doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.021

温室穴盘苗多末端补苗移植机构设计与试验

童俊华[1,2]　王钦源[1]　李　振[1]　娄海峰[1]　李亚涛[1,3]　武飞龙[1]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018;
3.浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018)

摘要:在温室穴盘育苗过程中,存在种苗漏播、长势不良等现象,为保证出厂苗品级,需要将这些劣苗的苗坨剔除并补栽健康钵苗。现有的取苗末端执行器主要适用于大苗龄钵体苗,对小苗龄、弱根系钵体苗适应性差,为此设计了一种适用小空间取植苗的柔性末端执行器及其成排多末端补苗作业机构。柔性末端执行器可单独控制,在取苗时爪片下降过程中逐步收拢,对苗坨形成渐进式夹紧作业。以一串红、石竹、四季海棠、矮牵牛穴盘苗为研究对象,对柔性取植末端执行器进行刚柔耦合动力学分析,开展柔性取植末端执行器的三因素三水平补苗移植正交试验。结果表明:影响苗坨完整度的试验因素由大到小为爪片间距、爪片宽度、基质含水率,确定最优参数组合为爪片间距 21 mm,爪片宽度 18 mm,基质含水率 55% ~60%。在最优参数组合下对穴盘苗进行末端执行器补苗移植性能验证试验,结果表明,钵苗移植成功后其苗坨完整度在 85% 以上,满足补苗移植作业需求,整机补苗效率为 2 105 株/h(约为 68 盘/h),该研究可为温室穴盘育苗自动化补苗作业提供参考。

关键词:温室穴盘苗;补苗移植;渐进式夹取;多末端执行器

中图分类号:S223.92　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0227-09　　**OSID**:

Design and Test of Multi-end Seedling Transplantation Mechanism for Greenhouse Cave Tray Seedlings

TONG Junhua[1,2]　WANG Qinyuan[1]　LI Zhen[1]　LOU Haifeng[1]　LI Yatao[1,3]　WU Feilong[1]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310018, *China*
3. *Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Sensing and Robotics*, *Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: In the process of seedling raising in the greenhouse cavity tray, there are phenomena such as seedling leakage and poor growth. In order to ensure the grade of factory seedlings, it is necessary to remove these inferior seedling substrate blocks and replant them with healthy seedlings. The existing end effector for seedling extraction is mainly suitable for large-seedling-aged bowl-body seedlings, and has poor adaptability to small-seedling-aged and weak-rooting bowl-body seedlings. Therefore, a flexible end effector was designed, which suitable for small space seedling planting and its row of multi-end seedling replenishment operation mechanism. The flexible end-effector can be controlled separately, and the claw blades were gradually retracted during the seedling picking process during the descending process, forming a progressive clamping operation on the substrate block. A bunch of red, caryophyllus, begonia, and petunia burrow seedlings were taken as the research objects. Carry out the rigid-flexible coupling dynamic analysis of the flexible end effector for manipulators. The orthogonal experiment of three-factor and three-level seedling transplantation of flexible planting end effector was carried out. The results showed that the experimental factors affecting the seedling root ball intergrity were claw spacing, claw width and substrate moisture content, and the optimal parameter combination was 21 mm for claw spacing, 18 mm for claw width and 55% ~ 60% for substrate moisture content. Under the optimal combination of parameters, the end-effector seedling transplantation performance verification test was carried out. The results showed that the integrity of the bowl body was more than 85% after successful transplantation, which met the needs of seedling transplantation, and the average seedling replenishment

收稿日期:2025-02-15　修回日期:2025-05-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2000600)和浙江省"三农九方"科技协作计划项目(2024SNJF069)

作者简介:童俊华(1984—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与数字农业技术研究,E-mail:jhtong@zstu.edu.cn

efficiency of the whole machine was 2 105 plants/hour (about 68 trays/hour). The research result can provide a reference for the automatic seedling replenishment operation of greenhouse cavity tray seedlings.

Key words: greenhouse cave tray seedling; transplanting supplementary seedling; progressive flexible gripping; multi-end-effector

0 引言

温室穴盘育苗是培育种苗的重要方式,与传统育苗相比,具有增加壮苗率、发芽率高、育苗周期短、便于机械化统一管理等优点[1-3]。但是,在育苗播种阶段合格率难以达到 100%[4-5],同时受育苗环境的影响,穴盘空苗率超过 15%,大大影响机械化移栽效率[6-7],出厂栽种前需要对此类穴孔进行补苗。

目前我国温室穴盘的剔补苗作业主要依靠人工进行,工作时间长、劳动强度大,且补苗质量参差不齐[8]。也有国内外学者尝试使用机械结构实现对穴盘苗自动夹取[9-10]。这些取苗方式可分为固定角度指铲(针)式、二次夹紧弹片(针)式、顶夹组合式。其中,固定角度指铲(针)式包括:、子叶期钵苗指铲式补苗末端执行器[11]、指铲式末端执行器[12]、指针可调节式取苗机械手[13]、沿穴孔对角夹取式末端执行器[14]、多针抓苗器[15],这些末端执行器以固定角度将指铲(针)插入穴孔中的方式实现取苗,研究的末端执行器体型庞大,较难通过在小空间安装成排移植手的方式来提高作业效率。二次夹紧弹片(针)式包括:指针式末端执行器[16]、具有二次夹紧功能的取苗移植手[17]、利用折弯的爪片弹性变形一次性夹取钵苗的末端执行器[18]、补苗移植手[19]。这些末端执行器是利用弹性爪片(针)插入穴孔后受外力发生弹性变形而收拢,对苗坨进行二次夹紧,可以对基质块提供充足的夹紧力,对大苗龄钵苗定植具有较好的苗坨完整度和移栽成功率。顶夹组合式包括:基于顶夹拔相互组合的取苗装备[20]、顶夹式取苗装置[21]、顶钵-夹茎组合取苗方式[22],这些取苗机构通过精确的机械传动,可以实现多末端成排移栽作业。但补苗对象通常为茎叶脆弱、根系不发达的钵苗,顶夹组合取苗方式可能会将苗坨顶破和夹苗失败。

