

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.010

# 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析<sup>\*</sup>

孙国祥<sup>1</sup> 汪小岳<sup>1</sup> 何国敏<sup>1</sup> 周婷<sup>1</sup> 王成<sup>2</sup> 乔晓军<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**【摘要】** 针对现有穴盘苗移栽机工作过程中易伤苗、作业效率低等问题, 设计了移栽机末端执行器。根据移栽机实际移栽作业要求, 采用 SolidWorks 进行末端执行器虚拟样机设计, 并采用 COSMOSMotion 插件分析机械手指运动轨迹, 联合 COSMOSWorks 插件进行基质有限元模型分析。运动模拟试验表明机械手指水平位移量主要受斜楔块位移量  $\Delta h$  影响, 而垂直位移量主要受机械手指初始插入角度  $\alpha$  影响, 并且机械手指产生的作用力主要作用于基质块边缘, 不会对基质中的幼苗茎产生损伤。移栽试验表明末端机械手指平均移栽成功率为 95.76%, 平均伤苗率为 3.06%, 满足移栽作业要求。

**关键词:** 穴盘育苗 移栽机 末端执行器 设计 虚拟样机

**中图分类号:** TP242.6; S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0048-06

## Design of the End-effector for Plug Seedlings Transplanter and Analysis on Virtual Prototype

Sun Guoxiang<sup>1</sup> Wang Xiaochan<sup>1</sup> He Guomin<sup>1</sup> Zhou Ting<sup>1</sup> Wang Cheng<sup>2</sup> Qiao Xiaojun<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

### Abstract

With the aim to solve the problem of seedlings damaged and inefficiency of plug seedlings transplanter, the end-effector was redesigned. According to the actual operational requirements, SolidWorks was used to design the virtual prototype of end-effector. COSMOSMotion was used to analysis trajectory of mechanical finger and COSMOSWorks was used to analysis finite element model of matrix. It showed in motion simulation experiment that the horizontal displacement of the mechanical fingers was mainly affected by the slider displacement ( $\Delta h$ ), while the vertical displacement was mainly affected by the initial angle ( $\alpha$ ) the mechanical fingers insert in. The forces generated by mechanical fingers distribute in the matrix block edge and won't damage the seedling stems. The experimental results showed that the success rate of transplanter was 95.76%, the rate of seedlings damaging was 3.06%, and it could meet the operational requirements of transplanting.

**Key words** Plug seedling, Transplanter, End-effector, Design, Virtual prototype

### 引言

目前,我国约占 60% 的蔬菜品种是以育苗移栽方式种植,移栽作业主要为人工移栽,不仅劳动强度

大,而且作业质量难以保证<sup>[1]</sup>。日本、韩国等国家早在许多年前就开始了移栽机末端执行器研究,并且已有许多技术成功应用于实际生产环节中<sup>[2-8]</sup>。我国设施农业配套装备研制刚起步,因此要实现育

收稿日期: 2009-11-18 修回日期: 2010-01-18

\* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A10-19)

作者简介: 孙国祥, 硕士生, 主要从事检测技术与自动化装置研究, E-mail: sgx3053209@yahoo.com.cn

通讯作者: 汪小岳, 教授, 主要从事农业生物环境模拟与调控研究, E-mail: wright7878@yahoo.com.cn

苗移栽的自动化,必须解决移栽机末端执行器的机构设计问题。由于它是直接接触目标作物的设备,其机构参数是影响移栽效率和成功率的重要因素,其研究发展对提高农业生产效率及农作物的市场价值起着至关重要的作用。由于作业对象的柔嫩性、不规则性和环境的复杂多变性特征<sup>[9-10]</sup>,移栽过程必须保证不损伤幼苗。

前期研究中,移栽机末端执行器采用滑槽凸轮动力盘结构,主要设计了动力盘的曲线槽轮廓和尺寸,并采用 ADAMS 软件对其运动轨迹进行规划<sup>[11]</sup>。在试验中,由于末端驱动为丝杠结构,此结构末端执行器末端在移动过程中产生的震动较大,导致穴盘苗在移动过程中脱落。本文根据存在的问题,对其结构进行改进,采用斜楔杠杆式末端执行器,并用 SolidWorks 进行末端执行器虚拟样机设计<sup>[12]</sup>,分析机械手指运动轨迹精确控制和育苗基质有限元模型受力。

