

蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验

王超 刘彩玲 李永磊 宋建农 王继承 董向前

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 目前,蔬菜移栽机取苗机构单行取苗频率为 40~90 株/min,取苗频率低已成为蔬菜高速移栽(≥ 90 株/min)技术及装备的发展瓶颈。为实现高速取苗作业,设计了一种气动下压式高速取苗装置及配套组合式穴盘,通过“有序供盘、连续送苗、气动下压取苗、自由投苗”等作业工序,可实现 120 株/min 的高速取苗作业。建立了取苗过程钵苗力学模型,对气动取苗机构取苗单体布置形式、取苗气缸工作压力、顶苗器运动轨迹等进行分析和计算,优化顶苗器 U 型末端结构,设计并构建高速取苗时序控制系统。以 60 d 苗龄辣椒苗为试验对象,在气缸工作压力为 0.26 MPa、取苗频率为 120 株/min 条件下,以取苗成功率、基质破损率和茎叶损伤率为取苗效果评价指标进行了取苗试验。试验表明:取苗成功率平均值为 100%,基质破碎率平均值为 22.46%,茎叶损伤率平均值为 3.54%,能够满足蔬菜高速移栽的取苗作业要求。

关键词: 蔬菜移栽机; 气动下压; 取苗装置; 高速取苗时序; U 型末端

中图分类号: S223.94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0035-09 OSID: 

Design and Experiment of Pneumatic Punching High-speed Seedling Picking Device for Vegetable Transplanter

WANG Chao LIU Cailing LI Yonglei SONG Jiannong WANG Jicheng DONG Xiangqian
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The current seedling picking device used for vegetable transplanter was restricted by the working principle and mechanical structure, the frequency of picking seedling was mostly 40~90 plants/min per row, seedling picking had become a bottleneck restricting the development of technology and equipment for high-speed vegetable transplanting (≥ 90 plants/min). In order to realize the high-speed seedling picking operation, a pneumatic punching high-speed seedling picking device and supporting combined plug tray were designed. Through the operation process of “supplying tray orderly, conveying tray continuously, punching seedlings pneumatically and feeding seedlings freely”, the high-speed seedling picking operation at the frequency of 120 plants/min was realized. The mechanics model of seedlings in the process of punching was constructed, the layout of the pneumatic punching seedling monomer, the working pressure of the seedling picking cylinder, and the movement trajectory of the seedling ejector were analyzed and calculated. The structure and size of the U-shaped end of the ejector were optimized, the high-speed seedling picking sequence control system was designed and built. Taking 60 d seedling-age pepper seedlings as the experimental object, under the conditions of cylinder working pressure of 0.26 MPa and frequency of picking seedlings at 120 plants/min, seedling picking experiments were carried out by taking seedling picking success rate, matrix damage rate and stem and leaf damage rate as evaluation indicators of seedling picking effect. The result of experiments showed that the average success rate of seedling picking was 100%, the average substrate breaking rate was 22.46%, and the average stem and leaf damage rate was 3.54%, which met the requirements of high-speed seedling picking operation.

Key words: vegetable transplanter; pneumatic punching; seedling picking device; high-speed seedling picking sequence; U-shaped end

收稿日期: 2020-12-17 修回日期: 2021-03-03
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700302)
作者简介: 王超(1990—),男,博士生,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: 1416886579@qq.com
通信作者: 宋建农(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: songjin@cau.edu.cn

0 引言

目前,我国蔬菜移栽机仍由人工完成取苗作业,其劳动强度大且作业效率低,受限于人工取苗速度,移栽频率仅为 $25 \sim 40$ 株/min^[1],这制约了蔬菜产业的快速发展。

国内外学者对取苗装置进行了广泛研究,提出并设计了插入夹取式^[2-7]、顶出式^[8-9]、顶出夹取式^[10-12]、气力式^[13-15]和其他形式^[16-18]的取苗机构,以及相应取苗末端执行器^[19-20]。基于向上取苗原理的插入夹取式取苗机构,其取苗频率多为 $40 \sim 90$ 株/min^[2-6],当取苗频率大于 70 株/min 时,机构的变速转动或摆动使苗针冲击振动和惯性力显著增大,钵体破损率增大,夹苗稳定性降低,从而出现脱苗或甩苗等取苗失败现象,导致取苗成功率降低^[3]。基于向上取苗原理的机构因取苗、投苗运动方向和空间位置不一致,苗针必须按特殊轨迹变速运转,经过迎穴扎苗、拔苗取出、携苗转运和推苗投出等繁琐步骤才能完成单次取投苗作业^[21-22],因此很难提高取苗频率。研究者在同类取苗机构上进行了动力学研究和优化改进^[23-26],冲击振动和惯性力略有改善,但依然很难突破。

高速移栽机移栽频率不小于 90 株/min^[27],取苗作业高速化是实现高速移栽的关键和前提^[28]。因此,研究结构合理、取苗效果良好的高速取苗装置对提高蔬菜移栽机作业效率、减轻劳动强度和促进蔬菜产业发展具有重要意义^[7]。本文基于向下取苗原理设计一种气动下压式高速取苗装置及配套组合式穴盘。通过理论与试验分析,对关键部件进行设计与参数优选,以辣椒苗为试验对象进行取苗试验,以验证装置的取苗原理和该机构高速取苗的可行性,为开发轻简型高速取苗装置提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

本文设计的气动下压式高速取苗装置如图1所示,主要由机架、供盘机构、送苗机构、气动取苗机构、投苗锥斗和控制系统等组成。供盘机构通过供盘链驱动电机驱动供盘链,对称安装的供盘链上各有一个加长销轴,与最上方托盘层侧边铰接,托盘层由吊线串联成多层结构;送苗机构通过送苗链驱动电机传动对称布置的送苗链,送苗链整周上均布加长销轴作为送苗拨杆,送苗底板紧固在送苗链之间,前端有配合下压取苗镂空处;气动取苗机构安装在送苗底板镂空处上方;控制柜通过电气连接控制供