通过分析以上取苗末端执行器特点及存在问题,本文拟设计一种适用小空间取植苗的柔性末端执行器及其成排多末端补苗作业机构。柔性末端执行器可单独控制,在取苗时爪片下降过程中逐步收拢,对基质块形成渐进式夹紧作业,对小苗龄、弱根系钵体苗有良好的苗坨完整度和取苗成功率,为开发高效省力的补苗移栽机械提供参考。

1 补苗装置整体结构与工作原理

1.1 补苗装置整体结构

整体结构如图 1 所示,多末端补苗移植机(简称"补苗机")主要包括机架、链条输送带模块、过渡输送带模块、横移模组、无动力辊模块、穴盘压紧模块、补苗多末端执行器。多末端补苗移栽装置(简称"补苗装置"),左侧为补苗作业区,右侧为供苗作业区,主要输送机构相同。链条输送带、过渡输送带、横移模组、无动力辊模块、穴盘限位护栏和穴盘压紧模块安装在机架上,链条输送带内置有多个光电传感器,穴盘限位护栏在链条输送带两侧用于对穴盘进行横向限位,穴盘压紧模块在链条输送带上方用于压紧穴盘,避免末端取植钵苗时穴盘错位。无动力辊模块用于储存已经完成补苗作业的穴盘苗和空穴盘。

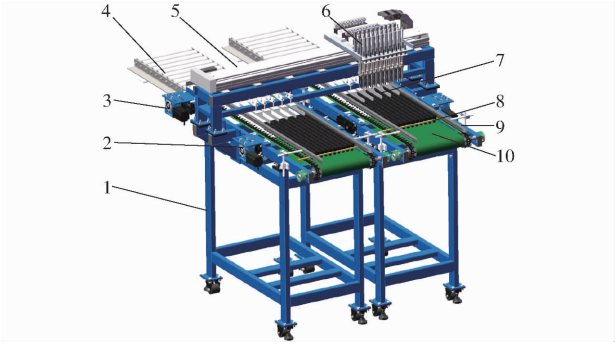


图 1 整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram

1. 机架 2. 过渡输送带电机 3. 链条传送带电机 4. 无动力辊模块 5. 横移模组 6. 多末端执行器模块 7. 穴盘压紧模块 8. 穴盘推板 9. 穴盘限位护栏 10. 过渡输送带

多末端执行器模块安装在横移模组上,可以使补苗末端执行器在同一排上横向移动。多末端执行器模块结构如图 2 所示,包括多末端安装板、柔性末端执行器(简称"移植手")、油压缓冲器、直线轴承、移植手升降导向杆、两位五通电磁阀、两位三通电磁阀、移植手升降气缸、移植手取植苗气缸。10 个移植手上安装板各安装 2 根导向杆和 1 个移植手取苗气缸,油压缓冲器、直线轴承和移植手升降气缸安装在多末端安装板上,且在同一条直线上;移植手上安装板一端与移植手升降气缸连接,另一端可与油压缓冲器接触,导向杆与直线轴承内孔滑动配合,两位五通电磁阀与移植手升降气缸连接,可实现移植手

升降；两位三通电磁阀与取植苗气缸连接，可以实现取植苗。

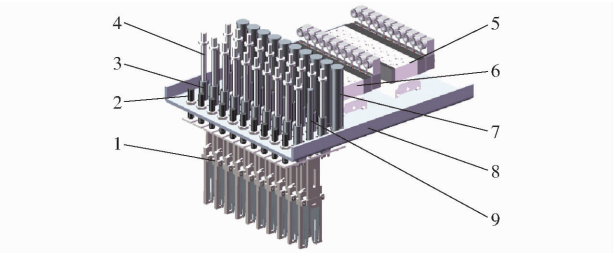


图 2　多末端执行器模块结构图

Fig. 2　Structure diagram of multi-terminal modules

1. 移植手　2. 油压缓冲器　3. 直线轴承　4. 导向杆　5. 两位五通电磁阀　6. 两位三通电磁阀　7. 移植手升降气缸　8. 多末端安装板　9. 移植手取苗气缸

1.2　工作原理

供苗盘（提供健康钵苗的穴盘）中健康钵苗和补苗盘（待补健康苗的穴盘）中空穴位置坐标由该装置前端的视觉系统提供，工控机按照视觉系统采集的位置信息发出补苗作业指令，补苗机作业控制流程如图 3 所示。

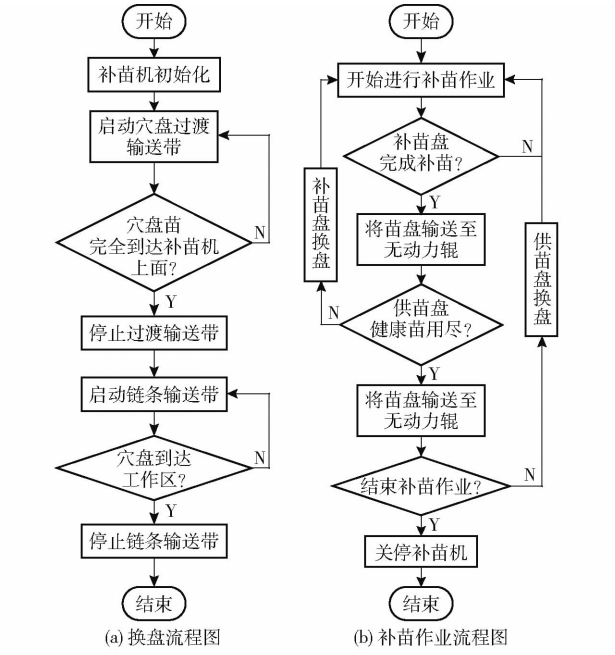


图 3　补苗机作业控制流程图

Fig. 3　Working principle of seedling replenisher

1.3　控制方案

控制方案如图 4 所示。信号检测元件包括光电传感器、接触传感器和磁性开关。上位机得到前置工序传递的供苗盘和补苗盘中劣质苗坐标后进行路径规划，规划后的坐标顺序通过以太网与单片机通信进行传输。