## 1 移栽机末端执行器设计

穴盘苗移栽机主要应用于温室瓜果蔬菜幼苗移栽,由机器视觉系统、控制系统、传输系统、移栽系统 4 部分组成,如图 1 所示。机器视觉系统实现图像采集与处理,将提取的特征参数作为移栽决策依据;控制系统主要由计算机和 PLC 控制器组成,移栽机控制软件根据识别结果,向 PLC 发送相应动作指令,实现移栽系统的移栽任务;传输系统通过脉冲驱动步进电动机转轴实现待移栽盘和目的盘传输带的输送任务,传输穴盘到达指定的位置(如图 1a 中分别位于图像采集区和移栽区的位置传感器 1 和 2),移栽盘和目的盘分别在两个传输带上,当移栽盘或目的盘某行移栽完毕,则上位机软件向相应传输电动机发送换行指令;移栽系统实现穴盘苗的抓取、保持与释放功能,其中由于末端执行器为直接接触目标作物的设备,是移栽机关键执行部分,必须保证其

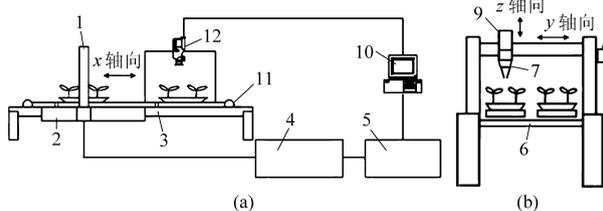


图 1 穴盘苗移栽机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of plug seedlings transplanter

(a) 全局视图 (b) 侧视图

1. 移栽系统 2. 位置传感器 2 3. 位置传感器 1 4. 步进电动机驱动器 5. PLC 控制器 6. 输送带 7. 末端执行器 8,9. 步进电动机 10. 计算机 11. 传输系统 12. CCD 摄像头

不伤害幼苗,不恶化幼苗生长的质量。本文主要研究内容是根据培育幼苗的穴盘规格,基质的规格、成份、摩擦阻力等特性来设计末端执行器,并分析其结构对移栽成功率、伤苗率和成活率的影响。

### 1.1 末端执行器结构和工作原理

末端执行器的机械结构如图 2 所示,其主要包括抓紧放松步进电动机、丝杠、斜楔块和机械手指,步进电动机为驱动元件,丝杠和斜楔块为传动机构,机械手指为执行机构。机械手指上端通过拉簧拉力,使得滚轴与斜楔块两侧面相切。末端执行器主要功能完成穴盘苗的抓取、保持和释放。工作原理:通过上位机软件图像处理结果获取待移栽盘和目的盘位置信息,计算出机械末端左右移动距离,向左右步进电动机发送相应脉冲量,实现机械末端在丝杠上精确移动定位。当末端执行器移至穴盘苗正上方时,向上下移动电动机发送相应脉冲量,实现机械末端下行,机械手指插入基质中,此时抓紧放松电动机驱动丝杠旋转,斜楔块将丝杠旋转运动转换为直线运动,向下运动时斜楔块上方撑开机械手指,机械手指作抓紧动作;待末端执行器移至目的盘正上方时,末端执行器下行,步进电动机作反方向旋转,斜楔块向上运动,机械手指作释放动作。

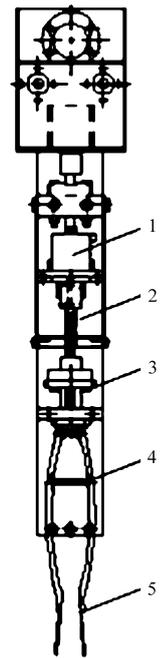


图 2 末端执行器机构简图

Fig. 2 Finger of end-effector

1. 步进电动机 2. 丝杠 3. 斜楔块 4. 拉簧 5. 机械手指

当末端执行器移至穴盘苗正上方时,向上下移动电动机发送相应脉冲量,实现机械末端下行,机械手指插入基质中,此时抓紧放松电动机驱动丝杠旋转,斜楔块将丝杠旋转运动转换为直线运动,向下运动时斜楔块上方撑开机械手指,机械手指作抓紧动作;待末端执行器移至目的盘正上方时,末端执行器下行,步进电动机作反方向旋转,斜楔块向上运动,机械手指作释放动作。

