

番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验

辛亮 王明成 孙国玉 张浩 孙铭翼 王航

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了降低番茄钵苗移栽过程取钵机构对秧苗钵土根系的损伤,同时避免机械式钵苗移栽机构设计特殊取苗轨迹与姿态的优化难题,提出了一种可与系列移栽机构配合使用的番茄钵苗探出式取钵机构,实现取苗各关键位置机构秧针以固定角度完成探出入钵、移动送苗及收回推秧工序。根据钵苗移栽取钵过程分析与设计要求,建立了探出式取钵机构力学分析模型,并获得影响秧针扎入钵土时驱动杆受最小驱动力的因素。基于 Matlab App Designer 平台开发了取钵机构计算机辅助分析设计软件,获得满足番茄钵苗移栽要求的取钵机构设计参数集。采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以驱动杆斜杆夹角、钵体含水率、入钵深度为试验因素,以钵体完整率和取苗成功率为评价指标,试制样机并搭建台架实施参数组合优化及验证试验,结果表明:探出式取钵机构可有效地配合取苗机构完成各项性能工作要求,在参数组合为驱动斜杆间夹角 112° 、钵体含水率 57.5%、入钵深度 28.4 mm 时作业效果最佳,钵体完整率为 96.44%,取苗成功率为 97.06%,满足钵苗移栽作业性能。

关键词: 番茄; 钵苗移栽; 探出式; 取钵机构; 力学分析

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)03-0096-10

OSID: 

Design and Experiment of Extensible Type of Picking Seedling Pot Mechanism for Tomato Pot Seedling Transplanting

XIN Liang WANG Mingcheng SUN Guoyu ZHANG Hao SUN Mingyi WANG Hang
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to lower the damage to the root system and pot soil of the seedling caused by the picking seedling pot mechanism in the tomato pot seedling transplanting process, and avoid the optimization problem of special seedling-picking trajectory and posture design of the mechanical pot seedling transplanting mechanism, the extensible type of picking seedling pot mechanism that can be used in conjunction with a series of transplanting mechanisms was proposed. It was achievable that the seedling needles of the mechanism at key positions of the picking seedling completed the process of protruding into the seedling pot, moving and delivering seedlings, and retrieving and pushing seedlings at a fixed angle. Based on the analysis and design requirements of the process of transplanting and picking seedling pot, the mechanical analysis model of the picking seedling pot mechanism was established, and the factors affecting the minimum driving force on the driving rod when the seedling needles protruding into the seedling pot were obtained. A computer-aided analysis and design software for the picking seedling pot mechanism was developed based on the Matlab App Designer platform, obtaining a set of picking seedling pot mechanism design parameters that met the requirements of tomato pot seedling transplantation. Using the three-factor five-level quadratic regression orthogonal rotation center combination test method, taking the angle of inclined rods, moisture content of seedling pot and depth into the pot as the test factors, and taking the integrity rate of the pot and the success rate of taking seedlings as the evaluation indexes, the prototype was trial manufactured and the bench was built to implement the parameter combination optimization and verification test. The results showed that the extensible type of picking seedling pot mechanism could effectively cooperate with the seedling picking mechanism to complete the performance

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105247)、黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2023E001)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2020099)、中央支持地方高校改革发展资金优秀青年项目和东北农业大学“学术骨干”基金项目

作者简介: 辛亮(1989—),男,副教授,博士,主要从事移栽机械创新优化设计研究,E-mail: xinliang@neau.edu.cn

requirements. The results showed that the operation effect was the best when the combination parameters included angle of the driving inclined rods was 112° , the moisture content of the seedling pot was 57.5%, and the depth into the pot was 28.4 mm. The integrity rate of the seedling pot was 96.44%, and the success rate of picking seedlings was 97.06%, which met the performance of pot seedling transplanting.

Key words: tomato; pot seedling transplanting; extensible type; picking seedling pot mechanism; mechanical analysis

0 引言

钵苗移栽具有单株成钵、延长作物生长期、提高复种指数的优势,特别在北方寒地可以有效避免春寒、霜冻等不良气候的影响,是旱田作物主要移栽方式。机械化移栽机构作业需完成取苗、输送和栽植全部移栽工序,而取苗机构则需实现将秧苗从秧盘中取出并输送,为栽植作业准备秧苗。目前旱地大田作物移栽机械,大多采用人工取苗、投苗配合机械栽植的半自动移栽方式,效率低、劳动强度大,作业质量难以保证,因此取苗机构的研发则是实现旱地全自动钵苗移栽机械应用的关键与趋势^[1]。

取苗机构作业难点不仅在于需针对于不同旱地作物钵苗物理特性采取相应的取苗方式,而且需确保配置在取苗机构中与秧苗直接接触作业的装置避免对秧苗造成严重损伤。目前该装置主要有将钵苗从秧盘上方直接取出的拔取式、由秧盘底部顶出钵苗的顶出式以及底部顶出后夹取土钵外侧的顶出-夹钵式^[2-3]。拔取式又有通过夹取秧苗茎秆韧性较强(如水稻、辣椒等)的夹秧机构或夹取茎秆较弱或中空(如番茄、黄瓜等)秧苗土钵的取钵机构完成作业^[4-9]。

取苗机构的研发国外起步较早,技术相对成熟。YANG等^[10]研制的滑针式机械手臂和 HAKLI等^[11]提出的将顶出装置与夹持机构组合取苗后放置到输送带上的取苗机构,是通过气动或电动控制机电一体化设备实现装置取苗针伸入土钵回缩夹紧取苗。CHOI等^[12]和 NAKASHIMA等^[13]分别提出了曲柄滑道式和行星轮驱动滑道式机械手取苗机构,通过特殊滑道的配合实现了取钵机构夹针进入土钵的取苗轨迹与姿态,并且扎入土钵同时向内夹紧取出秧苗。国内取苗机构研发应用较多的为连杆机构^[14-18],俞高红等^[19-20]开发的不等速行星轮系与钵苗移栽机构实现了夹钵式“鹰嘴”型移栽轨迹^[21],优化较困难,取苗过程时间长,需与间歇送秧机构配合,降低了整体移栽效率,也采用上述铰链式取苗针取钵机构,在夹钵时主动夹紧易对钵苗基质和秧根造成损伤。