盘机构和送苗机构,通过气动连接控制推盘气缸和气动取苗机构。

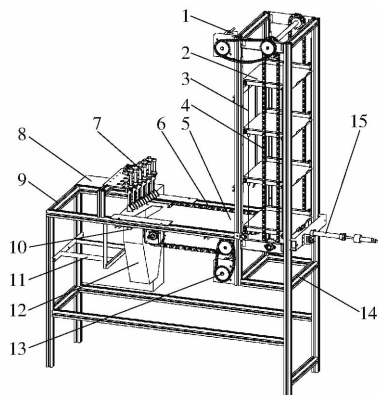


图1 气动下压式高速取苗装置结构简图

Fig.1 Structure diagram of pneumatic punching high-speed seedling picking device

1. 供盘链驱动电机 2. 托盘层 3. 吊线 4. 供盘链 5. 送苗底板 6. 送苗链 7. 气动取苗机构 8. 控制柜 9. 机架 10. 取苗位置传感器 11. 空盘收集架 12. 投苗锥斗 13. 送苗链驱动电机 14. 托盘层放置架 15. 推盘气缸

与装置配套使用的组合式穴盘如图2所示。组合式穴盘穴孔为上下通透的正四棱台形,幼苗生长在 6×6 的36孔组合式穴盘内。为避免茎叶穿过穴孔时下落不畅或损伤,经落苗通过率试验,穴孔设计如图2所示,相邻穴孔中心距是 45 mm。无底穴盘两侧有6个间距 45 mm 的侧筋,用于被送苗链送苗拨杆驱动和取苗位置传感器检测第1取苗时序。

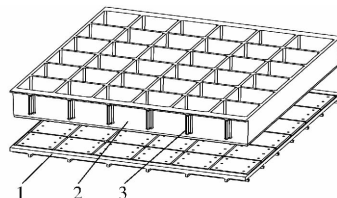


图2 组合式穴盘示意图

Fig.2 Structure diagram of combined tray

1. 育苗底板 2. 无底穴盘 3. 穴盘侧筋

1.2 工作原理

气动取苗机构是整个装置核心部件,穴盘具有成行成列等距穴孔,采用成排取苗单体可以避免使用限制作业效率提升的横向移箱机构,能显著提高取苗频率。气动取苗机构结构如图3所示,包括安装板和与无底穴盘各行穴孔对应的6个取苗机构单体(以下简称取苗单体)。取苗单体包括取苗气缸和安装在活塞杆上的顶苗器。

作业时将载苗无底穴盘(以下简称苗盘)放置到托盘层上,装置按如下作业工序进行高速取苗作业:①有序供盘:供盘链间歇向下移送托盘层,托盘层与送苗底板平齐时,推盘气缸将苗盘向送苗底板方向推出合适距离。②连续送苗:送苗链送苗拨杆

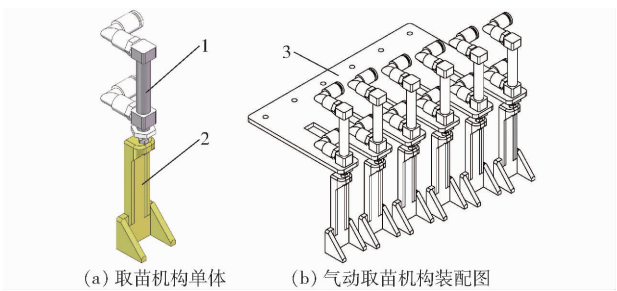


图 3 气动取苗机构结构示意图

Fig.3 Schematics of pneumatic seedling picking mechanism

1. 取苗气缸 2. 顶苗器 3. 安装板

拨动苗盘穴盘侧筋,匀速输送苗盘经过气动取苗机构下方,运动方向如图 4a 箭头所示。③气动下压取苗:高速取苗时序控制系统控制气动取苗机构各行取苗单体顶苗器依次对准动态运动穴孔,下压钵苗后复位,完成取苗(图 4b)。④自由投苗:被压出钵苗按时序落入投苗锥斗,在重力作用下沿投苗锥斗倾斜侧壁下滑至出口自由投苗。

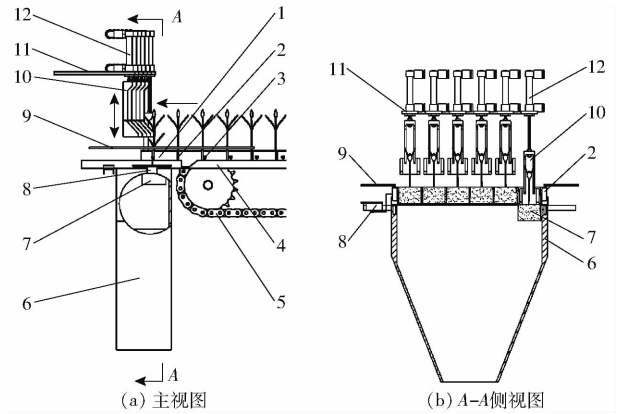


图 4 气动下压取苗工作原理图

Fig.4 Working principle diagram of pneumatic punching seedling picking

1. 载苗无底穴盘 2. 穴盘侧筋 3. 送苗拨杆 4. 送苗底板 5. 送苗链 6. 投苗锥斗 7. 钵苗 8. 取苗位置传感器 9. 压盘板 10. 顶苗器 11. 安装板 12. 取苗气缸

每行取苗单体在苗盘输送方向上等距间隔,呈斜线布置(图 5)。当苗盘某行第 1 行穴孔对齐第 1 行取苗单体顶苗器时,穴盘侧筋触发取苗位置传感器到达第 1 取苗时序(图 5a)。在 1 个取苗时序间隔内,控制系统控制第 1 行取苗单体顶苗器下压取苗并复位,同时苗盘前进一段距离,第 2 行穴孔与第 2 行取苗单体对齐,到达第 2 取苗时序(图 5b);剩余 4 行穴孔按相同规律依次与对应行取苗单体动态对准,到达后续 4 个取苗时序并完成下压取苗。连续 6 个取苗时序和下压取苗后,为了消除送苗链累积运动误差,由下一个穴盘侧筋触发取苗位置传感器正时下一行第 1 取苗时序,开始下一行高速取苗时序和下压取苗。