### 1.2 末端执行器的几何参数设计

末端执行器的直接作业对象为育苗基质,其几何参数设定的关键是分析机械手指的运动轨迹和对基质的作用力影响,找出机械手指结构的最优参数: $m$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $L$ ,如图 3a 和 3b 所示。机械手指采用四指结构,在中心线两边各有两手指且平行,在斜楔块作用下产生相对中心线对称运动。通过设置参数  $m$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $L$ ,确定外部控制量  $p_{num}$ ,实现机械手指各部分位移量  $\Delta d_1$ 、 $\Delta d_2$ 、 $\Delta d_3$ 、 $\Delta d_4$ 、 $\Delta \alpha$  的精确控制。机械手指产生的位移量参数方程和驱动脉冲量间的关系方程为

$$\Delta d_1 = m \sin(\alpha + \Delta \alpha) - m \sin \alpha \quad (1)$$

$$\Delta d_2 = n \sin(\alpha + \Delta \alpha) - n \sin \alpha \quad (2)$$

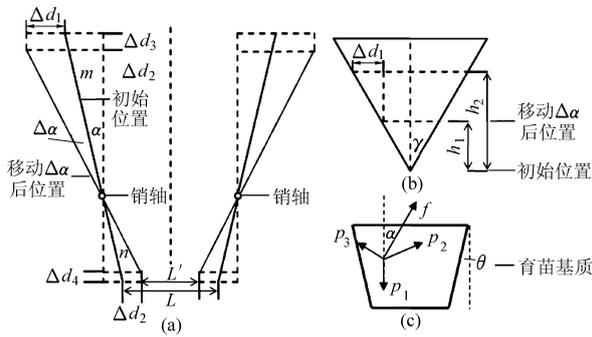


图3 末端执行器和基质受力几何模型

Fig. 3 Geometrical model of end-effector and matrix

(a) 机械手指位移模型 (b) 斜楔块侧面简图 (c) 基质受力分析

$$\Delta d_3 = m \cos \alpha - m \cos(\alpha + \Delta \alpha) \quad (3)$$

$$\Delta d_4 = n \cos \alpha - n \cos(\alpha + \Delta \alpha) \quad (4)$$

$$\Delta d_1 = (h_2 - h_1) \tan \frac{\gamma}{2} \quad (5)$$

$$\Delta \alpha = \arcsin \left( \frac{\Delta d_1 + m \sin \alpha}{m} \right) - \alpha =$$

$$\arcsin \left( \frac{(h_2 - h_1) \tan \frac{\gamma}{2} + m \sin \alpha}{m} \right) - \alpha \quad (6)$$

$$L' = L - 2\Delta d_2 = L - 2(n \sin(\alpha + \Delta \alpha) - n \sin \alpha) \quad (7)$$

$$p_{\text{num}} = \frac{h_2 - h_1}{p} \frac{360}{b} \quad (8)$$

式中  $m$ ——手指末端与销轴间距  
 $n$ ——手指前端与销轴间距  
 $\gamma$ ——斜楔块下角度  
 $\alpha$ ——机械手指插入基质的初始角度  
 $\Delta \alpha$ ——手指绕销轴旋转角度  
 $h_1$ ——初始位置高度  
 $h_2$ ——结束位置高度  
 $\Delta d_1$ ——手指末端水平移动距离  
 $\Delta d_2$ ——手指前端水平移动距离  
 $\Delta d_3$ ——手指末端垂直移动距离  
 $\Delta d_4$ ——手指前端垂直移动距离  
 $p_{\text{num}}$ ——机械手指释放状态到闭合状态所需脉冲数量  
 $p$ ——丝杠导程  
 $b$ ——步进电动机步距角  
 $L$ ——手指前端初始间距  
 $L'$ ——手指前端闭合间距

在机械手指抓取苗开始向上运动瞬间,基质所受力有粘着力  $p_1$ 、机械手指法向载荷  $p_2$ 、穴孔的反力  $p_3$  和机械手指与基质之间的摩擦力  $f$ ,如图 3c 所示。 $p_1$  由穴盘材料、基质大小、基质成份及基质含水率等决定,在此取为常数。 $f$  由土壤滑移摩擦力  $f_f$  和因土壤物料间的粘着力而产生的滑移阻力  $f_a$  组