单片机选用 STM32F103RCT6，基于 Modbus－RTU 通讯协议，可将上位机传输的补苗作业指令进行处理，控制过渡输送带直流电机、链条输送带步进

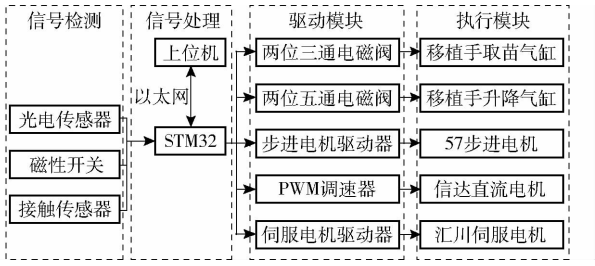


图 4　控制方案

Fig. 4　Control scheme

电机、横移模组伺服电机，以及移植手升降气缸和移植手取苗气缸完成补苗作业。

其中安装在横移模组左右极限位置上的光电开关，用于采集安装在横移模组上的多末端执行器模块的复位和极限位置信号；安装输送带两侧的对射光电位置传感器，用于采集穴盘完成过渡后的信号，为穴盘进入移植手工作区域提供位置信息。

2　关键部件设计

2.1　穴盘钵苗物理特性

穴盘钵苗选用泽霖农业科技有限公司培育的“54 一串红火凤凰红色 40000”花卉苗，苗坨由泥炭、蛭石与珍珠岩（基质配比 6∶3∶1）组成，种植于 200 孔 PVC 材质专用穴盘内育苗，有 5% ~20% 的缺苗率。穴盘如图 5a 所示。穴盘长 540 mm，宽 270 mm；穴盘上口径 23 mm，底部 10 mm，高度 41 mm，10 ×20 孔穴盘，相邻穴孔中心距 25.4 mm。钵苗的外形参数如图 5b 所示。

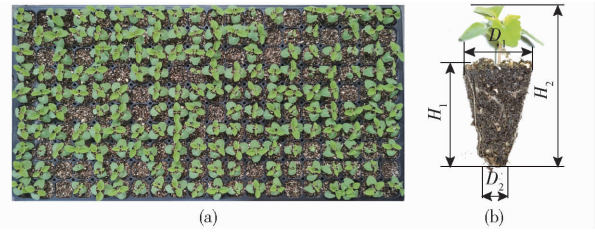


图 5　穴盘苗

Fig. 5　Acupuncture seedlings

苗坨上边宽 D_1 为 21 ~23 mm，苗坨下边宽 D_2 为 9 ~12 mm，苗坨高 H_1 为 36 ~39 mm，钵苗高 H_2 为 49 ~52 mm，钵苗质量 M 为 4.85 ~6.75 g。

2.2　移植手结构设计

移植手包括爪片、爪片安装座、中间平台、滚动轴承、支撑板、移植手取苗气缸、上固定板、楔形滑块、销轴和动力导向杆，如图 6 所示。移植手取苗气缸为单作用气缸安装在上固定板，上固定板通过支撑板与中间平台固定在一起作为机架，楔形滑块穿过中间平台，上端与气缸活塞杆连接，下端与爪片安装座连接；动力导向杆通过销轴与中间平台铰接，可绕销轴转动，其上端安装有滚动轴承与楔形滑块的

斜面接触,其下端有凸起;爪片具有弹性,上端通过螺钉固定在爪片座上,其中间有导向槽可与导向杆的凸起滑动配合。气缸向下运动时,楔形滑块、爪片座和爪片也向下运动,同时楔形滑块推动动力导向杆绕销轴转动,动力导向杆的凸起可对爪片向内压缩,爪片可以在下降过程中逐步收拢,实现对钵苗的渐进式夹紧。放苗时要通过两位三通电磁阀切换气路,停止给气缸供气,单作用气缸的活塞杆可以自行收回,爪片在放苗时逐步张开,将钵苗植入到穴孔中。

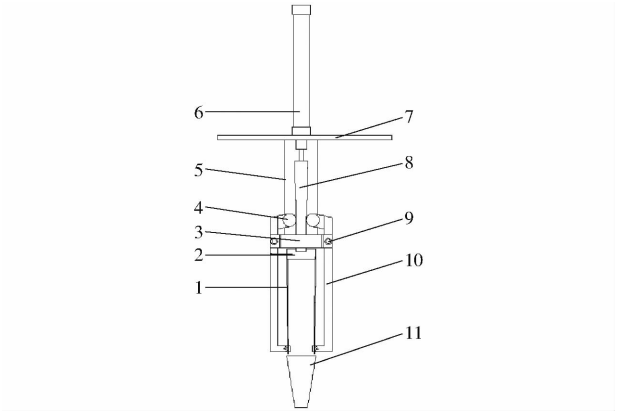


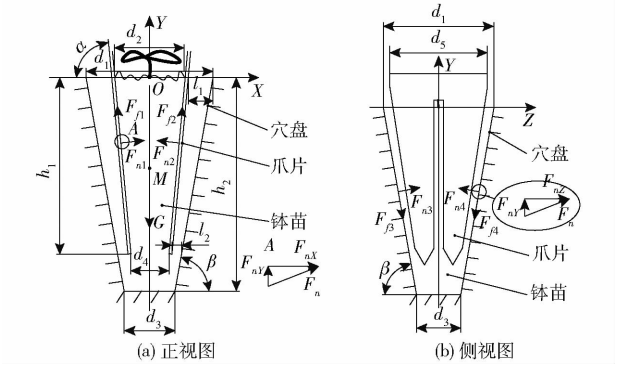
图 6 移植手结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of end effector for seedling removal