为了实现高效、轻简化机械化钵苗移栽作业时

降低取苗过程机构对秧苗钵土根系的损伤,以番茄钵苗为研究对象,提出一种用于旱地钵苗取苗机构的探出式取钵机构。根据钵苗移栽取钵过程与设计分析,对机构进行力学分析,并开发取钵机构计算机辅助分析设计软件完成运动学分析,通过试验验证取钵机构秧针以固定角度迅速探出扎入土钵、保持角度移动送苗及固定角度收回推秧的作业性能,以避免并降低秧针角度主动变化对钵苗根系和钵土的夹紧、压伤等破坏程度。

1 设计要求与工作原理

1.1 设计要求

通过分析机械式钵苗移栽机构工作特点以及不同种类秧苗物理特性^[22-23],针对茎秆脆弱的番茄钵苗移栽时,要求采用夹取钵土的机构实现取苗作业。为了配合各类型移栽机构完成连续不间断取苗,首先,取钵机构需随取苗机构在取苗位置快速将钵苗顺利地由钵盘中完全取出,且避免对钵苗钵土与秧根的挤压损坏;在输送钵苗至栽植投苗位置的过程,取钵机构要始终保持夹持钵苗土钵的状态;在栽植投苗位置时,取钵机构推秧释放钵苗使其能够准确地落入到栽植器或栽入穴坑中,整个移栽过程不可存在任何干涉现象。

连续钵苗移栽取苗工作的关键在于取钵阶段的快速拔取钵苗同时防止与连续供苗秧箱干涉,而目前大部分取钵式移栽机构轨迹与姿态的优化设计难点在于实现进入钵土中的“鹰嘴”型轨迹及稳定的取钵姿态,即图1中红色部分线段示意轨迹。为了降低系列移栽机构在优化设计取苗阶段的难度,本文利用探出式取钵机构的秧针实现取钵过程进入土钵的“鹰嘴”型轨迹及取钵动作,即移栽机构优化无需实现进入土钵的轨迹,仅需取钵机构在土钵表面位置的取苗轨迹末端,以固定角度快速探出秧针完成扎入秧苗土钵的动作即可,探出的秧针增加了“鹰嘴”部位的轨迹,并可随取苗机构沿轨迹移动快速将钵苗取出,因此可避免秧针与连续横向送秧的秧箱干涉以及移栽臂过大的角度摆动,同时固定角度移动可实现输送钵苗状态始终不对土钵根系造成挤压损伤,当在栽植投苗位置时,取钵机构再以探出

秧针的固定角度原路收回推秧,即可完成移栽取苗过程。

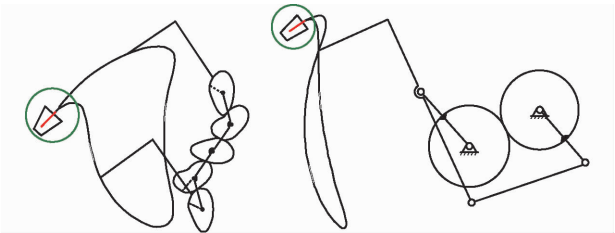


图 1 不同类型钵苗移栽机构“鹰嘴”型轨迹示意图
Fig.1 Schematic of “olecranon” type trajectory of different types of pot seedling transplanting mechanism

为了实现以上作业要求,提出的探出式取钵机构如图 2 所示。该机构由 3 部分组成,驱动杆件 AOB_D 由驱动直杆 AO 和驱动斜杆 OB、OD 焊接合成,BP₁和 DP₂为对称分布的秧针,驱动直杆 AO 可移动地穿在驱动直杆滑道中,秧针的一端分别与滑块 B、D 固接并套装在驱动斜杆 OB 与 OD 上,秧针的另一端分别穿套在秧针滑道 C、E 中并构成推秧块,驱动直杆滑道与秧针滑道构成一体结构,当驱动杆件驱动时,秧针可实现沿秧针滑道以固定角度探出入钵,整体移动送苗及收回推秧工序。

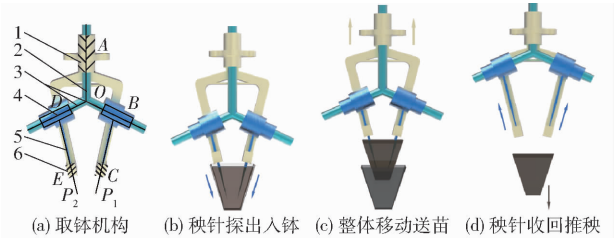
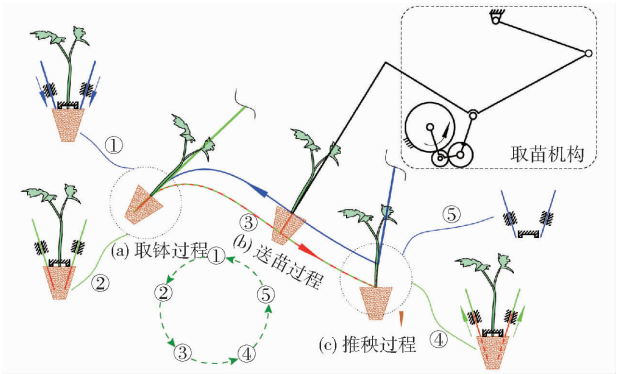


图 2 探出式取钵机构结构示意图
Fig.2 Schematics of picking seedling pot mechanism
1. 驱动直杆滑道 2. 驱动直杆 3. 驱动斜杆 4. 滑块 5. 秧针 6. 秧针滑道

1.2 工作原理

为了实现完整的钵苗移栽取苗过程,将所开发的探出式取钵机构配置到番茄钵苗移栽取苗机构的移栽臂上,取钵机构驱动直杆滑道、秧针滑道与移栽臂壳体固接,驱动杆件中驱动直杆即为移栽臂中的推秧杆。

移栽取苗机构工作时,移栽臂带动探出式取钵机构运行到取苗轨迹取钵位置,移栽臂中凸轮拨叉机构联动使驱动杆件驱动秧针向秧钵钵土方向运动,秧针顺着秧针滑道并沿着钵土两侧方向以固定角度迅速扎入钵体并保持,完成探出入钵过程,如图 3a 所示,由于秧针以固定角度探出入钵不发生角度变化,因此不会造成主动夹紧、挤压等对钵土和根系的破损;取钵机构秧针以固定角度保持并随移栽机构沿取苗轨迹远离钵盘方向继续运动,该阶段秧