成<sup>[13]</sup>,即

$$f = f_f + f_a = \mu(p_1 S + p_2)$$

式中  $\mu$ ——摩擦因数 $S$ ——实际接触的粘附面积

由于粘附面积很小,可忽略不计,所以得  $f = \mu p_2$ 。机械手指对基质作用力分解为横向和纵向平衡方程为

$$p_3 \cos \theta + f \sin \alpha = p_2 \cos \alpha \quad (9)$$

$$p_3 \sin \theta + p_2 \sin \alpha + f \cos \alpha = p_1 \quad (10)$$

联合摩擦力方程  $f = \mu p_2$ , 解得

$$p_2 = \frac{p_1 \cos \theta}{\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta + \mu(\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (11)$$

$$p_3 = \frac{p_1(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta + \mu(\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (12)$$

$$f = \frac{\mu p_1 \cos \theta}{\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta + \mu(\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (13)$$

根据式(11)~(13)可知,基质受力主要影响因素:机械手指插入基质的初始角度  $\alpha$ 、穴孔倾斜角  $\theta$ 、基质与机械手指的摩擦因数  $\mu$ 。由于在实际移栽作业过程中,穴盘规格具有多样性,所以在手爪固定结构参数确定情况下,主要调节其初始状态来满足生产需要。根据机械手指位移分析和对基质抓取受力分析,选取机械手指的固定结构参数包括: $m = 110 \text{ mm}$ ,  $n = 88 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $\mu = 0.5$ ;可调节参数包括: $\alpha$ 、 $\theta$ 、 $\Delta h$ ,  $L$ ,其中  $\Delta h = h_1 - h_2$ ,  $\theta$  由基质具体规格决定, $L$  随基质规格和机械手指插入基质深度参数变化。通过控制  $\Delta h$  数值,即可实现手指不同的机械位移,外部直接控制量为驱动脉冲数量  $p_{\text{num}}$ 。

## 2 末端执行器虚拟样机分析

### 2.1 末端机械手指运动轨迹分析

为验证穴盘苗移栽机末端机械手爪的合理性,用 SolidWorks 三维软件绘制出机械手指的零件模型,装配成虚拟样机如图 4 所示。在 COSMOSMotion 插件中定义其运动和静止零部件,添加各零部件间约束、耦合和力,四指尖内添加轨迹跟踪<sup>[14-15]</sup>。设定丝杠导程  $p$  为  $3 \text{ mm}$ ,丝杠旋转速度  $360(^\circ)/\text{s}$ ,斜楔块与丝杠添加耦合,丝杠每旋转  $360^\circ$  斜楔块垂直下移  $3 \text{ mm}$ 。设置模拟参数:持续时间为  $5 \text{ s}$ ,帧的数目为  $100$ ,即  $\Delta h = 15 \text{ mm}$  时,机械手指运动模拟。

通过计算机模拟试验,采用 3 种规格穴盘,分别具有固定  $\theta$  值,确定其可调节参数。当机械手指插入基质深度为  $30 \text{ mm}$ ,确定各自初始间距  $L$ ,使得手指不会对穴盘造成损坏,初始间距分别为  $30$ 、 $25$ 、

18 mm。分别采用两种初始角  $\alpha$ :  $0 \sim 15^\circ$  和  $15^\circ \sim 30^\circ$ , 进行模拟。末端执行器运动轨迹如图 5 所示, 为  $8 \times 16$  穴盘规格的图列。模拟结果如表 1 所示。机械手指水平位移量  $\Delta d_1$  和  $\Delta d_2$  主要受  $\Delta h$  的影响, 垂直位移量  $\Delta d_3$  和  $\Delta d_4$  主要受初始角  $\alpha$  影响, 其中穴盘规格: 穴盘行数  $\times$  穴盘列数, 基质规格: 基质上边长 (mm)  $\times$  基质底边长 (mm)  $\times$  高度 (mm)。为了避免由于手指向内侧的挤压, 导致穴盘幼苗茎部受到损伤, 控制各机械手指向内侧位移为  $5 \sim 9$  mm