1. 爪片 2. 爪片安装座 3. 中间平台 4. 滚动轴承 5. 支撑板 6. 移植手取苗气缸 7. 上固定板 8. 楔形滑块 9. 销轴 10. 动力导向杆 11. 穴盘孔

2.3 移植手取苗受力分析

取苗是补苗移栽过程中关键的一步,移植手爪片的爪尖按照预定轨迹进入穴孔,两个爪片在下降过程中逐步收拢对苗坨进行夹紧。首先爪片对基质的压力逐渐增加,爪片与基质摩擦力也在增加,然后与爪片接触的基质被压缩逐渐与穴孔内壁分离,最终基质与穴孔内壁的摩擦力消失;而未和爪片接触的基质继续与穴孔内壁产生挤压,仍存在摩擦力。成功取苗需要靠爪片和基质产生的摩擦力来克服钵苗的重力和基质与穴孔内壁的摩擦力。移植手取苗受力分析如图 7 所示。



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 7 移植手取苗受力分析

Fig. 7 Analysis of force of transplanted hand-picked seedlings

为保证移植手成功夹取穴盘苗,其取苗作业时各作用力需满足条件

$$\begin{cases} 2(F_{f1}+F_{f2})\sin\alpha+2(F_{n1}+F_{n2})\cos\alpha\geqslant G+f \\ F_{f1}\cos\alpha-F_{n1}\sin\alpha+F_{n2}\sin\alpha-F_{f2}\cos\alpha=0 \\ F_{f3}\cos\beta+F_{n3}\sin\beta-F_{f4}\cos\beta-F_{n4}\sin\beta=0 \\ F_{f3}\sin\beta-F_{n3}\cos\beta+F_{f4}\sin\beta-F_{n4}\cos\beta=0 \\ f=F_{f3}\sin\beta+F_{f4}\sin\beta \\ F_{f1}=\mu_1F_{n1} \\ F_{f2}=\mu_1F_{n2} \\ F_{f3}=\mu_2F_{n3} \\ F_{f4}=\mu_2F_{n4} \end{cases} \tag{1}$$

式中 μ_1——爪片与基质的摩擦因数

μ_2——穴孔内壁与基质的摩擦因数

α——爪片夹取角,(°)

β——穴孔壁的斜度角,(°)

F_{f1}、F_{f2}——基质对爪片的摩擦力,N

F_{n1}、F_{n2}——爪片对基质的压力,N

F_{f3}、F_{f4}——基质对穴盘内壁的摩擦力,N

F_{n3}、F_{n4}——穴盘内壁对基质的压力,N

G——钵苗重力,N

f——总摩擦力,N

假设基质材料均匀和忽略苗根的影响,则可得钵苗在两侧分别受到爪片对称力作用和穴盘内壁对称力的作用,可得

$$\begin{cases} F_{n1}=F_{n2} \\ F_{n3}=F_{n4} \end{cases} \tag{2}$$

由公式(1)、(2)得出,移植手取苗作业时所受作用力应满足条件

$$4F_{f1}\sin\alpha+4F_{n1}\cos\alpha\geqslant G+2F_{f3}\sin\beta \tag{3}$$

已知:$\alpha=84.3°$,$\beta=79.8°$,$\mu_1=0.223$[23],$\mu_2=0.485$[24]。工作时气缸可提供至少 40 N 推力,作用在苗坨上的压力为 4.21 N,经过计算可得,移植手可对钵苗施加 5.41 N 的取苗拉拔力,远大于钵苗的重力和粘附力,故可以成功取苗。

穴孔内壁与基质间的摩擦因数和穴盘壁的斜度角是穴盘出厂属性,不便于调整。此外基质有一定的湿度,因此基质与爪片、穴孔内壁间产生的粘附力,可能会影响摩擦力;因为粘附力会随着基质的含水率而变化且不便于测量,因此可以通过正交试验探究基质含水率对取苗成功率的影响。

2.4 移植手主要参数确定

移植手的传动机构可以使爪片下降过程中逐步收拢,两个爪片收敛夹角越小,爪片对苗坨的夹紧程度越高;但是收敛夹角越小,对苗坨的破坏程度

越大。

用万能试验机对苗坨进行压缩试验，探究苗坨的屈服极限，通过试验得出基质表面单边压缩量 l_1 为 4 mm 时，可以为苗坨提供充足的夹持力[25]。建立移植手的运动简图如图 8 所示，构件移植手运动方程为

$$4E\sin\frac{\dfrac{180°L\sin\dfrac{\theta\pi}{180°}}{D\pi}}{} - 4 = 0 \tag{4}$$

式中　L——取苗深度，分别取 32、34、36、38、40 mm

D——动力臂长度，mm

E——阻力臂长度，mm

θ——楔形滑块的斜面角度，(°)

用 Matlab R2021b 求解 D、E、θ，将得到的解进行优化，得到最优解为：D 为 84 mm，E 为 23 mm，θ 为 0.98°。

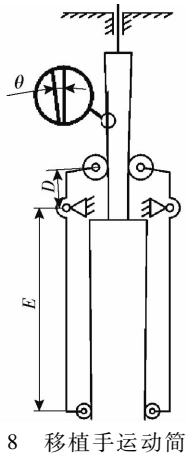


图 8　移植手运动简图

Fig. 8　Schematic of movement of transplanted hand

经过试验分析，移植手爪片选用经过热处理的 65Mn 钢，厚度为 0.5 mm；此时的爪片弹性和入土时穿透性都最好。传动机构在爪片上的压力作用点和爪片的横截面积是不断变化的，因此爪片的挠度不便于计算，为了进一步探究柔性爪片运动轨迹与传动机构的关系，需要进行移植手刚柔耦合动力学分析。