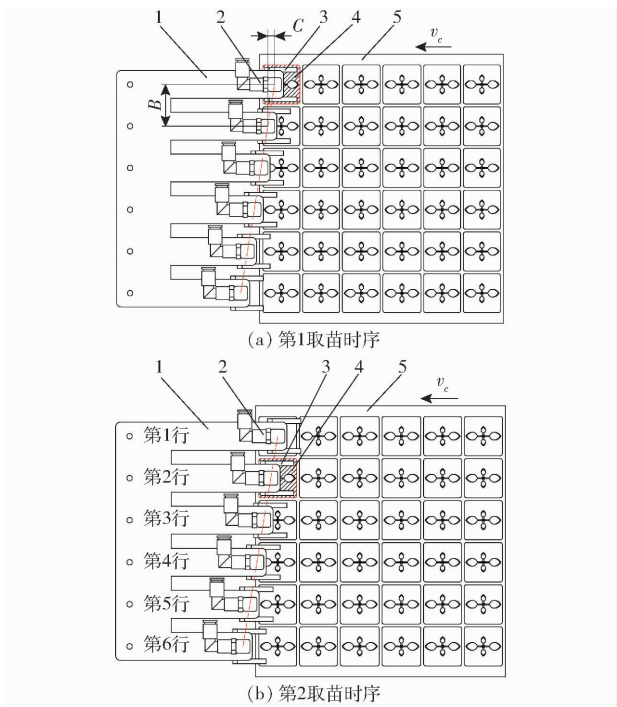


图 5 高速取苗时序示意图

Fig.5 Schematics of high-speed seedling picking sequence

1. 安装板 2. 取苗气缸 3. 顶苗器 4. 当前所取钵苗 5. 无底穴盘

2 关键部件设计

2.1 钵体力学模型

钵体与穴孔壁之间存在粘附力和摩擦力作用,下压钵苗是驱动钵体脱离穴孔壁粘附力以及摩擦力的过程^[29]。顶苗器压出过程中钵体受力如图 6 所示,图中 θ 为苗钵侧边角, 0.95° 。

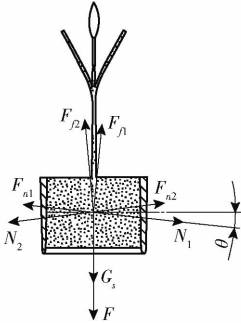


图 6 钵苗受力示意图

Fig.6 Schematic of stress analysis of seedling

钵体在 4 个侧面上受到的摩擦力 F_{fi} 、粘附力 F_{ni} 和正压力 N_i 可认为相等。若为了使钵体脱离穴孔壁并保持钵体完好,则顶苗器作用在钵体上表面的取苗力 F 应满足

$$4(F_{fi}\cos\theta + F_{ni}\sin\theta - N_i\sin\theta) - G_s \leq F \leq F_{\sigma} \quad (1)$$

式中 G_s ——钵苗重力, N

F_{σ} ——钵体上表面抗穿刺屈服力, N

钵体脱盘力一定程度上反映为:钵体 4 个侧面

受到穴孔壁摩擦力 F_{fi} 、粘附力 F_{ni} 和正压力 N_i 在竖直方向的综合作用与钵苗重力之差,即

$$F_T \approx 4(F_{fi} \cos \theta + F_{ni} \sin \theta - N_i \sin \theta) - G_s \quad (2)$$

式中 F_T ——钵体脱盘力, N

对苗盘中钵苗进行钵体脱盘力学试验,测出钵体脱盘力 F_T 为 (15.8 ± 3.8) N;为了保证可靠压出, F_T 取 19.6 N。钵体上表面抗穿刺屈服力 F_{σ} 等于顶苗器末端作用面积与钵体上表面许用抗穿刺屈服强度乘积。

根据式(1)和式(2)可得取苗力 F 范围为

$$F_T \leq F \leq F_{\sigma} \quad (3)$$

2.2 气动取苗机构参数设计

2.2.1 取苗气缸选型与工作压力

为实现成功取苗,下压取苗有效行程应大于穴孔深度即 30 mm,顶苗器末端距钵体上表面的位置不应超过最低茎叶生长点,综合各因素选用工作行程为 50 mm,缸径为 10 mm,CDJ2KB10-50 型双作用不回转气缸,最大工作气压 0.7 MPa,最大下压力 54.98 N。

将气缸活塞杆和顶苗器视为一个刚体进行受力分析,活塞杆伸出时顶苗器向下合力即为取苗力 F ,即

$$F = pS_p + G_p - F_{fc} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)得到不等式

$$\frac{F_T + F_{fc} - G_p}{S_p} \leq p \leq \frac{F_{\sigma} + F_{fc} - G_p}{S_p} \quad (5)$$

式中 p ——取苗气缸工作压力, MPa

S_p ——活塞有效作用面积,约 $7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

G_p ——活塞、活塞杆与顶苗器重力,为 0.2 N

F_{fc} ——取苗气缸壁对活塞杆的摩擦力,约为 1 N

根据式(5)计算得到顶苗器压出钵苗所需取苗气缸工作压力 p 最小为 0.26 MPa。

2.2.2 取苗单体斜线布置

取苗单体的横向间距等于穴孔间距 $B = 45 \text{ mm}$;取苗单体的纵向间距 C 应满足:第 6 取苗时序开始一个取苗时序间隔内,苗盘前进距离使下一行第 1 列穴孔与第 1 列取苗单体对准(或与取苗位置传感器检测下 1 行第 1 取苗时序同时发生)。故 6 次取苗时序总时长内,送苗链以线速度 v_c 移送苗盘位移等于穴孔间距 B 。送苗链速度 v_c 计算式为

$$v_c = \frac{C}{t_p} \quad (6)$$

其中 $C = \frac{B}{6} \quad t_p = \frac{60}{f}$

式中 t_p ——取苗时序间隔, s

f ——取苗频率,为 120 株/min

通过计算取苗时序间隔 t_p 为 0.5 s,取苗单体纵向间距 C 为 7.5 mm,送苗链线速度 v_c 为 0.015 m/s。

2.2.3 顶苗器运动学分析

苗盘连续输送使得顶苗器在下压取苗作业时与穴孔有水平相对位移,包括下压取苗相对运动位移和复位相对位移。需对顶苗器进行运动学分析,研究其与穴孔之间的相对运动轨迹,为顶苗器末端结构和尺寸设计提供参考,防止两者发生运动干涉。

