

草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验

刘继展¹ 李 茂¹ 李 男¹ 李萍萍² 赵密珍³ 岳 巍⁴

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037;
3. 江苏省农业科学院园艺所, 南京 210014; 4. 山西省农产品加工装备技术管理站, 太原 030000)

摘要: 穴盘草莓的长苗、大苗株特点和弓背向外的特殊移栽要求,使其自动化移栽存在困难。首先进行了草莓苗坨的单指刺入力和拔苗阻力试验,进而提出并开展了有约束苗坨的双指夹拔破坏试验。试验发现双针取苗指的苗坨刺入阻力与刺入速度、深度、含水率相关,50 mm 和 100 mm 深度的最大刺入阻力分别可达 21.47 N 和 57.09 N。双指的夹茎拔苗阻力可达 9.64 N,而当取苗针滑移量为 20 mm 和 40 mm 时约束夹拔力分别可达 10.85 N 和 42.5 N,但过大滑移量对精准可靠移栽极为不利。根据草莓穴盘苗的物理特性、苗坨的力学特性,设计了带双爪可同步换向变距的四针式移栽末端执行器。以有效缩减取苗爪宽度和摆动传动角为双重目标进行了多连杆定角斜插式双指四针取苗爪的非线性规划,得到了优化的机构参数。换向变距装置通过微型行程开关与微型电磁吸盘配合,实现了双取苗爪的快速同步换向变距和可靠定位。验证试验表明,在加速度不大于 0.20 mm/s² 时取出率和取苗成功率分别在 93% 和 90% 以上,加速度过大则可能造成取苗针滑脱和苗坨下部断裂,换向变距装置有效解决了弓背朝外问题和相邻两列同时移栽的间距调整问题,栽苗试验中放苗顺利且直立度和深度均达到移栽要求,且移栽后 10 d 草莓苗完全成活,该末端执行器可满足草莓穴盘苗的移栽作业需要。

关键词: 草莓; 穴盘苗; 移栽; 末端执行器

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0049-10

Design and Test of End-effector for Automatic Transplanting of Strawberry Plug Seedlings

Liu Jizhan¹ Li Mao¹ Li Nan¹ Li Pingping² Zhao Mizhen³ Yue Wei⁴

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3. Institute of Horticulture, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China

4. Station of Agricultural Products Processing Equipment and Technology Management, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Automatic transplanting of strawberry plug seedlings is difficult since both the plant and root lumps are much bigger and their arches must be kept outward when they are inserted into the soil and root. The inserting forces and extraction forces were tested, then a novel test of constrained extraction and the root lump rupture were designed and carried out. It was found that the inserting forces were related to speed, depth and moisture content, and the maximum inserting forces were 21.47 N and 57.09 N when the inserting depths were 50 mm and 100 mm, respectively. The maximum extraction force was 9.64 N, while the constrained extraction forces reached 10.85 N and 42.5 N when the fingers' sliding displacements were 20 mm and 40 mm, respectively, but big sliding displacement was not ideal for transplanting precisely. Based on physical and mechanical characteristics of strawberry plug seedlings got

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 江苏省农业科技支撑重点项目 (BE2014406)、中国博士后科学基金项目 (2012M521013)、江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX16-1044) 和江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 刘继展 (1976—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机器人研究, E-mail: liujizhan@163.com

from the above tests, an end-effector for automatic transplanting was developed. The end-effector was composed of two grippers and one arch reversing mechanism. The gripper had two double-needle fingers and the inserting angle was fixed, which was helpful to realize large inserting depth in limited mechanism dimensions and avoid bruise and tearing of plants and root lumps, respectively. Taking reducing of gripper width and swing range of connecting rod as dual objectives, optimal mechanism parameters of the gripper were obtained by performing linear programming. The arch reversing mechanism transformed distance between seedlings form picking to placing and changed the arch orientation simultaneously with cooperated limit switches and electromagnets. The experiments showed that the successful rates of extraction and non-damage picking were above 93% and 90%, respectively, when the picking acceleration was no more than 0.20 m/s^2 . Otherwise, larger picking acceleration may lead to root lumps broken and fingers slid out. It was found that the arch reversing mechanism was able to transform distance between seedlings and change the arch orientation precisely. Finally, all seedlings were inserted into pre-punched holes successfully and depth and upright degree were qualified, and survival rate reached 100% after 10 d of transplanting. This novel end-effector was proved to be able to satisfy the need of automatic transplanting of strawberry plug seedlings.

Key words: strawberry; plug seedling; transplant; end-effector

引言

移栽是草莓种植中耗时耗工的主要环节,大力发展草莓穴盘苗的自动化移栽是草莓产业发展的必然要求。末端执行器是穴盘苗自动移栽的关键部件,对移栽成功率与作业效率起着决定性作用^[1-5],国内外学者近年来进行了很多针对性研究。韦康成^[6]、韩绿化^[7-9]等先后设计了应用于黄瓜穴盘苗移栽的末端执行器,TING等^[10]、金鑫^[11]、孙国祥等^[12]、梁喜凤等^[13]分别开发了番茄穴盘苗的移栽末端执行器,KANG等^[14]对比了多种指型的末端执行器对生菜移栽的效果,CHOI等^[15]开发了白菜穴盘苗末端执行器。YANG等^[16]、黄世欣等^[17]、吕英石等^[18]设计了多种花卉移栽的参数可调节末端执行器,刘继展等^[19]设计了面向立柱的小苗移栽末端执行器。上述末端执行器的研究主要针对蔬菜、花卉的72、128或200孔等小型高密度穴盘的小苗移栽作业,尚未见有关草莓穴盘苗的自动移栽装备及其末端执行器的研究报道。