2.5　移植手刚柔耦合模型建立

柔性爪片的建模理论基于以下假设：①材料各向同性，本构关系满足虎克定律。②均匀材料，各横截面的偏心矩为零。③爪片是薄长形，爪片在变形前垂直于轴线的截面变形后仍为平面，且垂直于该轴线。剪切和扭转效应不计。在移植手取苗机构中引入柔性体爪片，计算爪片取苗运动过程中，爪片产生的变形和接触摩擦力，来更加精准模拟运动特性及受力情况。采用 Hamilton 原理建立柔性爪片的动力学方程[26]，经过计算则可得到刚柔耦合多体系统的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{\Phi}_q^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{\Phi}_q & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{M}$——系统广义质量矩阵

$\boldsymbol{Q}$——系统广义力矩阵

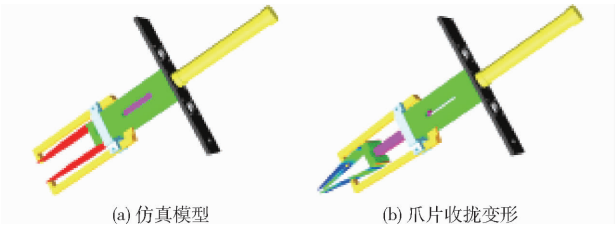
$\boldsymbol{\Phi}_q$——雅可比矩阵

$\boldsymbol{q}$——广义坐标矩阵

$\boldsymbol{\lambda}$——拉格朗日乘子

$\boldsymbol{\gamma}$——加速度约束方程右项

首先用 Solidworks 创建移植手模型，然后在 ABAQUS CAE 中将爪片进行柔性化并生成. mnf 文件。把移植手模型导入 ADAMS 中，将 ADAMS 中的爪片用 ABAQUS 生成的. mnf 文件替换，然后对移植手各零件施加约束、接触力和驱动，在爪尖处设置标记点，最后进行耦合仿真，如图 9 所示。



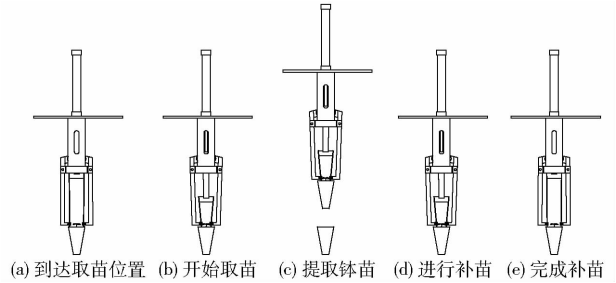
(a) 仿真模型　　(b) 爪片收拢变形

图 9　移植手刚柔耦合仿真模型

Fig. 9　Simulation models of rigid-flexible coupling of transplanted hands

2.6　移植手柔性移植机构动力学仿真分析

为准确分析移植手取苗工作过程，驱动滑动副模拟移植手补苗操作，以图 10 所示移植手取植苗流程建立驱动函数。MOTION_1：STEP(time,0.5,0,1.5,38) + STEP(time,4,0,5, - 38)；MOTION_2：STEP(time,0,0,0.5, - 70) + STEP(time,1.5,0,2,70) + STEP(time,3.5,0,4, - 70) + STEP(time,5,0,5.5,70)。



(a) 到达取苗位置　(b) 开始取苗　(c) 提取钵苗　(d) 进行补苗　(e) 完成补苗

图 10　移植手取植苗流程

Fig. 10　Process of transplanting hand-picked seedlings

从图 11 中可以看出，所建立的移植手柔性取植机构动力学仿真模型的运动过程与预想取植苗运动过程基本一致。0 ~ 0.35 s 模拟移植手下降到达取苗位置，准备取苗；0.35 ~ 0.65 s 模拟移植手取苗气缸通气后一次取苗操作，即气缸推动爪片在下降取

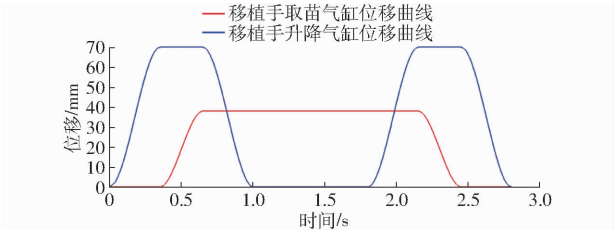


图 11 移植手取苗仿真运动曲线

Fig. 11 Simulated motion curves of transplanted hand-taken seedlings

苗时逐步收拢至预定取苗深度;0.65 ~ 1 s 模拟移植手升降气缸通气后上升,移植手将钵苗从穴孔中取出上升至最高位置;1 ~ 1.8 s 模拟移植手取苗后移动到补苗盘待补穴孔上方;1.8 ~ 2.15 s 模拟移植手升降气缸通气后下降,移植手将钵苗回栽到穴孔中下降至最低位置;2.15 ~ 2.45 s 模拟移植手取苗气缸断气后放苗操作,即气缸带动爪片在上升放苗时逐步张开;2.45 ~ 2.8 s 移植手回到初始位置,等待下一次取苗。

两个爪片在传动机构的作用下在下降取苗时逐步收拢,达到预定的取苗深度时完成仿真,爪片由平行状态变成相互交错状态,可实现对穴孔中钵苗的夹取。将取苗过程中爪尖标记点的位置坐标导出,用 Matlab 对爪尖坐标进行二次曲线拟合,图 12 为移植手爪片取苗轨迹,可以看出取苗过程中两个爪片的爪尖没有扎破穴孔壁,并且对基质形成了良好的包裹。