顶苗器下压取苗阶段顶苗器和穴孔运动关系为

$$\begin{cases} H = \frac{(pS_p + G_p - F_f)gt_1^2}{2G_p} \\ x_1 = v_c t_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 H ——取苗气缸工作行程,为 50 mm

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

t_1 ——顶苗器下压行程时间, s

x_1 —— t_1 时间内穴孔位移, mm

顶苗器复位阶段顶苗器和穴孔运动关系为

$$\begin{cases} H = \frac{[p(S_p - S_r) - G_p - F_{fc}]gt_2^2}{2G_p} \\ x_2 = v_c t_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 S_r ——活塞杆面积,约为 $1.39 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

t_2 ——顶苗器复位行程时间, s

x_2 —— t_2 时间内穴孔位移, mm

顶苗器下压取苗和复位阶段穴孔位移为

$$x = x_1 + x_2 = v_c \left\{ \sqrt{\frac{2HG_p}{(pS_p + G_p - F_{fc})g}} + \sqrt{\frac{2HG_p}{[p(S_p - S_r) - G_p - F_{fc}]g}} \right\} \quad (9)$$

式中 x —— t_1 和 t_2 时间内穴孔位移, mm

按式(9)计算顶苗器在一次下压和复位中,与穴孔水平相对位移 x 约为 0.32 mm,在 Matlab 中绘制其相对穴孔运动轨迹,如图 7 所示, x 轴为顶苗器相对于穴孔水平方向位移, y 轴为顶苗器位移,以复位时顶苗器末端所在位置为坐标原点。

2.2.4 顶苗器末端结构设计和参数确定

为了减小下压取苗过程中钵体受力不平衡及茎叶损伤,应在钵体上表面靠近穴孔处施加取苗力。由于送苗链连续移送苗盘,顶苗器与秧苗在苗盘前进方向有相对运动,需要防止顶苗器直接碰撞秧苗茎秆,造成压弯折断等硬性损伤,应保证顶苗器避开穴孔中央茎秆生长点集中区域,因此顶苗器末端设计为 U 型,如图 8 所示。U 型末端的侧边 I/II 作用取苗力于钵体上表面靠近 3 个侧边处,钵体受力较为平衡,变形较小;U 型末端中空腔容纳茎秆进入,

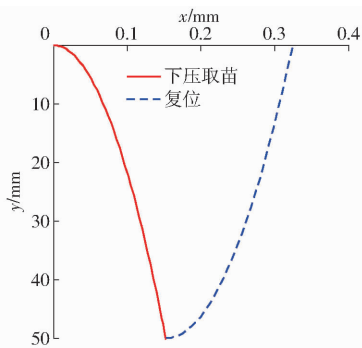


图 7 顶苗器在一次取苗时序中相对穴孔运动轨迹
Fig. 7 Motion trajectory of seedling ejector relative to hole in one operation of seedling picking sequence

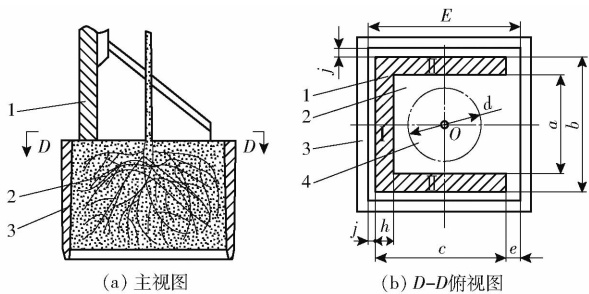


图 8 顶苗器 U 型末端几何模型及其与钵体上表面接触瞬时位置关系示意图
Fig. 8 Schematics of geometric model of U-shaped end of seedling ejector and instantaneous positional relationship between it and upper surface of pot
1. 顶苗器 U 型末端 2. 钵体 3. 穴孔侧壁 4. 茎秆生长点集中区域

同时 U 型末端侧边 II 上边沿设计为向下斜线并对棱边倒角,降低茎叶下降过程中与侧边 II 接触时通过阻力和接触压强,实现低损快速下落。

顶苗器为 3D 打印而成,根据其结构强度,将 U 型末端侧边 I 厚度 h 设为 5 mm;根据预试验机构运行精度,将 U 型末端侧边 I / II 外侧与穴孔边缘间隙 j 设为 2 mm,则侧边 II 外宽 b 为 37 mm;随机选取一盘苗测得秧苗茎秆生长点集中区域直径 d 为 20 mm, U 型末端不压倒茎秆的条件为

$$a \geq d \tag{10}$$

式中 a ——U 型末端侧边 II 开口端内宽,mm

在复位过程中 U 型末端侧边 II 与茎叶相对高速接触,经试验,较薄的侧边 II 会对茎叶产生“切割”效应造成茎叶损伤, U 型末端侧边 II 的壁厚宜选为 5 mm,此时可显著减轻侧边 II 对茎叶的“切割”效应。则侧边 II 内宽 $a = b - 2 \times 5 = 27$ mm。

U 型末端纵向长度 c 计算式为

$$c = E - j - e \tag{11}$$

其中

$$e = j + x$$

式中 e ——U 型末端侧边 II 前端与穴孔边缘间隙,mm
 E ——穴孔内宽,mm

按式(11)计算, e 取整为 3 mm,则 c 为 36 mm。

为最大限度保证钵体根土结构完整性和根系不受损伤,U 型末端对钵体上表面作用压力应小于钵体上表面许用抗穿刺屈服强度 $[\sigma]$,穴盘苗钵为根土复合体,借助穿刺试验测得其许用抗穿刺屈服强度,计算公式为