①准备探出秧针 ②秧针探出入钵 ③秧针角度保持移动送苗
④秧针收回推秧 ⑤回程循环准备
图 3 番茄钵苗移栽探出式取钵机构工作过程
Fig.3 Working process of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting

针通过与土钵秧根之间的楔形增加摩擦力实现对钵土的整体拔取,将钵土与秧盘脱开,该过程取钵机构随着移栽臂运动没有发生角度大幅度的摆动,因此取钵过程不与秧盘发生搅动、干涉现象,当钵体完全脱离秧盘后,继续输送钵苗直至运行到栽植投苗时刻完成送苗过程,如图 3b 所示;此时,移栽机构移栽臂中凸轮拨叉机构再次动作使驱动杆件回缩,进而秧针沿滑道再次以原固定角度迅速收回,钵苗则被推秧块顶住完成推秧投苗过程,如图 3c 所示,钵苗落入至栽植器或穴坑中,回程准备下一个作业周期。作业过程取钵秧针始终保持原固定角度整体运动,不存在取钵机构秧针主动夹紧和移栽臂转角摆动造成对土钵和根系及秧盘的损坏,同时也实现了与连续供苗配合的高效取苗,简化了机构设计复杂取苗段轨迹的优化难题。

2 理论分析

2.1 自由度计算

由于取钵机构关于驱动杆件轴对称布置,以机构单侧作为研究对象,对机构进行分析。驱动杆件和秧针及机架(即移栽臂)组成了全移动副环路移动链,对单侧机构进行还原处理,如图 4 所示,该机构含有 1 个公共约束,而对于含有公共约束的平面连杆机构,需对契贝舍夫公式做如下修正^[24-25]

$$F = (3 - M)n - (2 - M)P_d \quad (1)$$

式中 F ——平面结构自由度
 M ——环路含公共约束数
 n ——活动构件数(不含机架)
 P_d ——低副数量

应用修正过的契贝舍夫公式可得 $F = 2 \times 2 - 1 \times 3 = 1$,计算出机构自由度为 1,因此该机构具有确定的运动。此公式也同样适用于未作简化的取钵

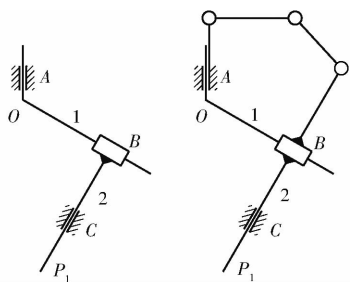


图4 含有全移动副回路移动链的平面连杆机构

Fig.4 Planar linkage mechanism containing all mobile secondary loop mobile chains

机构,即含有虚约束的机构: $F = 2 \times 3 - 1 \times 5 = 1$,自由度为1,同样具有确定的运动。

2.2 力学分析

该取钵机构中实际含有5个低副,而在机构运行过程中,低副间的摩擦力不可避免,需通过力学分析与结构设计减少因摩擦力引起的功耗。因机构的对称性,只取一侧作为研究对象,根据设计需求及机构中含有的虚约束,将秧针分别与驱动斜杆和秧针滑道之间的接触关系分为两种情况^[26-27],讨论各个参数对秧针扎入钵土驱动杆所受驱动力 F_A 的影响。

(1)当驱动斜杆 OB 与滑块 B 接触关系为高副,秧针 BP_1 与秧针滑道 C 接触关系为低副时

机构所受的主动力为秧针入土阻力 F_{p1} ,滑块与驱动斜杆接触处有2个约束力 F_{BN} 、 F_{Bf} ,驱动斜杆与 Y 轴负方向的夹角为 α ,摩擦角为 φ ,秧针在秧针滑道处受到3个约束力 F_{CN1} 、 F_{CN2} 和 F_{Cf} ,秧针滑道长度设为 h ,秧针与驱动斜杆夹角为 $\pi/2 - \beta$;当 β 为 0° 时,秧针与驱动斜杆相互垂直。机构力学分析如图5所示。

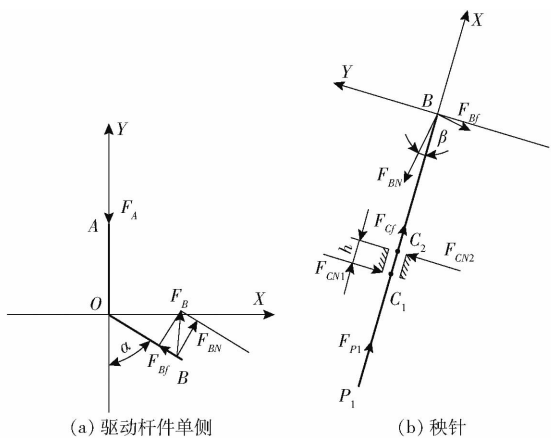


图5 驱动斜杆与秧针接触关系为高副时受力分析

Fig.5 Force analysis of contact relationship between driving inclined rod and seedling needle as high motion pair

以驱动杆件为研究对象,建立平面直角坐标系如图5a所示,平面任意力系的平衡方程为

$$F_A = 2(F_{BN} \sin \alpha + F_{BN} \tan \varphi \cos \alpha) \quad (2)$$

以秧针为研究对象,建立平面直角坐标系如

图5b所示,研究对象中将摩擦力应用已知力和摩擦角替换、对三角函数进行简化和利用已知距离替换未知的坐标转换,得到平面任意力系的平衡方程为

$$\sum F_X = F_{p1} + F_{CN} \tan \varphi - F_{BN} \cos \beta + F_{Bf} \sin \beta = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_Y = -F_{Bf} \cos \beta + F_{BN} \sin \beta + F_{CN2} - F_{CN1} = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_B = F_{CN1} l_{BC1} - F_{CN2} l_{BC2} = 0 \quad (5)$$

其中

$$F_{CN} = F_{CN1} - F_{CN2}$$

对式(3)~(5)进行简化可求得

$$F_{CN2} = \frac{F_{Bf} \cos \beta - F_{BN} \sin \beta}{1 - \frac{l_{BC2}}{l_{BC1}}} \quad (6)$$

$$F_{BN} = \frac{F_{p1}}{\frac{\cos(\beta + \varphi)}{\cos \varphi} - \left(\frac{l_{BC2}}{l_{BC1}} + 1 \right) \tan \varphi - \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\cos \varphi \left(1 - \frac{l_{BC2}}{l_{BC1}} \right)}} \quad (7)$$

$$F_A = \frac{2F_{p1} \sin(\alpha + \varphi)}{\cos(\varphi + \beta) + \left(2 \frac{l_{BC2}}{h} + 1 \right) \tan \varphi \sin(\beta - \varphi)} \quad (8)$$