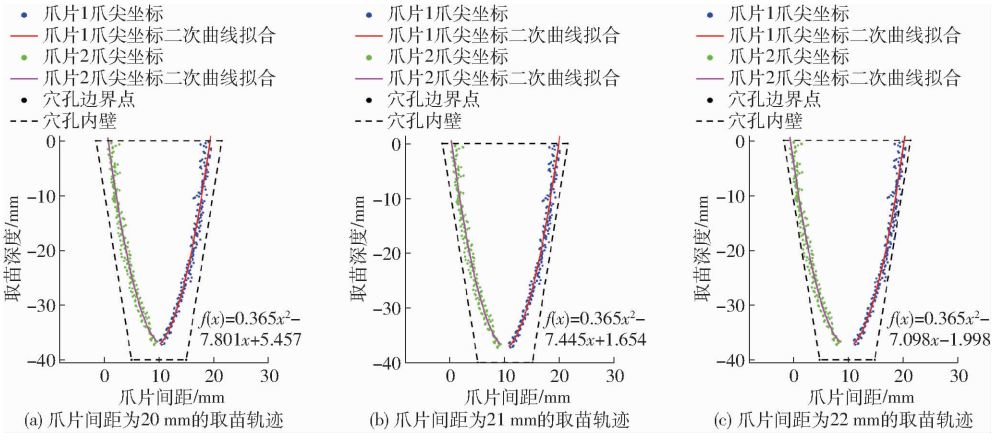


图 12 移植手爪尖取苗轨迹

Fig. 12 Transplant tip of hand claw to take seedling trajectory

3 试验

3.1 试验材料与设备

试验选择 20 日龄苗,含水率为 50% ~ 55%、55% ~ 60%、60% ~ 65% 的 3 种基质试验钵苗,使用利平 LP - 001 型多功能电子秤称量,精度 0.001 g。多末端补苗移植装置样机如图 13 所示。



图 13 多末端补苗移植装置样机补苗作业

Fig. 13 Spiral type seedling removal device

3.2 试验指标

试验指标为苗坨完整度与补苗成功率。苗坨完整度为取植苗后钵苗的质量与取植前该单株钵苗质量的比值。按照补苗移植流程进行补苗试验,试验结束后将补苗盘中回栽的钵苗依次称量,计为该次试验中取植后钵苗的质量 m。以下情况均视为取苗失败:苗未被取出,取苗过程中掉落,苗坨散落的基质土质量大于总质量三分之一,茎叶被折断。各计算式为

$$T = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{6}$$

$$S = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{7}$$

式中 T——苗坨完整度,%

M——取苗前单株钵苗平均质量,g

S——补苗成功率,%

n——同因素下成功补苗的数量,株

N——同因素下取植苗总数量,株

3.3 试验方案设计

利用渐进式柔性爪片移植手取植钵苗,初步试验发现影响补苗成功率的主要因素有爪片宽度、爪片间距、基质含水率。由移植手取苗仿真得出,不同的爪片间距对苗坨的包裹程度不同,在爪片初始间距可以顺利插入穴盘的前提下,并结合实际工况将爪片间距设为 20、21、22 mm。取苗时爪片与苗坨的接触面积会影响作用于苗坨上压强和粘附力,爪片

与苗坨的接触面积与爪片的宽度有关，为了方便探究接触面积变化对取苗效果的影响，通过改变爪片宽度 d_5 来改变接触面积，如图 6 所示。结合实际工况，爪片宽度 d_5 设为 18、20、22 mm。基质含水率影响基质间内聚力和基质与穴孔壁的粘附力，是育苗和补苗作业中重要的可控影响因素，试验选择含水率分别为 50% ~55%、55% ~60%、60% ~65%。钵苗基质含水率的测定，先对 3 盘试验苗钵浇透水，分时段在各个穴盘中间隔采样 20 株钵苗，用电子秤逐个进行称量，计算平均质量 M 作为每盘苗中单株苗的质量。然后再装入烧杯中并压实，采用壤博士记录仪将土壤水分传感器完全插入基质中测量钵苗基质含水率，从而得到 3 种含水率水平下试验样品取苗深度为 38 mm，移植手上升速度为 0.15 m/s，移植手下降速度为 0.2 m/s，取苗气缸下降速度为 0.3 m/s，穴盘换行速度为 0.25 m/s，移植手横移速度为 0.5 m/s。在供苗盘夹取 10 株健康钵苗，补苗时，用成排移植手最左边持有钵苗的移植手按从左到右的次序填补同一行中的空穴（当移植手补下一株苗后，此移植手为空，其右边第 1 个持有钵苗的移植手为下一个用于补苗的移植手）。正交试验因素水平如表 1 所示。

表 1　试验因素水平

Tab. 1　Test factors and levels

水平	因素		
	爪片宽度/mm	爪片间距/mm	基质含水率/%
1	18	20	50 ~55
2	20	21	55 ~60
3	22	22	60 ~65

3.4　结果与分析

以上述 3 个影响因素为自变量，开展 9 组试验，每组试验重复 20 次，结果取平均值，以苗坨完整度和补苗成功率为评价指标，试验结果如表 2 所示。X_1、X_2、X_3 为因素水平值。