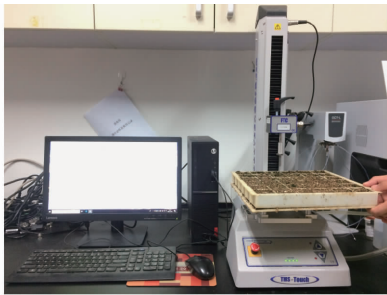
$$[\sigma] = \frac{kF_Q}{S_\sigma} \tag{12}$$

式中 k ——安全系数,取 1.2 ~ 1.5

F_Q ——钵体上表面平探头穿刺屈服压力,N

S_σ ——平探头接触面积, m^2

穿刺试验用苗为“国福 419”辣椒品种,育苗基质中泥炭、珍珠岩、蛭石体积比为 3:1:1,苗龄 66 d,平均苗高 145 mm,平均叶展为 118 mm,平均茎粗为 3.87 mm。试验前用剪刀沿钵体上表面将秧苗剪去。在 TMS - Touch 型质构仪上使用直径 2 mm 平探头 P2(图 9a),在顶苗器 U 型末端侧边 I / II 作用区域内选取穿刺试验位置(图 9b),进行钵体上表面穿刺试验。测得钵体上表面平探头穿刺屈服压力为 (0.47 ± 0.09) N,安全系数设为 1.5,求得钵体上表面许用抗穿刺屈服强度约为 0.226 MPa。穿刺试验后测得钵体基质含水率为 67.51% ~ 69.54%。钵体内部由于根系盘结和加筋作用,内部抗穿刺及抗压屈服强度增强。虽然表层基质被平探头穿刺破坏,表现为表层局部基质颗粒压缩凹陷屈服和剪切破坏,苗钵主体抗穿刺屈服强度大于测试值。



(a) TMS-Touch 型质构仪



(b) 在顶苗器 U 型末端侧边 I / II 作用区域内选取穿刺试验位置

图 9 钵体上表面许用抗穿刺屈服强度试验

Fig. 9 Permissible puncture resistance yield strength test on upper surface of bowl

U 型末端与钵体间作用力和钵体脱盘力 F_T 相等,U 型末端在钵体上表面作用面积 S_0 和作用压力 σ 计算式为

$$S_U = (c - 5)(b - a) + 5b \tag{13}$$

$$\sigma = \frac{F_r}{S_U} \approx 0.040 \text{ MPa} \leq [\sigma] \tag{14}$$

经式(14)计算校核,U型末端在钵体上表面作用压力小于钵体上表面许用抗穿刺屈服强度,不会对钵体造成破坏。

钵体上表面抗穿刺屈服力计算式为

$$F_{\sigma} = [\sigma] S_U \tag{15}$$

按式(5)计算取苗气缸工作压力 p 范围为

$$0.26 \text{ MPa} \leq p \leq 1.44 \text{ MPa} \tag{16}$$

为了减小顶苗器下压对钵体的损伤和降低作业能耗,取苗气缸工作压力 p 优选为 0.26 MPa。

2.3 高速取苗时序控制系统设计

为了实现高速取苗,设计了送盘链以线速度 v_s 连续移送苗盘、整排取苗单体依次对准动态穴孔下压取苗的高速取苗时序,由送苗链、气动取苗机构和取苗位置传感器等配合实现,送苗链采用步进电机驱动;气动取苗机构 6 个取苗单体双作用气缸利用二位五通电磁换向阀控制气动回路,整个气动回路由减压阀调节工作压力,气源为空压机;取苗位置传感器使用微动行程开关检测穴盘侧筋正时第 1 取苗时序。其系统硬件组成如图 10 所示。

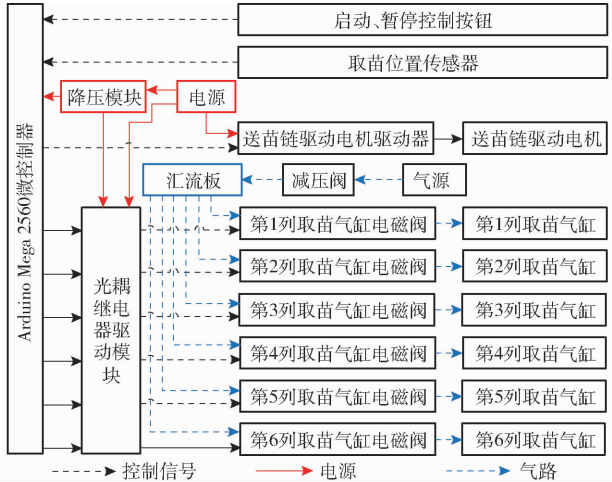


图 10 高速取苗时序控制系统硬件组成
Fig. 10 Hardware composition of high-speed seedling picking sequence control system

根据控制性能要求和硬件匹配,控制器选用 16 MHz 的 Arduino Mega 2560 微控制器。高速取苗时序控制流程如图 11 所示,实现连续输送苗盘、检测第 1 取苗时序和高速下压取苗。

3 台架试验

3.1 高速取苗时序验证试验

为验证顶苗器 U 型末端接触钵体上表面实际瞬时位置是否与高速取苗时序理论位置相符,开展

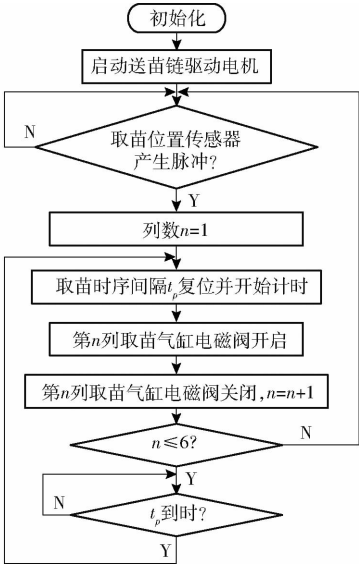


图 11 高速取苗时序控制原理流程图
Fig. 11 Flow chart of control principle of high-speed seedling picking sequence