由此可得:①摩擦力在此机构只有阻力作用,因此当摩擦角增大,机构所受阻阻力增大, F_A 增大。②当秧针入土阻力 F_{p1} 一定的条件下,如图6a所示,设 α 为变量,其他值为常量绘制 F_A 关于 α 的曲线,当 α 在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 变化时,随着 α 的增大, F_A 呈线性增大, α 在 $50^\circ \sim 90^\circ$ 变化时,曲线斜率逐渐减小,但 F_A 依然增大,说明 α 对 F_A 的影响比较显著。③秧针入土阻力 F_{p1} 一定的条件下,如图6b所示,设 β 为变量,其他值为常量绘制 F_A 关于 β 的曲线,当 β 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 变化时,随着 β 的增大, F_A 变化较小趋于稳定, β 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 变化时,曲线斜率逐渐增大,且 F_A 逐渐增大,说明 β 在一定区间内对 F_A 影响较小。④秧针入土阻力 F_{p1} 一定的条件下,如图6c所示,设 h 为变量,其他值为常量绘制 F_A 关于 h 的曲线,当 h 在 $0 \sim 5$ mm变化时,随着 h 的增大, F_A 变化较大, h 增大到5 mm以后时, F_A 的变化趋于稳定。

(2)当驱动斜杆 OB 与滑块 B 接触关系为低副,秧针 BP_1 与秧针滑道 C 接触为高副时

机构所受的主动力为秧针入土的阻力 F_{p1} ,摩擦角为 φ ,滑块与驱动杆件接触处有3个约束力 F_{BN1} 、 F_{BN2} 、 F_{Bf} ,驱动斜杆与 Y 轴负方向的夹角为 α ,秧针与驱动斜杆连接处滑块长度设为 h_2 ,秧针

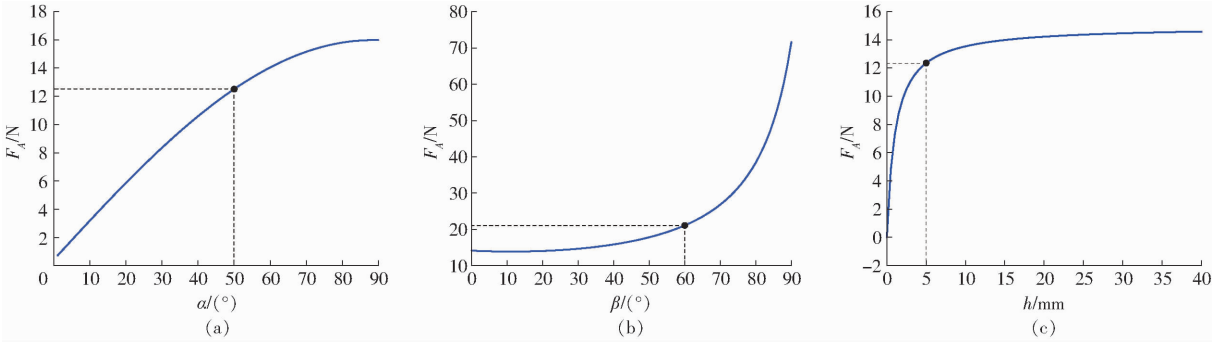


图 6 驱动斜杆与秧针接触关系为高副时各参数对驱动力的影响

Fig. 6 Influence of various parameters on driving force when contact relationship between driving inclined rod and seedling needle was high pair

在秧针滑道处受到两个约束力 F_{CN} 和 F_{Cf} , 秧针与驱动斜杆夹角为 $\pi/2 - \beta$, 机构力学分析如图 7 所示。

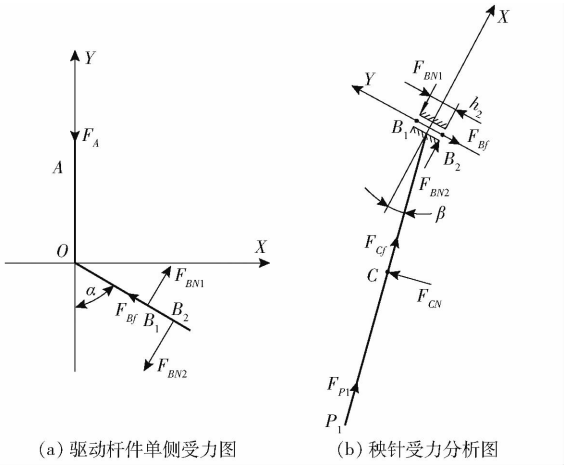


图 7 驱动斜杆与秧针接触关系为低副时受力分析

Fig. 7 Force analysis of contact relationship between driving inclined rod and seedling needle as low motion pair

以驱动杆件为研究对象, 建立平面直角坐标系如图 7a 所示, 平面任意力系的平衡方程为

$$\sum F_x = F_{BN1} \cos \alpha + F_{BN2} \cos (\alpha + \pi) + F_{Bf} \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_y = -F_A + F_{BN1} \sin \alpha + F_{BN2} \sin (\alpha + \pi) + F_{Bf} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\sum M_O = F_{BN1} l_{OB1} - F_{BN2} l_{OB} = 0 \quad (11)$$

对式(9)~(11)进行简化可求得

$$F_A = F_{BN2} \frac{h_2 \sin \alpha + (h_2 + 2l_{OB1}) \tan \varphi \cos \alpha}{l_{OB1}} \quad (12)$$

以秧针为研究对象, 建立平面直角坐标系如图 7b 所示, 将摩擦力应用已知力和摩擦角替换、对三角函数进行简化和利用已知距离替换未知的坐标转化, 得到平面任意力系平衡方程为

$$\sum F_x = F_{BN2} - F_{BN1} + F_{Cf} \cos \beta + F_{P1} \cos \beta + F_{CN} \sin \beta = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_y = -F_{Bf} + F_{CN} \cos \beta + F_{Cf} \sin \beta + F_{P1} \sin \beta = 0 \quad (14)$$

$$\sum M_B = F_{BN1} \frac{h_2}{2} + F_{BN2} \frac{h_2}{2} - F_{CN} l_{BC} = 0 \quad (15)$$

$$F_{CN} = \frac{h_2 F_{BN2} (2l_{OB1} + h_2)}{2l_{BC} l_{OB1}} \quad (16)$$

$$F_{BN2} = \frac{F_{P1} l_{OB1} \sin \beta}{(2l_{OB1} + h_2) \left(\tan \varphi - \frac{h_2 \cos (\beta - \varphi)}{2l_{BC} \cos \varphi} \right)} \quad (17)$$