本文在草莓穴盘苗移栽期的特殊形态、力学特性和特殊移栽分析的基础上,进行末端执行器的设计与试验,从而为实现草莓穴盘苗的自动移栽提供技术支持。

1 草莓穴盘苗物理与力学特性

1.1 草莓穴盘苗物理特性

草莓最常用的育苗方式是利用植株抽生出匍匐茎来形成子株,育苗期从4月份持续到8月份,采用穴盘育苗有助于草莓苗的根系发育,提高草莓的栽

培质量,已经得到逐步推广^[2]。

试验用草莓穴盘苗由江苏省农业科学院园艺所提供,品种为“宁玉”,控制苗龄约为90 d,从而促使子苗生长健壮,每株含4或5片功能叶,满足冬季发育和坐果的需要。育苗穴盘为4×8的32孔穴盘,整体长×宽为540 mm×240 mm,高度为100 mm,穴孔上下口径边长分别为60 mm、24 mm。育苗基质为草炭、蛭石、珍珠岩按照3:2:1均匀混合而成,通气空隙体积分数为25%、持水空隙体积分数为50%。草莓穴盘苗根长约100 mm,根系在基质中穿插、缠绕、包络,形成了良好的基质-根系结合体(图1a)。

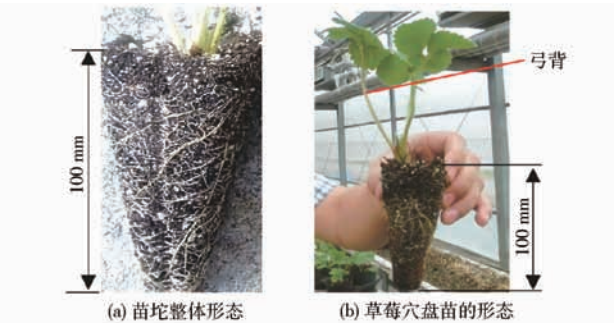


图1 草莓穴盘苗的苗坨与苗株形态

Fig. 1 Strawberry plug seedlings

首先利用卷尺对5盘共160株穴盘苗的植株高度、冠层展幅进行测量和统计。穴盘苗的植株高度、冠层展幅基本符合正态分布,株高为11~18 cm占植株的70.6%,而80.6%的植株冠层直径在11~19 cm范围内。从表1对比可以看出,草莓穴盘苗比生菜、黄瓜、番茄等适合移栽期的蔬菜穴盘苗育苗时间长、植株高、展幅大。同时草莓苗具有弓背(图1b),花序从弓背伸出,高畦垄或高架栽培时要

求弓背方向朝向垄沟或架外,以保证草莓品质和易于收获^[20]。

表 1 草莓与其他蔬菜穴盘苗的形态参数比较
Tab.1 Parameters comparison

作物 种类	苗龄/ d	叶柄数/ 个	叶片数/ 个	株高/ mm	展幅/ mm
生菜 ^[12]	24	1	4	42	30
黄瓜 ^[21]	22	1	3	42	106.4
番茄 ^[11]	39	1	5~6	93.1	83.7
辣椒 ^[22]	42	1	6~7	167.2	120
草莓	90	4	12	160	150

1.2 草莓苗坨力学特性试验

1.2.1 试验材料与设备

为分析草莓穴盘苗坨在不同含水率区间的力学特性差别,通过浇水量差异将试验分为两组含水率水平,利用烘干法测得低水平组含水率为 40.65%~44.84%,高水平组含水率为 65.41%~69.17%。

由于草莓大苗坨长度和质量分别达到 100 mm 和 90~120 g,且根系发达,为保证顺利入土、减少对根系伤害的同时提供足够的拔苗力,设计了 2 mm 厚不锈钢材质的单指双针取苗指结构(图 2)。将 DESIK 推拉力计(量程 100 N,精度 0.01 N)竖直固定于直线模组(Hiwin CS150-1000 型)的滑台上,并通过 PLC 控制器(三菱 Fx2n 型)进行竖直速度与加速度的设定。

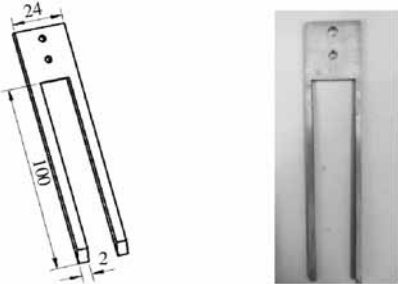


图 2 取苗指结构图
Fig.2 Structure of picking finger

1.2.2 试验方法

(1) 苗坨单指刺入阻力特性试验

为测量取苗指刺入苗坨受到的阻力,将单指双针取苗指固定在 DESIK 推拉力计的连接头上,直线模组带动推拉力计和取苗指竖直向下刺入草莓穴盘苗苗坨(图 3)。取刺入深度为 100 mm,通过 PLC 控制器设定滑台直线速度分别为 50、100、200 mm/s,模组驱动手指垂直向下插入苗坨,插入深度为 100 mm,推拉力计测量和记录力的变化。每组试验重复测量 10 次。

(2) 苗坨拔苗力学特性

为测试将草莓苗整体拔出穴盘的力学规律和观

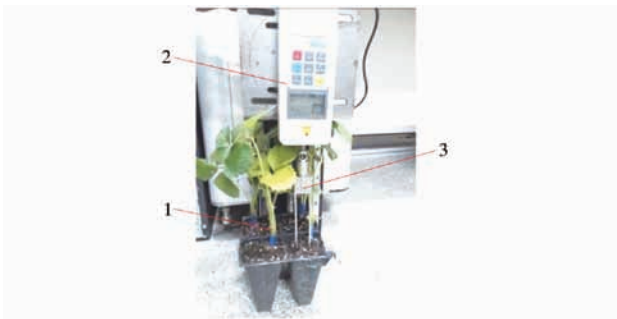


图 3 刺入阻力试验现场图
Fig.3 Test picture of penetration force
1. 穴盘苗 2. 推拉力计 3. 取苗指

察拉拔苗出盘过程中苗坨的状态,将草莓苗茎秆的底端用电工塑料胶带束紧包裹,用固定在推拉力计连接头上的 F0053 夹头夹紧柔性材料和茎秆(图 4),直线模组带动草莓苗分别以加速度 0.05、0.20、0.80 m/s²向上拔苗,拔苗位移为 50 mm,由推拉力计实时测量和记录拉拔力的变化。每一加速度下分别随机选择 10 株健康苗进行拉拔试验。



