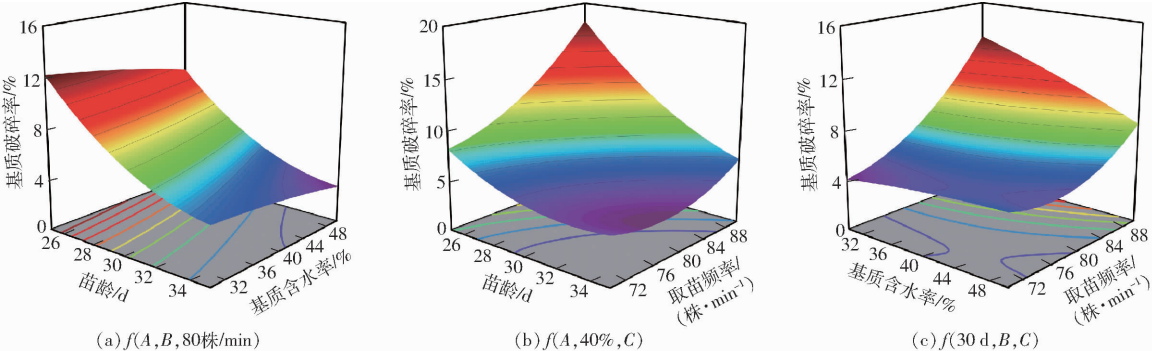


图 11 因素交互作用对基质破碎率影响的响应曲面
Fig. 11 Effects of interaction on damage rate of substrate

用 Design-Expert 8.0 软件进行优化求解,取苗参数在苗龄 33 d、基质含水率 46%、取苗频率 75 株/min 时取苗效果最佳。在此取苗条件下,软件求解出取苗成功率为 98.02%,基质破碎率为 3.89%。

结合优化后的取苗参数对取苗机构进行验证试验^[30],试验在工作气压 0.5 MPa 的环境下进行,以山东德瑞康蔬菜种苗有限公司培育的瑞苗 9 号辣椒苗作为试验对象,共进行 5 组试验,每组试验用苗 72 株,图 12 为试验平台取苗试验。试验结果如表 4 所示。



图 12 试验平台取苗试验

Fig.12 Seedling test results of test platform

由试验结果可知,平均取苗成功率为 97.36%,平均基质破碎率为 5.07%,满足移栽作业要求。

4 结论

(1)根据移栽作业需求,设计夹茎式取苗装置,通过建立分苗机构力学模型及进行夹苗机构结构设计及力学分析,搭建取苗试验装置,实现移栽取苗、

表 4 作业性能试验结果

Tab.4 Operation performance verification test results

%		
序号	取苗成功率	基质破碎率
1	98.61	3.91
2	95.83	4.55
3	97.22	4.84
4	97.22	5.60
5	97.92	6.47
平均值	97.36	5.07

投苗一体化作业。

(2)以苗龄、基质含水率、取苗频率为试验因素开展单因素试验,苗龄在 30 d 时取苗成功率达到 97.22%,且基质破碎率下降趋于平稳,基质含水率在 40% 时,取苗成功率最大为 97.40%,且基质破碎率最小为 4.5%,取苗频率在大于 80 株/min 时,取苗成功率及基质破碎率逐渐下降。

(3)正交试验表明,影响取苗试验装置取苗成功率因素从大到小分别为取苗频率、基质含水率、苗龄;影响基质破碎率因素从大到小排序分别为苗龄、取苗频率、基质含水率;取苗频率以及苗龄对取苗效果有显著影响。根据试验结果对取苗参数进行优化,在苗龄 33 d、基质含水率 46%、取苗频率 75 株/min 时进行取苗性能试验,试验结果表明,平均取苗成功率为 97.36%,平均基质破碎率为 5.07%,满足移栽的作业要求。

参 考 文 献

[1] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2022,53(9):1-20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):1-20. (in Chinese)

[2] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1):1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):1-18. (in Chinese)

[3] 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.
HU Jianping, CHANG Hang, YANG Lihong, et al. Design and experiment of control system for whole row and interval seeding of automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):78-84. (in Chinese)

[4] 崔巍,赵亮,刘立晶,等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):79-84,98.
CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Parameter optimization and experiment of seedling picking mechanism for second order elliptical planet gear train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):79-84,98. (in Chinese)

[5] 谢守勇,阳尚宏,刘军,等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取投苗装置研制[J]. 农业工程学报,2020,36(6):1-10.
XIE Shouyong, YANG Shanghong, LIU Jun, et al. Development of tilting pot seedling taking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(6):1-10. (in Chinese)

[6] DONG Zhe, LI Shujun, YAN Hua, et al. A variable step precision conveyer for automatic tray seedling transplanters[J]. International Agricultural Engineering Journal,2014,23(1):23-29.