可得

$$F_A = \frac{2F_{P1} l_{BC} \sin \beta (h_2 \sin (\alpha + \varphi) + 2l_{OB1} \sin \varphi \cos \alpha)}{(2l_{OB1} + h_2) (2l_{BC} \sin \varphi - h_2 \cos (\beta - \varphi))} \quad (18)$$

通过式(18)可知, 参数 α 、 β 、 φ 、 h_2 、 F_{P1} 可以影响未知力 F_A : ①秧针入土阻力 F_{P1} 一定的条件下, 如图 8a 所示, 设 α 为变量, 其他值为常量, 绘制 F_A 关于 α 的曲线, 当 α 在 $0^\circ \sim 58^\circ$ 变化时, 随着 α 的增大, F_A 逐渐增大并在 58° 达到最大值, α 在 $58^\circ \sim 90^\circ$ 变化时, F_A 逐渐减小, 说明 α 对 F_A 影响较大且不稳定。②秧针入土阻力 F_{P1} 一定的条件下, 如图 8b 所示, 设 β 为变量, 其他值为常量, 绘制 F_A 关于 β 的曲线, 当 β 在 $0^\circ \sim 72^\circ$ 变化时, 随着 β 的增大, F_A 变化较小趋于稳定, β 在 $72^\circ \sim 90^\circ$ 变化时, 曲线变化极大并在某些点出现骤增骤减情况, 但可以说明 β 在一定区间内选取合理对 F_A 几乎无影响。③秧针入土阻力 F_{P1} 一定的条件下, 如图 8c 所示, 设 h_2 为变量, 其他值为常量绘制 F_A 关于 h_2 的曲线, 当 h_2 在 $0 \sim 10$ mm 变化时, 随着 h_2 的增大, F_A 变化较大, h_2 增大到 10 mm 以后时, F_A 的变化趋于稳定且影响较小。

综合以上两种情况的受力分析得出: 在秧针入土阻力 F_{P1} 一定的情况下, 分析多参数发现两个驱

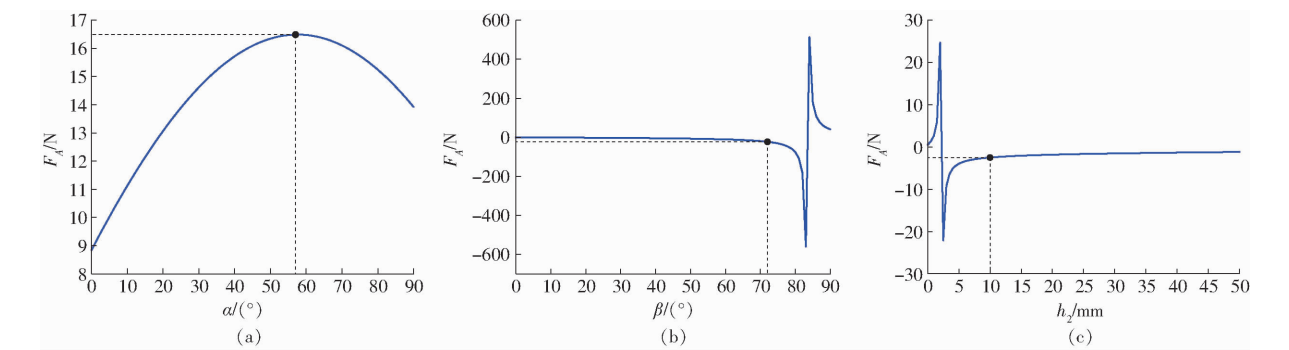


图8 驱动斜杆与秧针接触关系为低副时各参数对驱动力的影响

Fig.8 Influence of various parameters on driving force when contact relationship between driving inclined rod and seedling needle was low pair

动斜杆间夹角 2α 对于驱动阻力的影响最大,因此结构设计需在保证机构运行合理性的前提下,尽量减小 α ;当摩擦角 φ 增大时,摩擦力增大,整个机构驱动阻力 F_A 也会增大,因此机构接触面表面粗糙度应尽量降低;秧针与驱动斜杆连接的滑块长度 h_2 、秧针与秧针滑道长度 h 及秧针与驱动斜杆法向的夹角 β ,选取在合理范围内对于驱动阻力的影响比较小,因此有利于对该机构的设计,且在针对不同作物不同钵盘时秧针角度设置范围更大,取钵机构的适用范围会更广。

3 软件开发与物理样机试制

为了保证钵苗移栽机构具有良好的作业性能,不仅需考虑取钵机构的受力状态,而且需针对作物育苗要求以及所配合的移栽机构对取钵机构进行运动学优化配合。

利用 Matlab App Designer 平台开发针对番茄钵苗参数的取钵机构运动学计算机辅助分析设计软件,如图 9 所示。根据取钵机构的理论模型,确定机构优化参数包括推秧行程 L_{a0} 、驱动杆连接点初始位置 X_0 和 Y_0 、驱动斜杆与水平线夹角 α_1 、秧针与水平

线夹角 α_2 、秧针长度 L_{cp} 、驱动斜杆长度 L_{od} 和秧针滑道位置坐标 X_e 、 Y_e 等。根据与之配合的取苗机构的设计要求及所要移栽作物的物理属性等,确定其优化目标为:机构总体宽度小于 110 mm、秧针尖点最小距离在 10 ~ 25 mm 之间、最大宽度在 10 ~ 40 mm 之间等,将运动学目标数值化,建立目标函数,编写程序,以入钵深度等参数为重要输出参数,将优化目标量化显示作为评价指标,可对机构进行分析与优化设计。