图 4 拔苗阻力测试现场图
Fig.4 Test picture of extraction force
1. 穴盘苗 2. 推拉力计 3. F0053 夹具

(3) 约束苗坨的双指夹拔破坏试验

为判断草莓苗坨强度所许可的最大取苗针拉拔力,将取苗针驱动装置固定在数显式推拉力计的测试头上,驱动双取苗针沿 15°斜插入苗坨,插入深度约为 50 mm。以压板约束苗坨和穴盘上表面,由直线模组带动取苗针夹拔苗坨,分别以加速度 0.05、0.20、0.80 m/s²上升,直至取苗针从苗坨内脱出(图 5)。推拉力计测量和记录约束夹拔力的变化。

1.3 苗坨力学特性试验结果

1.3.1 草莓苗坨的单指刺入阻力-位移规律

刺入阻力反映了苗坨的硬度及根须盘绕强度等。图 6 中高含水率组在 50、100、200 mm/s 速度下,入土阻力峰值分别是 13.44、30.75、45.53 N;低含水率组在 3 种速度下,入土阻力峰值分别为 21.82、37.49、57.09 N,入土阻力均随着速度、刺入苗坨深度的增加而增加,在相同速度下低含水率苗坨的入土阻力更大。

由于根系发达、刺入深度大和单指双针结构的

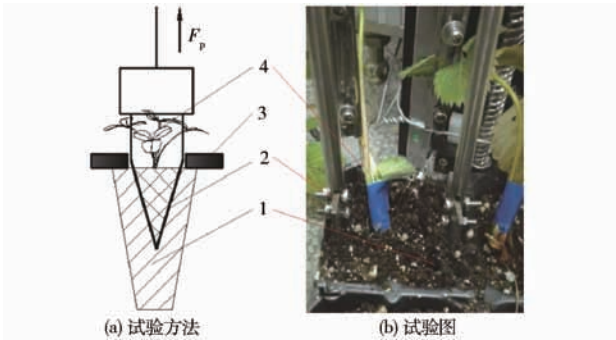


图5 双指夹拔破坏试验方法

Fig. 5 Constraint extraction test method of plug seedlings

1. 苗坨 2. 取苗指 3. 压板 4. 穴盘苗

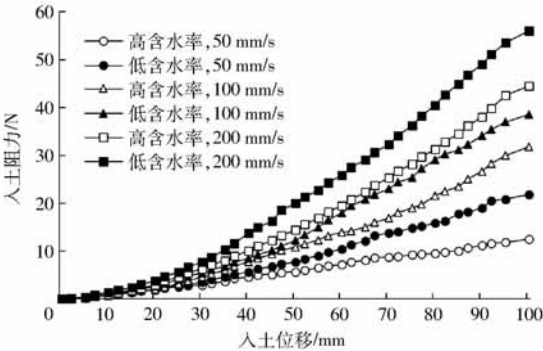


图6 刺入阻力-位移曲线

Fig. 6 Force-displacement curves of inserting test

影响,同样速度下草莓苗坨的刺入力超过梁喜凤等^[13]、KANG等^[14]所测定的番茄(20 mm深度)与生菜苗坨刺入力(30 mm深度)结果的1~2倍。

1.3.2 夹茎拔苗阻力-位移规律

夹茎拔苗阻力是苗坨与穴孔侧壁、底面间粘附力和自身重力的综合体现。由于根系包络良好,试验中苗坨能被整体拔出,未出现苗坨断裂、破碎的情况。图7中,在0.80、0.20、0.05 m/s²加速度下,高含水率组拔苗阻力峰值分别为9.64、7.53、5.67 N,低含水率组则分别为6.76、5.32、3.71 N。同含水率组内拔苗阻力最大值与加速度呈正相关,高含水率组拔苗阻力大于低含水率组,拔苗时苗坨与穴孔壁的粘附距离为0~15 mm,其后拔苗阻力主要来自苗坨的质量。人工移栽时,亦通常在移栽前24 h停止浇水,以易于拔出苗坨。

由于草莓苗坨长、质量大、与穴孔壁的接触面积大,其最大拔苗阻力比韩绿化^[7]、韦康成^[6]分别测定的22 d苗龄、54.21%~60.47%含水率的黄瓜穴盘苗和25 d苗龄、61.20%~79.24%含水率的黄瓜苗最大拔苗阻力结果大1~3倍。

1.3.3 有约束苗坨的双指夹拔力-位移规律

约束条件下苗坨的双指夹拔力是取苗针通过夹持苗坨所施加的向上拉拔能力,是取苗针结构尺寸、入土深度、角度和苗坨强度的综合反映。

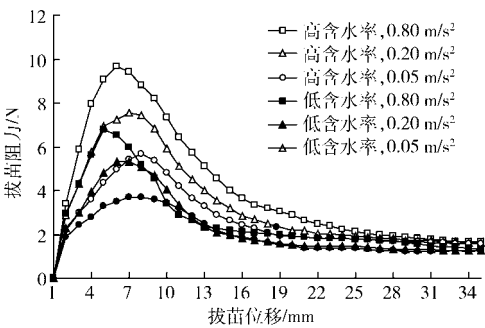


图7 夹茎拔苗阻力与拔苗位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curves of exaction test

试验中双指形成锥形向上移动,指面与苗坨接触面间的挤压力不断增大,苗坨内产生指面夹持部位的挤压变形和与相邻区域间的剪切,直至指针从苗坨中滑脱出。如图8所示,指针滑脱后,在苗坨表面形成4个孔洞,但苗坨中心区域由于根系发达而未被破坏。



图8 苗坨被约束夹持破坏表面

Fig. 8 Destroyed surface of plug seedlings in constraint extraction test

图9中,在距离苗坨上表面大约10 mm位置时约束夹拔力达到最大,在0.80、0.20、0.05 m/s²加速度下,高含水率组苗坨的有约束夹拔力峰值分别为23.51、26.5、31.1 N,低含水率组则分别为28.7、33.8、42.5 N。有约束夹拔力与加速度呈正相关,且低含水率组的拔苗力要大于高含水率组,表明低含水率组苗坨能够提供更大的夹拔力。综合拔苗阻力与约束夹拔力,低含水率下苗坨易于被拔出穴盘,且