验证试验。

试验所需设备:高速摄像机(Phantom V9.1 型)、补光灯(JINBEI EF-200 型)、气动下压式高速取苗装置试验台如图 12 所示。



图 12 取苗装置试验台
Fig. 12 Seedling picking device test bench

1. 高速摄像机 2. 补光灯 3. 无底穴盘 4. 气动下压式高速取苗装置试验台 5. 计算机 6. 空压机

首先将无底穴盘放置到送苗底板上,架设高速摄像机,开启补灯光照射,设置采样频率为 1 000 f/s,然后设置装置取苗频率为 120 株/min,送苗链线速度 0.015 m/s,启动试验台,开始拍摄。通过 PCC 软件对视频进行解析,获得实际 6 个高速取苗时序对应顶苗器 U 型末端与钵体上表面接触实际瞬时位置。在 PCC 中软件使用“Measurement”下的“Calibrate”和“Instant Measurement”测量功能,测得 6 个实际瞬时位置 U 型末端侧边 I 与穴孔内侧边缘距离 $j_1 \sim j_6$ (图 8b)见图 13,取苗位置传感器触发正时第 1 取苗时序时刻 t 为 0 ms。

6 个高速取苗时序 $j_1 \sim j_6$ 平均值为 2.50 mm,

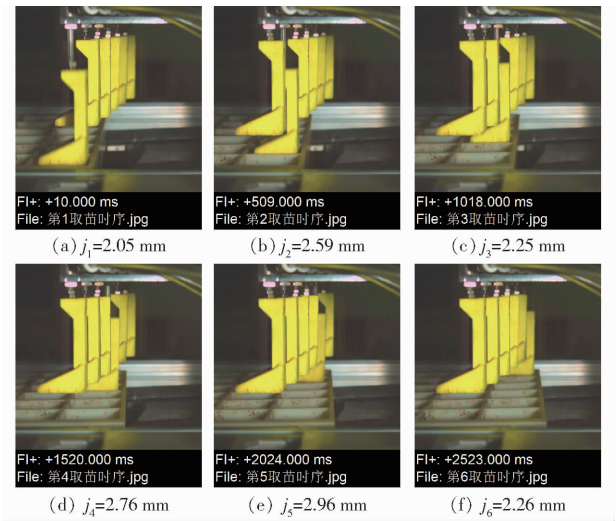


图 13 U 型末端与钵体上表面接触瞬时位置关系
Fig. 13 Instantaneous positional relationship between U-shaped end and upper surface of bowl

与设计的边缘距离 j 基本一致,可知送苗链、气动取苗机构和取苗位置传感器等在控制系统作用下实现高速取苗时序精度较好,具有高速取苗作业可行性。

3.2 取苗试验

3.2.1 试验条件与指标

气动下压式取苗装置取苗试验于 2020 年 11 月在中国农业大学工学院进行。试验对象为“国福 419”辣椒苗,采用有机营养育苗基质培育,泥炭、珍珠岩、蛭石体积比为 3:1:1,苗龄 60 d,平均苗高为 145 mm,平均展宽为 133 mm,平均茎粗为 3.49 mm,如图 14 所示。测得钵体基质含水率为 66.69% ~ 76.35%。

依据 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》行业标准^[28],结合气动下压式取苗装置作业性能要求,



图 14 试验用载苗组合式穴盘
Fig. 14 Bottomless plug tray with seedlings for test

本试验以取苗成功率 Y_1 、基质破碎率 Y_2 和茎叶损伤率 Y_3 作为取苗效果评价指标,计算式为

$$Y_1 = \frac{n_1}{n} \times 100\% \quad (17)$$

$$Y_2 = \frac{m_1}{m - m_2} \times 100\% \quad (18)$$

$$Y_3 = \frac{m_3}{m_2} \times 100\% \quad (19)$$

式中 n_1 ——装置取苗成功钵苗株数,株
 n ——试验用有效钵苗总株数,株
 m_1 ——破碎基质总质量,g
 m ——取苗成功钵苗总质量,g
 m_2 ——取苗成功钵苗茎叶总质量,g
 m_3 ——取苗成功后扯断损伤茎叶总质量,g

试验时取苗气缸工作气压 $p = 0.26 \text{ MPa}$,取苗频率为 120 株/min。选取 6 盘生长一致钵苗进行试验,试验前去除无苗钵体,避免无苗钵体对试验指标影响。试验结果如表 1 所示。每次试验后沿钵体上表面将幼苗剪去称取苗成功钵苗茎叶总质量 m_2 。钵苗取苗成功率平均值为 100%,基质破碎率平均值为 22.46%,茎叶损伤率平均值为 3.54%,试验后部分钵苗状况如图 15 所示。

表 1 取苗试验结果
Tab. 1 Results of seedling picking experiment

穴盘序号	试验用有效钵苗总株数 n /株	装置取苗成功钵苗株数 n_1 /株	破碎基质总质量 m_1 /g	取苗成功钵苗总质量 m /g	取苗成功茎叶总质量 m_2 /g	取苗成功后扯断损伤茎叶总质量 m_3 /g	取苗成功率 $Y_1/\%$	基质破碎率 $Y_2/\%$	茎叶损伤率 $Y_3/\%$
1	26	26	171.81	813.65	87.43	3.78	100	23.66	4.32
2	24	24	186.78	869.93	64.81	2.50	100	23.20	3.86
3	27	27	195.31	940.96	76.09	2.71	100	22.58	3.56
4	29	29	204.03	1 024.61	79.27	0.93	100	21.58	0.93
5	20	20	121.54	632.52	64.80	2.45	100	21.41	3.78
6	31	31	236.90	1 159.29	98.05	4.47	100	22.32	4.56
平均值							100	22.46	3.54

3.2.2 结果分析

基质破碎率较高原因为:钵体尺寸较大,根系比例和根系包裹缠绕程度比常规钵苗稍弱,但破碎基

质来源于钵体边角表层松散基质,钵体主体内部和根系未见损伤;即使个体差异部分钵苗根系不发达出现基质破碎率偏高,未对其造成根系及茎叶严重

损伤。所有钵体主体及根系仍完好(图15),不影响后期移栽成活。个别叶片扯断损伤,损伤程度较小,不影响移栽后成活和生长发育,未发生因茎叶互相缠绕导致钵体压出而未下落情况。