根据软件目标要求,初步获得取钵机构运动学设计参数集,并以此参数对机构进行物理样机初试制与装配。在最初性能验证时发现,取钵机构向下倾斜一定角度模拟实际探出取钵状态时,机构会出现卡顿现象,而其他状态均较顺畅。通过对机构分析以及部件间配合间隙测量发现,取钵机构中驱动斜杆与滑块、秧针与秧针滑道的间隙较大,且滑块和秧针滑道结构尺寸过小,虽取钵机构中与秧针固定的滑块和秧针滑道接触理论上为低副,但结构尺寸过小且间隙大的低副,导致了本应为低副的接触发生了变化,因此当机构倾斜一定角度后,滑块在重力作用下相对位置向下偏移,无法保证机构以理论运动角度进行,此时如果继续施加驱动力将出现机构卡死的状态,且在实际运行过程中间隙过大,也难以保证秧针运行角度。

因此,为了使机构能够顺畅运行,在不改变机构工作原理与运动学参数的基础上,结合取钵机构的受力分析,对机构进行结构完善,包括:将所有装配关系的间隙减小;将秧针滑道的结构长度增加;同时,通过理论分析可知,当 F_{CN} 固定不变时, F_{BN} 与滑块长度 h_2 成反比,当正压力与摩擦力合力在摩擦角范围内则会造成机构自锁,因此,为了减小驱动斜杆与滑块之间正压力、避免造成自锁现象,将与驱动斜杆配合的滑块长度增加;另外,为了验证驱动斜杆间夹角对于机构阻力的影响变化,又增加不同夹角的驱动杆件进行初步试验。

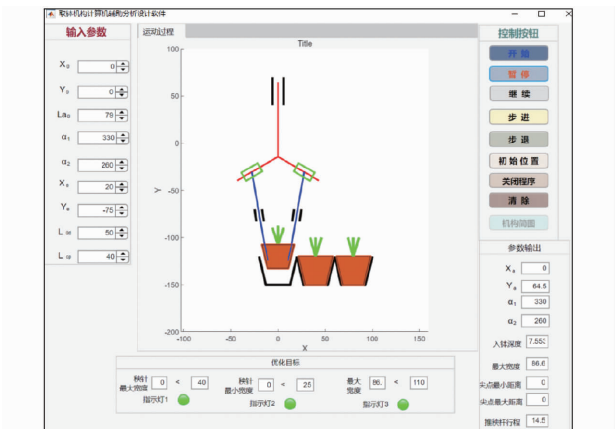


图9 取钵机构计算机辅助分析设计软件界面

Fig.9 Computer aided analysis and design interface of picking seedling pot mechanism

通过结构方面的改进,对取钵机构物理样机进行验证时得到,当仅将秧针滑道结构长度增加时,机构运行不再出现卡顿现象;当仅将滑块长度增加时,卡顿现象缓解,且滑块长度越长机构顺畅度越好;当以上两者同时改进,机构运行顺畅;当同时改进的基础上,再将驱动斜杆间的角度减小时,机构运行顺畅,但夹角逐渐增大到一定角度时,机构出现卡顿以及卡死的现象。

因此,初步验证试验结果与理论分析保持一致。但在实际应用中,滑块长度在 26 mm 时已经满足顺畅运行要求;在驱动斜杆间夹角减小为 100°时,驱动斜杆与滑道底座会发生干涉,且驱动杆的行程过大,不能满足优化设计软件的目标要求。最后确定取钵机构物理样机结构,如图 10 所示。

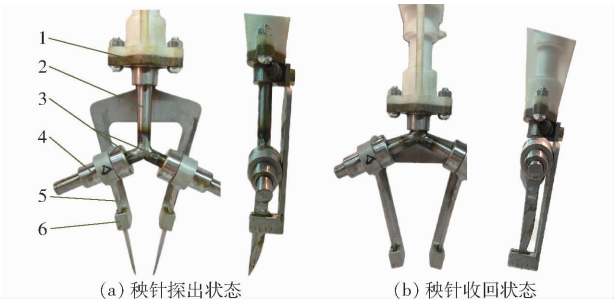


图 10 取钵机构物理样机

Fig. 10 Physical prototype of picking seedling pot mechanism

1. 驱动直杆滑道 2. 驱动直杆 3. 驱动斜杆 4. 滑块 5. 秧针 6. 秧针滑道

4 试验

为探究取钵机构更优的工作参数并验证其整体工作性能,将取钵机构配置在钵苗移栽取苗机构上,同时完成试验台架搭建,开展取苗性能试验研究。

试验前,首先进行番茄钵苗育秧:试验选取京采 8 号番茄品种,育苗钵盘为 72 穴(6 × 12)四棱台形状穴孔苗盘,材质为聚氯乙烯塑料,上钵盘单孔穴口上部尺寸 40 mm × 40 mm,底部尺寸为 15 mm × 15 mm,穴孔深度为 40 mm,相邻穴孔中心距为 40 mm,外形尺寸 530 mm × 270 mm,单个容积为 40 mL;选用有机营养育苗基质培育,主要成分泥炭、蛭石、珍珠岩质量比 2:1:1,选取适合移栽苗龄为 40 d,测试前番茄钵苗进行炼苗处理。

4.1 试验因素与评价指标

选取驱动斜杆间夹角、钵体含水率^[28-29]和入钵深度^[30]为试验因素。秧针扎入钵体后,会对钵体造成一定程度的损伤,当钵体完整率小于 50% 时就会严重降低钵苗的成活率^[31-32]。在夹取过程中,钵苗未被取出、中途掉落、取出后钵体完整率小于 50% 均视为取苗失败。因此,番茄钵苗取苗试验以钵体完整率和取苗成功率作为试验评价指标,考察取苗性能效果。

4.2 试验设计与方法

在东北农业大学农业机械化实验中心对取钵机构的实际工作情况在台架试验研究,搭建番茄钵苗移栽探出式取钵机构试验装置,将不同组参数的探出式取钵机构物理样机安装在旱地番茄钵苗移栽取苗机构上,并通过电机驱动传动装置实现连续自动供秧与取苗机构的配合作业运动。

对整体移栽取苗机构进行空转试验与带苗试验验证,如图 11 所示。探出式取钵机构作业时,可顺利在取苗过程中关键位置分别完成探出秧针入钵、保持秧针角度整体拔取、整体移动输送钵苗、栽植位置秧针回收推秧等工序,与理论设计基本保持一致,实现了探出式取钵机构稳定的取苗性能,并通过投