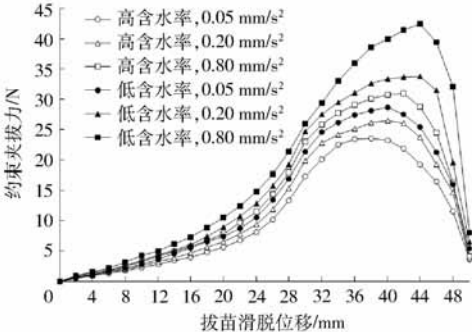


图9 约束夹拔力与拔苗滑脱位移曲线

Fig. 9 Force-deformation curves of constraint extraction test

苗坨能承受的破坏力亦更大,因而低含水率组更适用于苗坨的移栽作业。

从约束夹拔力与手指滑脱位移变化曲线中看出,在 10 ~ 20 mm 的滑脱位移时,约束夹拔力开始超过夹茎拔苗力,而滑脱位移继续增加尽管可获得更大的约束拉拔力,但移栽作业中将导致夹持不稳定,放苗出现过 大且不可控的定位和直立度误差。

2 草莓穴盘苗末端执行器设计

2.1 设计要求

根据物理与力学特性试验结果,草莓穴盘苗的移栽与小型穴盘苗相比具有一定的特殊性:

(1)草莓穴盘苗育苗期较长,具有典型的大苗移栽特征,叶片重叠覆盖严重,取苗爪竖直向下接近的取苗方式不可避免造成枝叶的撕裂、碰折损伤;同时在穴盘苗株间的有限间隙内,末端的动作亦可能造成茎秆或枝叶的碰伤与折断。

(2)草莓穴盘苗的长苗坨造成所需刺入深度、指针行程和拉拔力更大,同时亦需要长取苗指以避免高大苗株,由锥角夹拔的原理所决定在有限空间内长针、大行程的尺寸要求和拉拔的更大施力要求下出现矛盾。

(3)为满足草莓栽培的弓背朝外要求,末端执行器除了成功拉拔外还需实现调整弓背朝向的特殊功能。

2.2 总体方案设计

2.2.1 取苗爪方案设计

针对竖直向下接近取苗的损伤问题,采用 L 型路径的侧面水平接近取苗方式(图 10),同时采用多连杆定角斜插机构,手指沿定直线伸出和缩回,取苗过程中取苗指不产生摆动,在保证刺入深度的同时避免摆动对相邻苗株的可能碰伤以及对苗坨局部的可能撕裂(图 11)。

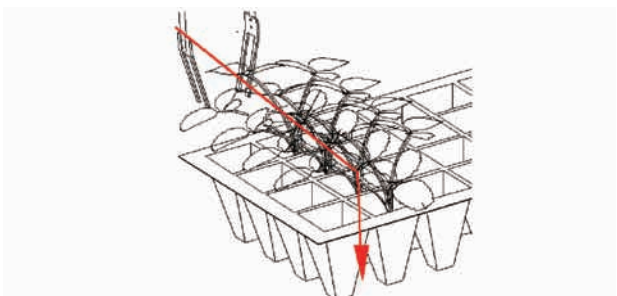


图 10 L 型取苗路径
Fig. 10 Picking path of L style

2.2.2 弓背朝向调整方案设计

鉴于草莓苗弓背朝外要求和草莓栽培为背靠背双列栽植的农艺特点,在取匍匐茎育苗时统一穴盘苗弓背方向,并采用双苗同取和换向同栽的策略。

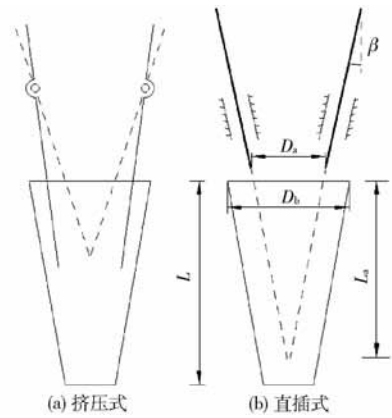


图 11 取苗方式的比较

Fig. 11 Comparison of different picking methods

如图 12,两个取苗爪平行布置,取苗时近端取苗爪离旋转中心为 H_1 ,而远端取苗爪布置在同侧 H_2 距离,两爪之间的距离 H_a 与相邻穴孔间距一致。取苗后近端取苗爪姿态保持不变,而远端取苗爪绕中心线旋转 180° ,从而在实现苗距变换的同时实现弓背换向。

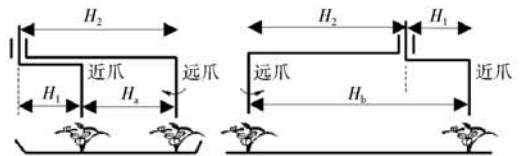


图 12 双爪换向变距方案

Fig. 12 Scheme of arch reversing and distance transforming for two grippers

2.3 换向变距机构参数设计

图 12 中取苗时苗距为相邻穴孔距 H_a ,放苗时双爪作业的苗距为相邻地垄或者高架的间距 H_b ,其参数关系为

$$H_a = H_2 - H_1 \quad (1)$$

$$H_b = H_2 + H_1 \quad (2)$$

式中 H_a ——近端和远端取苗爪指尖间距,为两相邻穴孔中心距,mm

H_1 ——近端取苗爪手指水平折弯距离,mm

H_2 ——远端取苗爪手指与旋转中心距离,mm

H_b ——高架上两栽培槽的间距,mm

32 孔穴盘相邻两穴孔的中心距 H_a 为 64 mm,背靠背式的地垄或者高架间距 H_b 要求约为 150 mm,经式(1)、(2)计算 H_1 和 H_2 分别为 43、107 mm。

2.4 取苗爪机构参数优化

2.4.1 机构参数关系

由图 13,机构各尺寸参数满足如下关系:

(1)取苗指的竖直取苗深度计算公式为

$$L_a = l_{D_1E_1} - l_{D_2E_2} - \varepsilon = (L_{BC} \sin \alpha_1 - L_{CD} \sin \gamma_1) - (L_{BC} \sin \alpha_2 - L_{CD} \sin \gamma_2) - \varepsilon \quad (3)$$