[7] 韩长杰,杨宛章,张学军,等. 穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(8):51-61.
HAN Changjie, YANG Wanzhang, ZHANG Xuejun, et al. Design and experiment of automatic feeding system for pot-plate seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(8):51-61. (in Chinese)

[8] 胡建平,刘育彤,刘伟,等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊):110-117,184.
HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experimental study on the combined plant-taking device of vegetable automatic transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.):110-117,184.

(in Chinese)

- [9] 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.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, ZHANG Yu, et al. Development of vegetable pot-plate seedling insertion and ejection device for taking seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 96–104. (in Chinese)
- [10] TRANSPLANT Systems. Urbinati RW3 transplanter [EB/OL]. [2022-09-21]. <https://transplantsystems.com.au/products/machinery/transplanter/trays/urbinati-rw32transplanter/>.
- [11] RAHUL K, RAHEMAN H, PARADKAR V. Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105014.
- [12] 袁挺, 王栋, 文永双, 等. 蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 80–87.
YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of pneumatic vibration compound seedling taking mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 80–87. (in Chinese)
- [13] 洋马中国. 洋马乘坐式全自动蔬菜移栽机[EB/OL]. [2023-01-20]. <https://www.yanmar.com>.
- [14] WAN ISHAN W I, AWAL M A, ELANGO R, et al. Development of an automatic transplanter for the gantry system[J]. Asian Journal of Scientific Research, 2008, 1(4): 451–457.
- [15] 尹大庆, 张烁, 辛亮, 等. 玉米钵苗顶出式有序分秧机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 68–74.
YIN Daqing, ZHANG Shuo, XIN Liang, et al. Design and experiment of pot seedling ejection mechanism for orderly seedling separation of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 68–74. (in Chinese)
- [16] 倪有亮, 金诚谦, 刘基. 全自动移栽机取送苗系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 10–19.
NI Youliang, JIN Chengqian, LIU Ji. Design and experiment of seedling delivery system of automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 10–19. (in Chinese)
- [17] 赵雄, 王川, 杨茂祥, 等. 非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 30–36.
ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling taking mechanism of non-circular gear planetary gear train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30–36. (in Chinese)
- [18] 王永维, 何焯亮, 王俊, 等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 19–25.
WANG Yongwei, HE Chaoliang, WANG Jun, et al. Experimental study on planting performance of automatic pot seedling transplanting machine for dryland vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 19–25. (in Chinese)
- [19] 尹大庆, 王佳照, 周脉乐, 等. 探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 64–71.
YIN Daqing, WANG Jiazhao, ZHOU Maile, et al. Optimization design and experiment of pot-taking mechanism of vegetable pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 64–71. (in Chinese)
- [20] YANG Qizhi, XU Li, SHI Xinyi, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its control system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 131–145.
- [21] 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, 2020, 52(5): 35–43, 51.
WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic under pressure high speed seedling taking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 52(5): 35–43, 51. (in Chinese)
- [22] 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 bottom air-blown pot release device for vegetable pot-tray rearing[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 37–45. (in Chinese)
- [23] 叶秉良, 刘安, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 57–62.
YE Bingliang, LIU An, YU Gaohong, et al. Optimization and experiment of man-machine interaction parameters of seedling taking mechanism of vegetable pot seedling transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 57–62. (in Chinese)
- [24] 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 70–78.
YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and experiment of rotating pot seedling taking mechanism for vegetable[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 70–78. (in Chinese)
- [25] WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, TIAN Jinyuan, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.
- [26] 冯世杰, 吴明亮, 颜波, 等. 顶出托举式钵苗脱盘装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 50–58.
FENG Shijie, WU Mingliang, YAN Bo, et al. Design and experiment of ejector pot seedling dismounting device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 50–58. (in Chinese)
- [27] 段慧文. 剪叉机构计算与虚位移原理[J]. 演艺科技, 2012(5): 33–37, 46.
DUAN Huiwen. Calculation and principle of virtual displacement of shearing fork mechanism[J]. Science and Technology for Performing Arts, 2012(5): 33–37, 46. (in Chinese)
- [28] 胡静, 韩绿化, 温贻芳, 等. 与自动移栽相关的不同蔬菜穴盘苗力学特性[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 132–136.
HU Jing, HAN Lühua, WEN Yifang, et al. Mechanical characteristics of different vegetable pot-plate seedlings related to automatic transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 132–136. (in Chinese)
- [29] HAN C, HU X, ZHANG J, et al. Design and testing of the mechanical picking function of a high-speed seedling auto-transplanter[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2021, 5(1): 64–71.
- [30] 任玲, 赵斌栋, 曹卫彬, 等. 穴苗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.
REN Ling, ZHAO Bindong, CAO Weibin, et al. Design of double rotary seedling separation device in hole seedling transplanting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 10–18. (in Chinese)