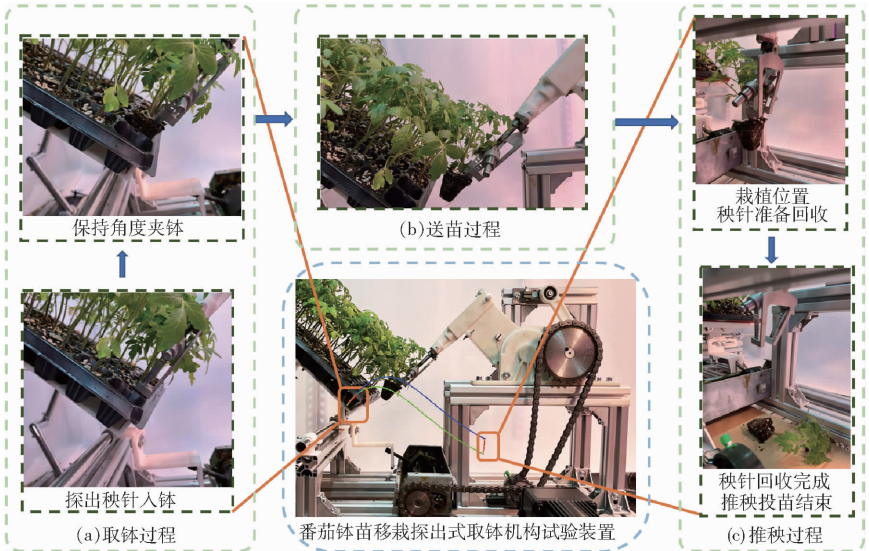


图 11 番茄钵苗移栽探出式取钵机构试验过程

Fig. 11 Experimental process of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting

苗后钵苗状态初步检测,结果为基本没有发生伤根现象,验证了机构性能的可行性与合理性。

为了进一步优化取钵机构的工作参数,采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法。共有 23 组试验,采用随机样本法对每组试验取苗 50 株,取其平均值作为每组试验的结果数据。结合数字化优化软件、结构改进试验、含水率测定预试验,各因素编码如表 1 所示。评价指标钵体完整率以 Y_1 表示,取苗成功率以 Y_2 表示。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Codes of test factors

编码	因素		
	驱动斜杆间夹角	钵体含水率	入钵深度
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/\%$	x_3/mm
1.682	137	70.0	31
1	130	65.0	29
0	120	57.5	26
-1	110	50.0	23
-1.682	103	45.0	21

4.3 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。采用 Design-Expert 8.0.6 对结果进行数据处理。方差分析结果如表 3 所示,驱动斜杆间夹角与入钵深度对钵体完整率和取苗成功率影响极显著 ($P<0.01$),钵体含水率对钵体完整率($P=0.0268$)和

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Test protocol and results

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	88.61	61.51
2	1	-1	-1	81.71	52.78
3	-1	1	-1	86.18	71.89
4	1	1	-1	82.47	52.78
5	-1	-1	1	90.59	94.44
6	1	-1	1	86.69	83.33
7	-1	1	1	91.64	93.06
8	1	1	1	89.13	80.55
9	-1.682	0	0	92.17	83.28
10	1.682	0	0	86.56	61.11
11	0	-1.682	0	80.61	76.39
12	0	1.682	0	82.79	79.17
13	0	0	-1.682	87.76	51.39
14	0	0	1.682	94.66	95.83
15	0	0	0	94.28	88.89
16	0	0	0	94.01	88.89
17	0	0	0	93.14	87.50
18	0	0	0	93.86	86.11
19	0	0	0	93.78	86.11
20	0	0	0	94.59	87.50
21	0	0	0	94.34	87.50
22	0	0	0	92.92	87.67
23	0	0	0	93.65	88.89

取苗成功率 ($P=0.038\ 3$) 影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)。去除不显著项后得到回归方程为

$$\begin{cases} Y_1=93.84-1.93X_1+0.4X_2+2.26X_3+0.57X_1X_2+\\ \quad 0.52X_1X_3+0.64X_2X_3-1.52X_1^2-4.34X_2^2-0.91X_3^2 \\ Y_2=87.67-6.47X_1+0.8X_2+13.76X_3-1.47X_1X_2-\\ \quad 1.82X_2X_3-5.34X_1^2-3.54X_2^2-5.04X_3^2 \end{cases}$$

(19)

表 3 方差分析
Tab.3 Analysis of variance

评价 指标	方差 来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	470.11	9	52.23	148.33	<0.000 1 **
	X_1	51.18	1	51.18	145.34	<0.000 1 **
	X_2	2.19	1	2.19	6.23	0.026 8 *
	X_3	68.99	1	68.99	195.90	<0.000 1 **
	X_1X_2	2.62	1	2.62	7.45	0.017 2 *
	X_1X_3	2.20	1	2.20	6.26	0.026 5 *
	X_2X_3	3.33	1	3.33	9.45	0.008 9 **
	X_1^2	37.92	1	37.92	107.69	<0.000 1 **
	X_2^2	290.59	1	290.59	825.20	<0.000 1 **
	X_3^2	12.91	1	12.91	36.66	<0.000 1 **
	残差	4.58	13	0.35		
	失拟	2.17	5	0.43	1.44	0.308 3
	误差	2.41	8	0.30		
	总和	474.68	22			
Y_2	模型	4 240.64	9	471.18	288.00	<0.000 1 **
	X_1	576.74	1	576.74	352.52	<0.000 1 **
	X_2	8.69	1	8.69	5.31	0.038 3 *
	X_3	2 565.54	1	2 565.54	1 568.11	<0.000 1 **
	X_1X_2	17.35	1	17.35	10.60	0.006 3 **
	X_1X_3	2.23	1	2.23	1.36	0.264 4
	X_2X_3	26.43	1	26.43	16.15	0.001 5 **
	X_1^2	468.30	1	468.30	286.23	<0.000 1 **
	X_2^2	193.55	1	193.55	118.30	<0.000 1 **
	X_3^2	392.49	1	392.49	239.90	<0.000 1 **
	残差	21.27	13	1.64		
	失拟	11.85	5	2.37	2.01	0.180 9
	误差	9.42	8	1.18		
	总和	4 261.91	22			

注：* 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)，** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

试验过程中发现,驱动斜杆间夹角从 120°到 137°变化时秧针入钵逐渐困难,夹角从 120°到 103°变化时秧针入钵越顺利。驱动斜杆与秧针连接处滑块长度 h_2 在 26 mm 条件下,机构未出现自锁现象。取苗试验结果与理论分析和样机改进试验结果保持一致。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件 Optimization 模块,得到取苗参数在驱动斜杆间夹角 112°、钵体含