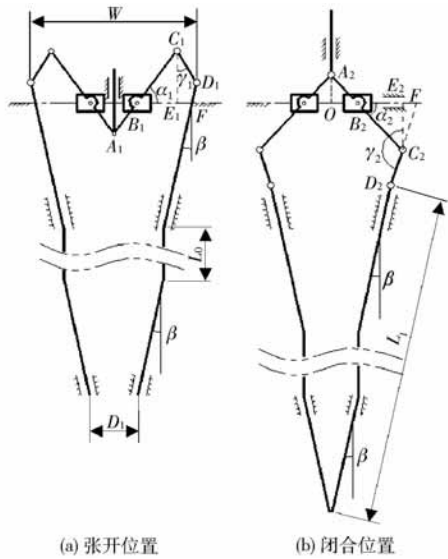


图 13 取苗爪结构简图
Fig. 13 Structure schematics of gripper

式中 L_a ——取苗入土深度, mm
 $l_{D_1E_1}$ —— D 点上极限位置 D_1 到 B 点所处水平方向线的垂直距离, mm
 $l_{D_2E_2}$ —— D 点下极限位置 D_2 到 B 点所处水平方向线的垂直距离, mm
 $L_{BC}、L_{CD}$ ——杆 $BC、CD$ 的长度, mm
 α ——连杆 AB 与水平线的夹角, $\alpha_1、\alpha_2$ 分别为初始、结束时的连杆 AB 与水平线夹角, $\alpha_1 = -\alpha_2$
 γ ——杆 CD 与竖直方向的夹角, $\gamma_1、\gamma_2$ 分别为初始、结束时杆 CD 与竖直方向夹角
 ε ——取苗时指尖与穴盘表面的初始高度, 取为 10 mm

(2) 为配合 L 型路径的接近取苗方式, 避免末端执行器本体与苗株的干涉, 两取苗指间竖直空间应超过苗株高度与刺入深度之和, 即

$$L_1 = (L_0 + \varepsilon) / \cos\beta + S \quad (4)$$

式中 L_1 ——取苗针整体长度, mm
 L_0 ——取苗针二次折弯的竖直长度, mm
 β ——取苗针的刺入角度, ($^\circ$)

(3) 由图 13, 两取苗针顶端间的水平距离为

$$W = 2(L_{AC}\cos\alpha + L_{CD}\sin\gamma) \quad (5)$$

式中 W ——两取苗指顶端间的水平距离, mm
 L_{BC} ——杆 BC 的长度, mm

当两取苗指位于取苗动作初始位置, 即连杆 AB 与水平线的夹角为 α_1 时, W 为最大 $[W]$, 并决定了取苗爪本体的宽度 W_0 。

(4) 取苗前指间开度

$$D_a = [W] - 2[L_1\sin\beta - (L_0 + \varepsilon)\tan\beta] \quad (6)$$

式中 D_a ——取苗动作初始位置时两取苗指端之

间的开度, mm

(5) 式(3)与式(6)中, 杆 CD 与竖直方向的夹角 γ 为各杆长及角 $\alpha、\beta$ 的函数

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{L_{OF} + (L_{BC}\sin\alpha - L_{CD}\cos\alpha)\tan\beta}{L_{CD}} - \frac{(L_{BC} + L_{AB})\cos\alpha}{L_{CD}}\right) \quad (7)$$

式中 L_{OF} ——取苗指定直线与 B 点所处水平方向线的交点 F 到中心线的垂直距离, 为定值, mm

2.4.2 目标函数的建立

取苗爪机构设计中, 在实现预定运动、动力要求的同时, 应有效控制连杆 AC 对称性摆动幅度 $\alpha_1 \sim \alpha_2$, 以保证多连杆机构的良好传力特性。同时压缩取苗爪整体宽度 W 从而有效控制取苗爪占用空间, 保证移栽过程各动作的灵活性。为此建立双重规划目标

$$\min\alpha_1 = L_a^{-1}(\alpha_1, \alpha_2) \quad (8)$$

$$\min[W] = W(\alpha_1, \beta) \quad (9)$$

式中 $L_a^{-1}(\alpha_1, \alpha_2)$ ——式(3)的反函数

2.4.3 约束条件

(1) 刺入深度要求为

$$L_a \geq [L_a] \quad (10)$$

式中 $[L_a]$ ——满足顺利取苗的足够拉拔力和取苗针小滑移需要的最小刺入深度
根据夹茎拔苗阻力与双指可施加拉拔力的试验结果, $[L_a]$ 取 50 mm。

(2) 取苗指长度要求

为避免取苗爪本体对草莓苗枝叶的碰撞, 在取苗过程中本体底部不应低于草莓植株的高度, 即

$$L_1 \geq [H] / \cos\beta \quad (11)$$

式中 $[H]$ ——草莓植株的高度, 根据表 1, 应大于 160 mm

(3) 刺入开度要求

结合 32 孔穴盘穴孔的大小、草莓苗茎在穴盘中的位置偏差、草莓叶柄在底部的束集程度, 该取苗爪的参数设计首先应考虑合适的开度。

$$D_b/2 \leq D_a \leq D_b \quad (12)$$

式中 D_b ——穴盘穴孔的边长, 为 60 mm

(4) 取苗爪宽度与厚度要求

在双爪同时取苗后, 经由换向变距装置带动翻转, 实现弓背变换和间距调整。如图 14, 为避免远端取苗爪 180°转动过程中与近端取苗爪的干涉, 要求远端取苗爪运动包络线不与近端取苗爪发生交叉, 根据几何关系有

$$R = \sqrt{(W_0/2)^2 + (B/2)^2} \leq H_2 - B/2 \quad (13)$$

式中 W_0 ——取苗爪本体宽度,mm
 R ——取苗爪旋转半径,mm
 B ——取苗爪厚度,mm

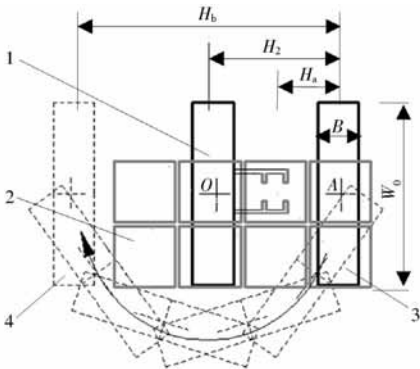


图 14 整体旋转示意图

Fig. 14 Rotation diagram of arch reversing machine
1. 近端取苗爪 2. 穴孔 3. 远端取苗爪取苗位 4. 远端取苗爪放苗位 O. 旋转轴心 A. 远端取苗爪中心