图15 取苗后部分钵苗状况

Fig. 15 Condition of partial pot seedlings after picking

试验中还发现顶苗器下压取苗过程中,钵苗以一定速度下落,茎叶在迎风阻力作用下向中心弯曲收拢(图16),更有利于穿过穴孔低损高速下落。

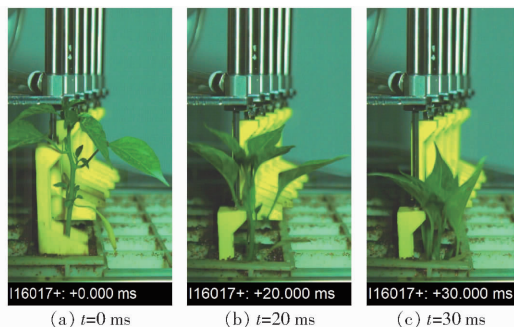


图16 茎叶在下落过程中发生收拢效应高速摄像图

Fig. 16 High-speed photograph of the shrinking effect of the stem and leaf during the fall

通过试验可知,装置各机构运动协调、按高速取苗时序完成取苗作业循环,满足高速低损取苗作业

要求;与基于向上取苗原理插入夹取式取苗机构相比,取苗频率和取苗成功率都得到了提高;同时该装置提高取苗频率只需改变送苗链线速度和高速取苗时序间隔,并不会改变取苗气缸工作压力和工作行程,不会增加顶苗器振动和惯性力,故该装置下压式取苗原理与结构可以实现高速低损取苗。

4 结论

(1)设计了气动下压式高速取苗装置,该装置将快速往复气缸和无底穴盘结合,实现下压式高速取投苗一体化作业,简化了取苗机构、优化了作业轨迹。综合考虑钵体受力、茎叶损伤、作用压力、与穴孔边缘间隙和相对运动轨迹等因素,对关键部件进行分析和计算;在当前穴盘和顶苗器参数条件下,取苗气缸工作气压范围为0.26~1.44 MPa。所设计的顶苗器在气缸工作气压范围内不会对钵体根土结构和茎叶造成破坏或损伤。同时,在下压取苗过程中,茎叶受迎风阻力而收拢,有利于快速低损下落,实现低损取苗作业。

(2)设计了高速取苗时序及控制系统,并进行了验证试验,试验表明,送苗链、气动取苗机构和取苗位置传感器等在控制系统作用下能够协调工作,高速取苗时序精度较高,该取苗机构具有高速取苗作业的可行性。

(3)进行了样机取苗试验,当取苗气缸工作气压优选为0.26 MPa、取苗频率为120株/min时,钵苗取苗成功率平均值为100%,基质破碎率平均值为22.46%,茎叶损伤率平均值为3.54%,未发现钵体主体结构、根系和茎叶的严重损伤,取苗效果稳定,能够满足蔬菜高速移栽的取苗作业要求。

参 考 文 献

- [1] 崔志超,管春松,杨雅婷,等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020,41(3): 85-92.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, YANG Yating, et al. Research status of vegetable mechanical transplanting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(3): 85-92. (in Chinese)
- [2] JIN Xin, ZHAO Kaixuan, JI Jiangtao, et al. Design and implementation of intelligent transplanting system based on photoelectric sensor and PLC[J]. Future Generation Computer Systems, 2018,88:127-139.
- [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/OL]. 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 automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):78-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.009. (in Chinese)
- [4] 党玉功,金鑫,李衡金,等. 单自由度四连杆取投苗机械臂设计[J]. 农业工程学报, 2019,35(14): 39-47.
DANG Yugong, JIN Xin, LI Hengjin, et al. Design of single-degree-of-freedom four-bar seedling-taking and throwing manipulator[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(14): 39-47. (in Chinese)
- [5] 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/OL]. 农业机械学报, 2019,50(10): 64-71.
YIN Daqing, WANG Jiazhao, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of vegetable potted seedlings pick-up mechanism for exploring and picking-pushing plugs[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):64-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191007&journal_id=jcsam

- id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.007. (in Chinese)
- [6] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):79-84,98. CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2):79-84,98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.010. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):70-78. YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):70-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140612&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.012. (in Chinese)
- [8] GEOFFRE A W. Apparatus for transferring seedlings from plant trays;US5868086[P]. 1999-02-09.
- [9] 张振国,张学军,曹卫彬,等. 番茄穴盘苗移栽机自动取苗机构的研制[J]. 农机化研究,2014,36(9):177-181,185. ZHANG Zhenguo, ZHANG Xuejun, CAO Weibin, et al. The research and manufacturing of plug transplanter's tomato seeding picking mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(9):177-181,185. (in Chinese)
- [10] 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲,等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):49-57. WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(14):49-57. (in Chinese)
- [11] 王东洋,金鑫,姬江涛,等. 自动顶-夹式蔬菜穴盘苗取苗装置设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(10):64-68. WANG Dongyang, JIN Xin, JI Jiangtao, et al. Design and experiment of fully automatic ejection and picking-up seedlings mechanism of transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(10):64-68. (in Chinese)
- [12] 韩振浩,颜华,陈科,等. 基于 Matlab 的顶苗机构设计与参数优化[J]. 农机化研究,2017,39(1):142-146. HAN Zhenhao, YAN Hua, CHEN Ke, et al. Design and parameter optimization of seedling expeller mechanism based on Matlab[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1):142-146. (in Chinese)
- [13] 孙廷琮,马成林,纪春千. 空气整根营养钵育苗及移栽系统技术的研究开发[J]. 农业工程学报,1991,7(2):86-91. SUN Tingcong, MA Chenglin, JI Chunqian. A development of air-pruning tray seedling growing and transplanting system[J]. Transactions of the CSAE,1991,7(2):86-91. (in Chinese)
- [14] 高捷,马亚朋,胡斌,等. 基于射流冲击的穴盘立式取苗器取苗过程的分析研究[J]. 农机化研究,2016,38(3):47-50. GAO Jie, MA Yapeng, HU Bin, et al. The analysis and research on pick-up plug seedlings process of aperture disk vertical pick-up pevice based on the jet impingement[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(3):47-50. (in Chinese)
- [15] 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/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):80-87. YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of seedlings unloading mechanism based on methods of air-blowing and vibration for vegetable transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):80-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.009. (in Chinese)
- [16] BREWER H L. Experimental automatic feeder for seedling transplanter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1988,4(1):24-29.
- [17] PRASANNA KUMAR G V, RAHEMAN H. Automatic feeding mechanism of a vegetable transplanter[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2012,2(5):1-8.
- [18] 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.
- [19] 韩绿化,毛罕平,缪小花,等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):260-265. HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):260-265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131144&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044. (in Chinese)
- [20] 童俊华,石虎峰,武传宇,等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):107-116. TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):107-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190812&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.012. (in Chinese)
- [21] 周梅芳,徐建军,童俊华,等. 花卉穴盘苗取栽一体式自动移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(20):44-51. ZHOU Meifang, XU Jianjun, TONG Junhua, et al. Design and experiment of integrated automatic transplanting mechanism for taking and planting of flower plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(20):44-51. (in Chinese)
- [22] 赵匀,张卫星,辛亮,等. 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):105-112. ZHAO Yun, ZHANG Weixing, XIN Liang, et al. Design and experiment of extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):105-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.011. (in Chinese)