水率 57.5%、入钵深度 28.4 mm 时取苗效果最佳,软件预测的钵体完整率为 95.3%,取苗成功率为 96.8%。对优化结果进行验证试验,每组取苗 50 株,重复 3 组,得到钵体完整率为 96.44%,取苗成功率为 97.06%。

5 结 论

(1)提出了一种配合系列钵苗取苗机构与连续送秧机构使用的探出式取钵机构,实现取苗位置迅速以固定角度探出扎入秧苗土钵,随移栽臂运动送苗,在栽植部位以同样固定角度收回秧针完成推秧投苗,避免了对钵土根系的损伤,降低了钵苗取苗机

构的优化难度。
(2)建立探出式取钵机构理论力学分析模型,获得了不同参数对秧针扎入钵土驱动杆所受最小驱动力的影响,开发出番茄钵苗移栽探出式取钵机构计算机辅助设计软件,实现机构的运动学分析。
(3)通过物理样机台架性能试验,验证了探出式取钵机构的可行性与合理性,并以驱动斜杆间夹角、钵体含水率、入钵深度为因素进行多因素试验,根据试验结果对参数进行优化,在驱动斜杆间夹角 112°、钵体含水率 57.5%、入钵深度 28.4 mm 时,对优化结果进行验证,得到钵体完整率为 96.44%,取苗成功率为 97.06%,满足钵苗移栽作业性能要求。

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] 张学东,刘立晶,宁义超,等.蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):115-124,134.
ZHANG Xuedong, LIU Lijing, NING Yichao, et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clamping of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.1):115-124,134. (in Chinese)

[3] 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 insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22):96-104. (in Chinese)

[4] 马瑞峻,樊元君,黄倩,等.2自由度夹子式水稻穴盘钵苗拔抛机械手设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(6):35-43.
MA Ruijun, FAN Yuanjun, HUANG Qian, et al. Design and experiment of 2-DOF clamp-type manipulator for transplanting of rice potted-seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):35-43. (in Chinese)

[5] 周海丽,刘珂,童俊华,等.温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(5):82-90.
ZHOU Haili, LIU Ke, TONG Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5):82-90. (in Chinese)

[6] ISLAM M N, IQBAL M Z, ALI M, et al. Kinematic analysis of a clamp-type picking device for an automatic pepper transplanter[J]. Agriculture, 2020, 10(12):627.

[7] 马程宏,饶益成,童俊华,等.温室叶菜种苗双排移植手稀植部件设计与时序优化试验[J].农业机械学报,2022,53(4):60-69.
MA Zenghong, RAO Yicheng, TONG Junhua, et al. Sparse transplanting mechanism design with double row end effectors and work time sequence optimization for hydroponics pot seedlings in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4):60-69. (in Chinese)

[8] ZHAO X, GUO J, LI K, et al. Optimal design and experiment of 2-DoF five-bar mechanism for flower seedling transplanting [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105746.

[9] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.

[10] YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1991, 7(4):493-498.

[11] HAKLI R, LEHTO L, LEHTO E. Method and device for planting balled seedlings: U.S. Patent 4,893,571[P]. 1990-01-16.

[12] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):13-19.

[13] NAKASHIMA H, KONDO T, KANESAKI M. Seedling planting apparatus: U.S. Patent 5,477,791[P]. 1995-12-26.

[14] XIN Liang, LÜ Zhijun, WANG Wenqing, et al. Optimal design and development of a double-crank potted rice seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(1):31-40.

[15] 刘继展,李茂,李萍萍,等.一种穴盘草莓秧苗移栽末端执行器及其取放苗控制方法:CN104855025A[P]. 2015-08-06.

[16] HAN L, KUMI F, MAO H, et al. Design and tests of a multi-pin flexible seedling pick-up gripper for automatic transplanting [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6):949-957.

- [17] HU J, YAN X, MA J, et al. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 107: 64 – 72.
- [18] HAN L, MAO H, HU J, et al. Development of a doorframe-typed swinging seedling pick-up device for automatic field transplantation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(2): e0210.
- [19] 俞高红,陈志威,赵匀,等.椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J].机械工程学报,2012,48(13): 32 – 39.
YU Gaohong, CHEN Zhiwei, ZHAO Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 32 – 39. (in Chinese)
- [20] YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 43 – 55.
- [21] 赵雄.二阶非圆齿轮行星轮系钵苗移栽机取苗机构优化设计与试验研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.
ZHAO Xiong. Option design and experiment research of planetary gear train with two-order non-circular gears seedling pick-up mechanism on seedling transplanter[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)
- [22] 赵匀,刘志平,辛亮,等.水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(4):87 – 93.
ZHAO Yun, LIU Zhiping, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 87 – 93. (in Chinese)
- [23] 赵匀,刘星,薛向磊,等.茄子钵苗移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(5):152 – 160.
ZHAO Yun, LIU Xing, XUE Xianglei, et al. Optimal design and experiment of potted eggplant seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 152 – 160. (in Chinese)
- [24] 韩青,李天成.一种新的平面机构自由度通用计算公式[J].机械传动,2015,39(3):153 – 157.
HAN Qing, LI Tiancheng. A new universal formula of degree of freedom for planar mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(3): 153 – 157. (in Chinese)
- [25] 刘言松,曹巨江,梁金生,等.曲柄群机构自由度计算的旋量法[J].轻工机械,2018,36(6):33 – 35.
LIU Yansong, CAO Jujiang, LIANG Jinsheng, et al. Computing method of DOF of crank group mechanism based on screw theory[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(6): 33 – 35. (in Chinese)
- [26] 王文卿.钵苗移栽机构夹钵式末端执行器的优化设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
WANG Wenqing. Optimization design and experimental study of pot-clipping style end effector for pot seedling transplanting mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [27] 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [28] 韩绿化,毛罕平,严蕾,等.穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J].农业机械学报,2015,46(7):23 – 30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 23 – 30. (in Chinese)
- [29] 杜森,高祥照.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [30] 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)
- [31] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260 – 265. (in Chinese)
- [32] 唐艳芹,王玉兴,姚庆伟,等.钵体苗盘外盘根现象的试验研究[J].农机化研究,2007,29(11):164 – 166.
TANG Yanqin, WANG Yuxing, YAO Qingwei, et al. Experimental study on the phenomenon of root disking outside the pot seedling plate[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(11): 164 – 166. (in Chinese)