(5) 双指夹拔力要求
通过指针表面与苗坨间的接触挤压作用将苗拔出,双指拔苗力值应满足

$$F = 4L_aB_0[P]\tan\beta \geq [F]$$
 (14)

式中 F ——双指可施加的竖直夹拔力,N
 B_0 ——取苗针宽度,为 2 mm
 $[F]$ ——根据夹茎拔苗试验,所取各工况的夹茎拔苗阻力峰值,N
 $[P]$ ——保证双指夹拔中苗坨不发生破坏产生较小滑脱位移时苗坨强度

根据图 9 所示约束夹拔力与拔苗滑脱位移曲线,以最大滑移量 20 mm 时的约束夹拔力求得满足拔苗力值时的苗坨强度为 $(3.91 \sim 7.46) \times 10^4$ Pa。

2.4.4 机构参数优化

根据式(3)~(14)并代入已知参数,进行该多目标非线性问题的规划求解,得到优化并经取整的取苗爪机构参数和指标如表 2 所示。优化后取苗爪整体本体宽度和连杆 AB 的摆动范围分别为 137.8 mm 和 $\pm 50^\circ$,取苗爪可实现 60 mm 的入土深度和 40 mm 的开口宽度,并保证取苗爪本体底部 160 mm 的高度空间。

2.5 取苗爪结构设计

根据机构设计结果,开发了定角直插式双指四针取苗爪(图 15)。将该取苗爪导入 ADAMS,并将 1.3.1 节中低含水率组的刺入阻力值添加到取苗针端,进行动力学仿真,得到拉杆所需最大拉力为 315.9 N。根据仿真分析结果,取苗爪的直线驱动选用 LX800 电动推杆(行程 50 mm,额定推力 400 N,速度 48 mm/s),通过调节内置行程开关满足行程需要,并通过继电器的正负极变换实现取苗针的伸出

表 2 取苗爪部件结构参数与总体指标			
Tab.2 Parameters of picking gripper			
机构参数	取值	机构指标	取值
L_{AB}/mm	27	W/mm	137.8
L_{BC}/mm	54	$\alpha_1/(\text{ }^\circ)$	50
L_{CD}/mm	34	$\alpha_2/(\text{ }^\circ)$	-50
L_{OF}/mm	63	S/mm	62
L_0/mm	100	L_a/mm	60
B/mm	62	D_1/mm	40
$\beta/(\text{ }^\circ)$	15		
L_1/mm	224		

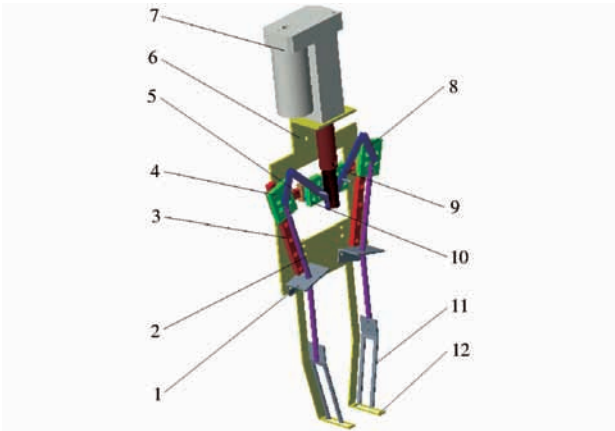


图 15 取苗爪结构图

Fig. 15 Structure diagram of picking gripper
1. 指杆座 2. 指杆 3. 指滑轨 4. 指滑块 5. 水平滑轨 6. 机身背板 7. 推杆电动机 8. 连杆 9. 摆杆 10. 水平滑块 11. 取苗针 12. 退苗板

和缩回。同时设置栽苗板,既作为细长取苗针的滑动支撑导轨,又方便取苗针缩回时的顺利放苗。取苗爪的长×宽×厚为 480 mm×150 mm×45 mm。

2.6 换向变距装置结构及电路设计

通过直流减速电动机(48 W, 30 r/min)带动远端取苗爪实现快速水平转向(图 16),而为达到其 180°准确换向和可靠定位,在两侧分别对称布置微型行程开关和微型电磁吸盘,电动机带动远端取苗爪正转到达栽苗位置或反向回到取苗位置后,旋转臂压下行程开关使电动机断电,同时微型电磁吸盘通电吸住旋转臂实现可靠定位。而后控制器发出信

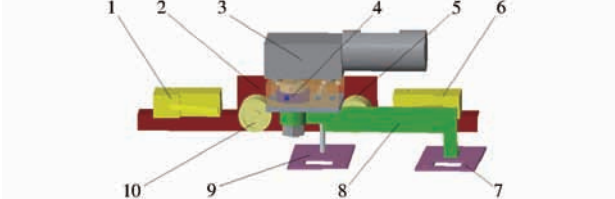


图 16 变距换向机构

Fig. 16 Stucture of arch reversing machine
1. 左行程开关 2. 安装背板 3. 直流减速电动机 4. 推力球轴承 5. 右电磁铁 6. 右行程开关 7. 远端取苗爪安装板 8. 旋转臂 9. 近端取苗爪安装板 10. 左电磁铁

号使微型电磁吸盘断电的同时电动机反转,直至旋转臂压下对侧行程开关,使电动机断电的同时对侧微型电磁吸盘通电,实现 180°后的可靠定位(图 17)。

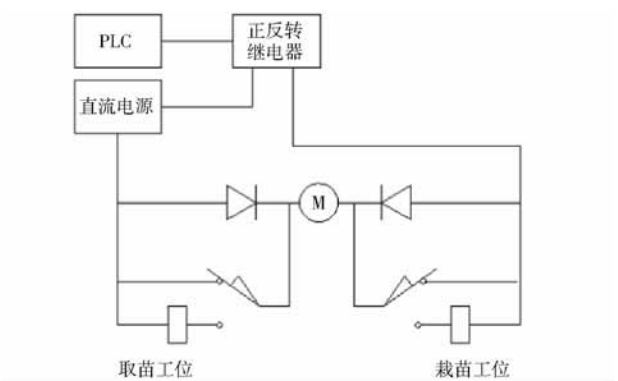


图 17 换向变距机构电路

Fig. 17 Circuit design of arch reversing machine

3 试验

3.1 试验材料与方法

以整盘 32 株穴盘草莓苗为对象,采用与苗坨力学试验相同的低含水率处理,连续进行末端执行器移栽的取苗、换向变距与放苗试验步骤如下:

(1)为测试末端执行器的取苗效果,将该末端执行器固定在直线模组的滑台上,变距换向结构的右侧电磁铁得电固定旋转臂,末端执行器处在取苗工位(图 18a)。穴盘苗从侧面水平推送到末端下方,并使两个取苗爪定位到相邻两个穴孔上方,两取苗爪的电动推杆通电后推杆驱动手指直线插入苗坨,推杆行程结束后,直线模组带动取苗爪向上拔苗,拔苗加速度分为 0.05、0.20、0.80 m/s²,拔苗行程为 100 mm。

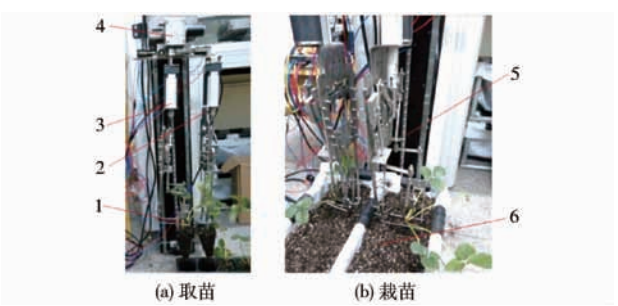


图 18 草莓穴盘苗末端执行器取苗栽苗试验装置

Fig. 18 Test device of end-effector work experiment

1. 穴盘苗 2. 远端取苗爪 3. 近端取苗爪 4. 变距换向装置
5. 直线模组 6. 高架栽培槽

(2)为测试末端执行器的换向变距实际作业效果,在双取苗爪完成取苗后,由换向变距装置带动远端取苗爪 1 s 内转动 180°,旋转臂压下左行程开关,并使左侧电磁铁得电吸住远端取苗爪,使末端执行器保持在栽苗工位(图 18b)。观察旋转过程中两株苗的状况和旋转臂旋转 180°后停止过程对苗状态

的影响。

(3)为测试末端执行器的栽苗效果,采用图 18b 所示的高架设施进行栽苗试验。预先利用同穴孔尺寸的打孔器在高架栽培槽上打好 100 mm 深植苗孔,由直线模组驱动取苗爪分别以 0.05、0.20、0.80 m/s²加速度栽苗,取苗爪将苗从栽培槽基质表面送到穴孔底部,栽苗深度为 100 mm,落苗后取苗爪的电动推杆通电使手指缩回。

取苗后,统计其取出率与苗坨损伤率;放苗后,用数显式角度仪测量苗坨茎秆与栽培槽水平表面的角度,用钢卷尺测量苗坨表面与槽上表面的高度差,当顺利放苗后直立度大于等于 75°且高度差小于 15 mm 时视为栽苗成功,并观察 10 d 后的成活率^[12]。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 取苗试验

如表 3,加速度为 0.05、0.20 mm/s²草莓苗取出率均高于 93%,而加速度加大到 0.80 mm/s²时,取出率下降,部分苗坨个体出现取苗针从基质中脱出的取苗失败现象,其主要原因是经过多月培育穴盘内基质收缩,且在取苗针刺入苗坨取苗时对苗坨有竖直方向的压缩作用,使得取苗深度不足 50 mm。当加速度大于 0.20 m/s²开始出现苗坨取出但苗坨下部断裂和局部破碎的情况,说明苗坨下部包络比较差。考虑到实际取苗深度误差,末端执行器应将取苗深度增加到 60 mm,使取苗针与苗坨接触面积增大,以提高取出可靠性,并有效避免取苗时苗坨下部断裂;同时在取苗前的取苗爪水平接近过程中,由于草莓穴盘苗生长位置与穴孔中心偏差较大,造成末端执行器的手指或栽苗板与草莓苗株发生碰撞(图 19),造成总试验样本中 7.29% 的苗株发生枝叶折断。可对取苗针与栽苗板边缘进行圆滑处理,以进一步减少取苗爪在水平接近过程中对植株的损伤。

表 3 末端执行器取苗试验结果

Tab. 3 Results of end-effector picking experiment

加速度/ (m·s ⁻²)	取出数/ 个	取出率/ %	苗坨断裂 数/个	苗坨损伤 率/%	综合成功 率/%
0.05	31	96.9	0	0	96.9
0.20	30	93.8	1	3.1	90.6
0.80	27	84.4	3	9.4	75.0

3.2.2 换向变距试验

两取苗爪能够准确定位相邻两穴孔中心位置,弓背和间距变换机构旋转 180°后将取苗爪定位到相邻两个栽培槽中心的植苗孔上。在远端取苗爪旋转过程中行程开关能保证准确换向、定位可靠。在 30 r/min 的旋转速度下,旋转臂与行程开关、电磁铁



图 19 枝叶折断情况

Fig. 19 Broken phenomenon of seedling branches and leaves

的碰撞吸合定位未对苗坨的可靠夹持造成影响,在取苗和栽苗位置远端取苗爪均实现了准确稳定作业,旋转过程中两取苗爪间无相互干涉,枝叶间存在轻微触碰,但可保证换向的顺利实现。

3.2.3 栽苗试验

如图 18b 所示,双指四针式取苗针结构可以由双指实现四指的可靠夹持保证移栽直立度,并和双栽苗板配合保证放苗。栽苗试验中手指均顺利缩回将苗坨良好送到植苗孔中,苗的直立度和栽苗深度均满足要求。苗坨进入穴孔时栽苗位置与植苗孔的中心位置偏差与穴壁之间的摩擦作用,使少量基质滑落影响栽苗深度,当加速度较大时,滑落量较大。由移栽后的栽培结果发现,由于草莓穴盘苗坨大、根系发达,且叶柄和叶片数多,取苗的部分枝叶折断和栽苗基质滑落均未影响栽苗 10 d 后的成活率。如表 4 所示。

4 结论

(1)双针取苗针的苗坨刺入阻力随着刺入速度和深度的增加而增加,且低含水率情况下入土阻力

表 4 末端执行器栽苗试验结果

Tab.4 Results of end-effector inserting experiment

加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	高度差/ mm	直立度/ ($^{\circ}$)	栽苗成功 率/%	成活率/ %
0.05	5	84	100	100
0.20	7	80	100	100
0.80	10	75	100	100