- no = 20180501&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
- [14] 马旭,陈林涛,黄冠,等.水稻秧盘育秧播种生产线电控式软硬秧盘自动供盘装置[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):41-49.
MA Xu, CHEN Lintao, HUANG Guan, et al. Electric controlled automatic tray feeding device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):41-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170605&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.005. (in Chinese)
- [15] 马旭,谭永炘,齐龙,等.水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):29-36.
MA Xu, TAN Yongxin, QI Long, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160305&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.005. (in Chinese)
- [16] 马静龙,冯江,张敏,等.一种关节型摆盘机械手的运动学分析[J].农机化研究,2014,36(8):14-18.
MA Jinglong, FENG Jiang, ZHANG Min, et al. Kinematics analysis of an articulated wobble plate manipulator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(8):14-18. (in Chinese)
- [17] 谢连双.水稻植质钵育秧盘摆放机的试验与研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2015.
- [18] 刘海彬.气吸式育苗穴盘自动摆放机的研制[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [19] 刘海彬,谷新运,徐灿,等.气吸式育苗穴盘自动摆放机的设计与试验[J].农机化研究,2018,40(9):134-138.
LIU Haibin, GU Xinyun, XU Can, et al. Design and test of automatic machine for placing seed trays[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9):134-138. (in Chinese)
- [20] 张秀花,谢晓东,弋景刚,等.关节式蔬菜育苗穴盘播后自动摆放机设计[J].农业工程学报,2018,34(21):27-36.
ZHANG Xiuhua, XIE Xiaodong, YI Jinggang, et al. Design of joint-style automatic machine for placing planted vegetable seeding tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21):27-36. (in Chinese)
- [21] CHIU Y C, FON D S, WU G J. Development of an automatic pallet handling system for seeded trays[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2):123-138.
- [22] CHIU Y C, WU G J, CHEN C H. Development of a generator-powered self-propelled automatic tray loading/unloading machine for use in rice nurseries[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2019, 12(2):256-263.
- [23] 张争取.纺织机械凸轮机构两种建模方法对比分析[J].现代纺织技术,2012,20(5):19-21.
- [24] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
- [25] 陈建能,陈礼群,喻陈楠,等.基于最小切块应力的西兰花切块加工刀具参数优化研究[J].农业工程学报,2018,34(23):42-48.
CHEN Jianneng, CHEN Liqun, YU Chennan, et al. Study on blade parameter optimization analysis of broccolicuts based on minimum slice stress[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23):42-48. (in Chinese)
- [26] 严剑文,周双庆,王依山,等.水稻钵苗育秧栽培技术[J].农业开发与装备,2020(4):173-174,170.

(上接第43页)

- [23] 崔巍,方宪法,赵亮,等.齿轮-五杆取苗装置机构优化与试验验证[J/OL].农业机械学报,2013,44(8):74-77.
CUI Wei, FANG Xianfa, ZHAO Liang, et al. Structural optimization and experimental verification of geared five-bar linkage seedling pick-up device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):74-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.013. (in Chinese)
- [24] 叶秉良,唐涛,俞高红,等.添加配重的蔬菜移栽机旋转式取苗机构动力学分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(8):117-122.
YE Bingliang, TANG Tao, YU Gaohong, et al. Dynamic analysis of rotary seedling pick-up mechanism of vegetable transplanting machine with counterweight[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):117-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.013. (in Chinese)
- [25] 王跃勇,于海业.穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析[J].农业工程学报,2015,31(14):65-71.
WANG Yueyong, YU Haiye. Experiment and analysis of impact factors for soil matrix intact rate of manipulator for picking-up plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):65-71. (in Chinese)
- [26] 金鑫,李树君,杨学军,等.蔬菜穴盘苗取苗机构分析与参数优化[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):1-6.
JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Analysis and parameter optimization for vegetable plug seedling pick-up mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl.1):1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.001. (in Chinese)
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部.旱地栽植机械:JB/T 10291—2013[S].北京:机械工业出版社,2013.
- [28] 李华,曹卫彬,李树峰,等.2ZX-2型全自动蔬菜穴盘苗铺膜移栽机的研制[J].农业工程学报,2017,33(15):23-33.
LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Development of 2ZX-2 automatic plastic film mulching plug seedling transplanter for vegetable[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15):23-33. (in Chinese)
- [29] 胡静,韩绿化,温怡芳,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 properties of different vegetable plug seedlings as related to automatic transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5):132-136. (in Chinese)