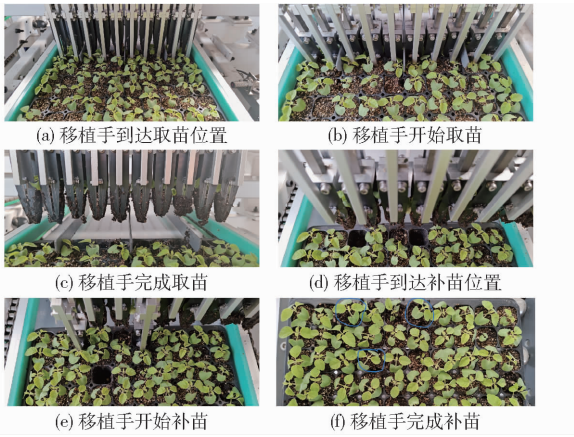
试验过程如图 14 所示，试验结果如表 2 所示，结果表明，试验平均补苗成功率为 93.9%，平均苗坨完整度为 80.2%，苗坨完整度最大值为 93.1%，最小值为 68.7%。根据表 3 可知，影响苗坨完整度的试验因素由大到小顺序为：爪片间距、爪片宽度、基质含水率；影响补苗成功率的试验因素由大到小顺序为：爪片间距、基质含水率、爪片宽度。

苗坨完整度 T 和补苗成功率 S 越大越好，所以苗坨完整度优组合为 $X_{11}X_{22}X_{32}$（因素 1 的 1 水平、因素 2 的 2 水平、因素 3 的 2 水平，下文含义相同），补苗成功率优组合为 $X_{11}X_{22}X_{32}$ 和 $X_{11}X_{22}X_{33}$，综合两个试验指标的结果可知，最优组合为 $X_{11}X_{22}X_{32}$，即爪片宽度 18 mm，爪片间距 21 mm，基质含水率 55% ~60%。

表 2　试验结果与极差分析

Tab. 2　Experimental results and range analysis

编号		因素			苗坨完整度 T/%	补苗成功率 S/%
		X_1	X_2	X_3		
1		1	1	1	74.1	90
2		1	2	2	93.1	100
3		1	3	3	86.3	95
4		2	1	2	73.8	95
5		2	2	3	84.5	100
6		2	3	1	80.3	85
7		3	1	3	68.7	90
8		3	2	1	78.1	100
9		3	3	2	82.9	90
T	k_1	84.500	72.200	77.500		
	k_2	79.533	85.233	83.267		
	k_3	76.567	83.167	79.833		
	R	7.933	13.033	5.767		
S	k_1	95.000	91.667	91.667		
	k_2	93.333	100.000	95.000		
	k_3	93.333	90.000	95.000		
	R	1.667	10.000	3.333		



(a) 移植手到达取苗位置　(b) 移植手开始取苗　(c) 移植手完成取苗　(d) 移植手到达补苗位置　(e) 移植手开始补苗　(f) 移植手完成补苗

图 14　试验过程及取苗后的穴盘苗

Fig. 14　Test process and seedlings after being picked up

表 3　试验结果方差分析

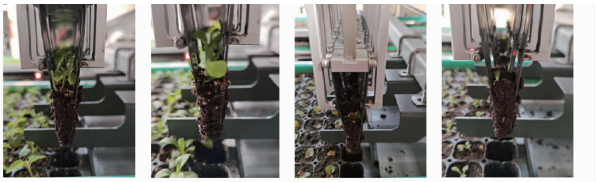
Tab. 3　Analysis of variance of test results

	因素	均方离差	自由度	F	P
T	X_1	96.407	2	32.791	0.032
	X_2	294.407	2	100.138	0.011
	X_3	50.487	2	17.172	0.107
	误差	2.94	2		
S	X_1	5.556	2	0.143	0.875
	X_2	172.222	2	4.429	0.184
	X_3	22.222	2	0.571	0.637
	误差	38.89	2		

3.5　优化参数试验验证

将最优组合工作参数应用到 20 日龄苗的一串红、石竹、四季海棠、矮牵牛花卉穴盘苗，开展验证性

试验,选择 4 种穴盘苗各一盘作为供苗盘,前置视觉识别机将补苗位置坐标发送给补苗机,补苗机执行补苗作业,如图 15 所示。结果表明,苗坨平均完整度分别为 90.5%、89.6%、87.4%、85.9%,整机补苗效率为 2 105 株/h(约 68 盘/h),移植手补苗效果验证试验可以看出,本文所研究的适用小空间取植苗的柔性多末端及其成排补苗作业机构,成排移植手可单独控制,利用柔性爪片在下降取苗时逐步收拢的渐进式夹取方式,能够对小苗龄、弱根系的钵苗进行柔性夹取,在成功补苗后有较高的苗坨完整度。整体装置可与课题组现有的穴盘苗视觉识别系统和劣质苗剔苗机组合配套使用,将形成穴盘苗自动化剔补苗作业生产线,将大大节约劳动力成本,提高剔补苗作业效率。



(a) 一串红 (b) 石竹 (c) 四季海棠 (d) 矮牵牛

图 15 移植手取苗装置效果

Fig. 15 Removal effect of spiral seedling removal device

4 结论

(1)设计了一种适用小空间取植苗的柔性末端执行器及其成排多末端补苗作业机构,柔性末端执行器可单独作业,爪片在下降取苗时逐步收拢,对苗坨形成渐进式夹紧作业。

(2)对移植手提取钵苗进行受力分析,计算出爪片满足取苗要求时对苗坨的最小拉拔力,建立了移植手运动方程,求解出移植手主要的几何参数,对移植手建立了刚柔耦合动力学模型,通过仿真验证取苗的设计轨迹,保证爪片可对苗坨实现渐进式夹取,不破坏穴盘。

(3)开展了移植手取植苗正交试验,结果表明,试验因素对苗坨完整度影响由大到小顺序为:爪片间距、爪片宽度、基质含水率。最优参数组合为:爪片间距 21 mm,爪片宽度 18 mm,基质含水率 55% ~ 60%。在最优组合下,对 20 日苗龄的一串红、石竹、矮牵牛、四季海棠 4 种穴盘苗进行移植手性能验证试验,结果表明,成功取植苗后苗坨的平均完整度在 85% 以上,整机补苗效率为 2 105 株/h(约 68 盘/h),满足自动补苗移植作业需求。

参 考 文 献

[1] 肖昌华,旷碧峰,余席茂,等. 茄果类蔬菜穴盘育苗的优势及关键技术[J]. 上海蔬菜,2020(2):21 – 22.