更大,由于根系发达和单指双针结构的影响,草莓苗坨的刺入力显著超过番茄与生菜等苗坨的刺入力试验结果。

(2)双指的夹茎拔苗力与夹持拔苗破坏力的测试表明双指直插式取苗方法的可行性,且苗坨上表层 10 mm 以下根系包络较好,能够承受较大的拔苗力,低含水率情况下二者差值较大,有利于将苗取出。

(3)根据草莓穴盘苗的大苗、长苗坨力学参数和弓背朝向特殊要求,设计了带双爪和可同步换向变距的移栽末端执行器。通过多连杆定角斜插式双指四针取苗爪的多目标规划,得到了优化的机构参数;并通过微型行程开关和微型电磁吸盘配合,实现了双取苗爪的快速同步换向变距和可靠定位。

(4)进行了末端执行器的穴盘草莓苗移栽验证试验,在取苗加速度不大于 0.20 mm/s^2 时取苗成功率大于 90%,加速度过大则易造成取苗针的滑脱和苗坨的下部断裂,可通过加大取苗深度和圆滑处理取苗针和栽苗板边角进一步改善取苗效果;换向变距装置能够灵活准确完成双苗同取和换向栽苗作业,解决弓背朝外问题和相邻两列同时移栽的间距调整问题;栽苗试验中栽苗板能有效保证顺利放苗,直立度和深度均达到草莓穴盘苗穴盘苗移栽的要求;移栽后 10 d 苗完全成活,该末端执行器有效实现了草莓穴盘苗的特殊移栽作业任务。

参 考 文 献

1 [美]麦斯. 草莓病虫害概论[M]. 张运涛,张国珍,译. 北京:中国农业出版社,2012.

2 余红,来文国,童建新,等. 现代草莓栽培新技术——高架栽培[J]. 杭州农业与科技,2009(3):46-47.

3 徐义流. 草莓高架栽培技术[J]. 山西果树,1999(3):20-21.

4 刘小明,陈兴明. 日本草莓高架栽培发展现状[J]. 国外果业,2004(3):36-37.

5 连青龙,鲁少尉,尹义蕾,等. 现代设施草莓高架育苗质量研究[J]. 中国蔬菜,2013(8):71-76.

6 韦康成. 穴盘苗夹持装置综合性能指标研究[D]. 北京:北京工业大学,2014:80-90.

WEI Kangcheng. Study on the comprehensive performance index of transplanting index[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2014:80-90. (in Chinese)

7 韩绿化. 蔬菜穴盘苗钵体力学分析与移栽机器人设计研究[D]. 镇江:江苏大学,2015:47.

HAN Lvhua. Mechanical analysis of the root lumps and development of a robotic transplanter for vegetable plug seedlings[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015:47. (in Chinese)

8 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 Lvhua, 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)

- 9 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 Lvhua, 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)
- 10 TING K C, GIAOCOMELLI G A, SHEN S J,et al. Robot workcell for transplanting of seedlings part II -end effector development [J]. Transactions of the ASAE,1990, 33(3):1013 – 1017.
- 11 金鑫. 蔬菜穴盘苗自动移栽技术与装置研究[D]. 北京:中国农业大学,2014:26 – 30.
JIN Xin. Research on automatic transplanting technology and device for vegetable plug seedling[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 26 – 30. (in Chinese)
- 12 孙国祥,汪小昆,何国敏,等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报,2010, 41(10): 48 – 53.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, HE Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10): 48 – 53. (in Chinese)
- 13 梁喜凤,蔡阳阳,王永维. 番茄钵苗自动移栽体物理机械特性研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2015, 41(5): 616 – 622.
LIANG Xifeng, CAI Yangyang, WANG Yongwei. Experiment of physical and mechanical properties of tomato seedlings pot for automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2015, 41(5):616 – 622. (in Chinese)
- 14 KANG D H, KIM D E, LEE G I, et al. Development of a vegetable transplanting robot [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2012,37(3):201 – 208.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 黄世欣,林达德. 种苗移植作业夹持具之设计与性能分析[J]. 农业机械学刊,1996, 5(3):51 – 65.
HWANG S S, LIN T T. Design and performance analysis of grippers for seedling transplanting [J]. Journal of Agricultural Machinery, 1996, 5(3): 51 – 65. (in Chinese)
- 18 吕英石,李新涛,陈昱全,等. 可调整式穴盘苗假植机构机构之研究[J]. 农业机械学刊,2003,12(1):11 – 24.
LU Y S, LEE H T, CHEN Y C, et al. The development of adjustable transplanting mechanism for plug seedling[J]. Journal of Agricultural Machinery,2003, 12(1):11 – 24. (in Chinese)
- 19 刘继展,刘炜,毛罕平,等. 面向立柱栽培的移栽机器人设计与协调运动仿真[J]. 农业机械学报,2014,45(7): 48 – 53,72.
LIU Jizhan, LIU Wei, MAO Hanping, et al. Design and coordinated motion simulation of transplanting robot for column cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(7): 48 – 53,72. (in Chinese)
- 20 徐丽明,张铁中. 我国草莓生产作业机械的设计特点探讨[J]. 中国农机化,2006(5):102 – 104.
XU Liming, ZHANG Tiezhong. Regional development and machine characteristic in china strawberry production [J]. Chinese Agriculture Mechanization,2006(5):102 – 104. (in Chinese)
- 21 胡敏娟,尹文庆. 穴盘苗变形滑针式取苗器的研究[J]. 浙江农业学报,2011,23(1):154 – 158.
HU Minjuan, YIN Wenqing. Experimental research on the deformed sliding needling pick-up device for plug seedlings[J]. Acta Agricultural Zhejiangensis,2011,23(1):154 – 158. (in Chinese)
- 22 韩长杰,赵晓伟,郭辉,等. 辣椒穴盘苗形态特性的测定试验研究[J]. 农机化研究,2015(7):191 – 193.
HAN Changjie, ZHAO Xiaowei, GUO Hui, et al. Experimental study on determination of pepper plug seedling morphological characteristics[J]. Chinese Agriculture Mechanization,2015(7):191 – 193. (in Chinese)