[2] 陈菲,张娜,窦娜. 蔬菜穴盘工厂化育苗技术应用及发展[J]. 现代农业,2021(2):61 – 62.
CHEN Fei, ZHANG Na, DOU Na. Application and development of factory seedling raising technology of vegetable hole tray [J]. Modern Agriculture, 2021(2):61 – 62. (in Chinese)

[3] 韩吉书,宋甲斌,李中华,等. 穴盘育苗新技术应用与新设备开发[J]. 农业工程技术,2019,39(31):13 – 17.
HAN Jishu, SONG Jiabin, LI Zhonghua, et al. Design and test of auto vertical washing device for seedling tray[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019,39(31):13 – 17. (in Chinese)

[4] 沈薛昊,唐帅,高辉松,等. 气吸滚筒式蔬菜育苗播种流水线设计[J]. 中国农机化学报,2022,43(11):15 – 23.
SHEN Xuehao, TANG Shuai, GAO Huisong, et al. Design of air suction roller type sowing line for vegetable seedling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(11):15 – 23. (in Chinese)

[5] 杨昌敏,庄文化,徐一,等. 蔬菜穴盘育苗精量播种机研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(2):13 – 18.
YANG Changmin, ZHUANG Wenhua, XU Yi, et al. Study on vegetable tray precision seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(2):13 – 18. (in Chinese)

[6] 胡双燕,胡敏娟,王佳. 辣椒穴盘苗机械化移栽研究进展[J]. 中国农机化学报,2021,42(8):24 – 31.
HU Shuangyan, HU Minjuan, WANG Jia. Research progress on mechanized transplanting of pepper plug seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(8):24 – 31. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 王永维,肖玺泽,梁喜凤,等. 蔬菜穴盘苗自动补苗试验台穴孔定位与缺苗检测系统[J]. 农业工程学报,2018,34(12):35 – 41.
WANG Yongwei, XIAO Xize, LIANG Xifeng, et al. Plug hole positioning and seedling shortage detecting system on automatic seedling supplementing test-bed for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(12):35 – 41. (in Chinese)

[9] 冯青春,王秀,姜凯,等. 花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):21 – 27.
FENG Qingchun, WANG Xiu, JIANG Kai, et al. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(6):21 – 27. (in Chinese)

[10] DONG HYEON K, DONG EOK K, GONG IN L, et al. Development of a vegetable transplanting robot[J]. Journal of Biosystems Engineering,2012,37(3):201 – 208.

[11] 梁喜凤,肖玺泽,朱宇豪,等. 子叶期钵苗补苗末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(9):49 – 57.
LIANG Xifeng, XIAO Xize, ZHU Yuhao, et al. Design and experiment on pot-seedling supplementing end-effector for

vegetables in cotyledon phase[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9):49 – 57. (in Chinese)
[12] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):107 – 116. (in Chinese)
[13] 韩豹,申大帅,郭畅,等.可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(11):111 – 120.
HAN Bao, SHEN Dashuai, GUO Chang, et al. Design and experiment of adjustable end-effector of cabbage seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):111 – 120. (in Chinese)
[14] LIU W,WANG Q,JIANG H. Design and optimisation of end effector for loose substrate grasping based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering,2024,241:43 – 55.
[15] TIAN Z, MA W, YANG Q, et al. Design and experiment of gripper for greenhouse plug seedling transplanting based on EDM[J]. Agronomy, 2022,12(7):1487.
[16] 童俊华,蒋焕煜,蒋卓华,等.钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J].农业工程学报,2014,30(16):8 – 16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Optimization experiment of seedling parameters clamping by automatic transplanting robot for bowl seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(16):8 – 16. (in Chinese)
[17] 马锃宏,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)
[18] 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)
[19] 范开钧.穴盘苗补苗作业关键技术试验研究[D].广州:华南农业大学,2020.
FAN Kaijun. Experimental study on key technologies of seedling replenishment operation of hole tray seedlings[D]. Guanghzou:South China Agricultural University,2020. (in Chinese)
[20] 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 1):110 – 117,184.
HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experiment on combined seedling picking device with top clamping and pulling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp. 1):110 – 117,184. (in Chinese)
[21] 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 clampling of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 1):115 – 124,134. (in Chinese)
[22] 张妮,张国忠,付建伟,等.顶钵-夹茎组合式取苗装置设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(3):50 – 61.
ZHANG Ni, ZHANG Guozhong, FU Jianwei, et al. Design and experiment of the seedling pick-up device with ejecting pot-clamping stem combination[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(3):50 – 61. (in Chinese)
[23] 王小琴,俞高红,刘霓红,等.温室劣苗基质离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2023,54(12):359 – 366.
WANG Xiaoqin, YU Gaohong, LIU Nihong, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for greenhouse inferior seedling substrate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):359 – 366. (in Chinese)
[24] GB/T 10006—2021　塑料薄膜和薄片摩擦系数的测定[S].2021.
[25] 韩绿化,毛罕平,胡建平,等.穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J].农业工程学报,2013,29(2):24 – 29.
HAN Lvhua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experimental on the mechanical characteristics of automatic transplanting bowl of hole tray seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(2):24 – 29. (in Chinese)
[26] 刘铸永. 刚-柔耦合系统动力学建模理论与仿真技术研究[D].上海:上海交通大学, 2008.
LIU Zhuyong. Study on modeling theory and simulation technique for rigid-flexible coupling systems dynamics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)