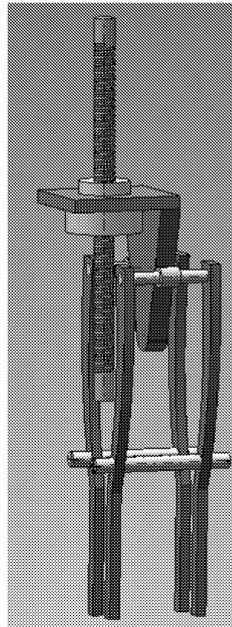


图 4 末端执行器虚拟样机  
Fig. 4 Virtual prototype of end-effector

范围内, 所以根据计算机模拟试验结果, 选取  $\Delta h$  范围为  $10 \sim 20$  mm。由于育苗基质块整体粘连性很好, 少量的垂直位移使得基质块整体与穴孔产生空隙, 有利于移栽作业, 但过量的垂直位移会使基质变形严重, 所以选取  $\alpha$  范围为  $5^\circ \sim 15^\circ$ 。

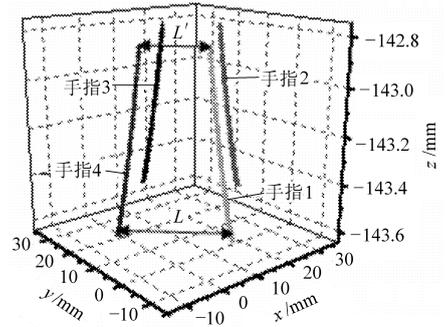


图 5 机械手指运动轨迹 ( $8 \times 16$ )  
Fig. 5 Trajectory of fingers ( $8 \times 16$ )

### 2.2 基质受力分析

通过 COSMOSMotion 插件分析了机械手指的运动轨迹, 满足抓取穴盘幼苗的要求。

表 1 末端执行器运动模拟结果

Tab. 1 Motion simulation results of end-effector

穴盘规格	基质规格/mm $\times$ mm $\times$ mm	$\theta/(\circ)$	$L/\text{mm}$	$\alpha/(\circ)$	$\Delta d_1/\text{mm}$	$\Delta d_2/\text{mm}$	$\Delta d_3/\text{mm}$	$\Delta d_4/\text{mm}$	$L'/\text{mm}$
5 $\times$ 10	45 $\times$ 30 $\times$ 50	8.53	30	5 $\sim$ 15	8.66	6.93 $\sim$ 6.92	1.1 $\sim$ 2.7	0.88 $\sim$ 2.20	16.14 $\sim$ 16.16
6 $\times$ 12	40 $\times$ 28 $\times$ 50	6.84	25	5 $\sim$ 15	8.66	6.93 $\sim$ 6.92	1.1 $\sim$ 2.7	0.88 $\sim$ 2.20	11.14 $\sim$ 11.16
8 $\times$ 16	30 $\times$ 15 $\times$ 50	8.53	18	5 $\sim$ 15	8.66	6.93 $\sim$ 6.92	1.1 $\sim$ 2.7	0.88 $\sim$ 2.20	4.14 $\sim$ 4.16
5 $\times$ 10	45 $\times$ 30 $\times$ 50	8.53	30	15 $\sim$ 30	8.66	6.92 $\sim$ 6.13	2.7 $\sim$ 4.8	2.20 $\sim$ 3.80	16.16 $\sim$ 17.74
6 $\times$ 12	40 $\times$ 28 $\times$ 50	6.84	25	15 $\sim$ 30	8.66	6.92 $\sim$ 6.13	2.7 $\sim$ 4.8	2.20 $\sim$ 3.80	11.16 $\sim$ 12.74
8 $\times$ 16	30 $\times$ 15 $\times$ 50	8.53	18	15 $\sim$ 30	8.66	6.92 $\sim$ 6.13	2.7 $\sim$ 4.8	2.20 $\sim$ 3.80	4.16 $\sim$ 5.74

为了解机械手指在抓取育苗基质时是否会损伤育苗, 根据穴孔实际物理尺寸, 建立穴盘苗培养基质块有限元模型如图 6a 所示。添加四手指与基质插孔的面接触, 在 FEA 中定义手指与基质块作用力的承载面<sup>[16-17]</sup>。从 COSMOS 材料库中为基质块定义材料属性: 弹性模量  $4.6 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, 泊松比 0.464,

抗剪模量  $2.9 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>, 质量密度  $1900$  kg/m<sup>3</sup>, 张力强度  $1.37 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, 屈服强度  $9.2 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>。

从 COSMOSMotion 中输入载荷到 COSMOSWorks 中, 将 4 个机械手指的作用力导入穴孔中, 模拟实际抓取与释放动作。基质块 FEA 模型外形尺寸选用与育苗盘规格 ( $6 \times 12$ ) 相应的配套尺

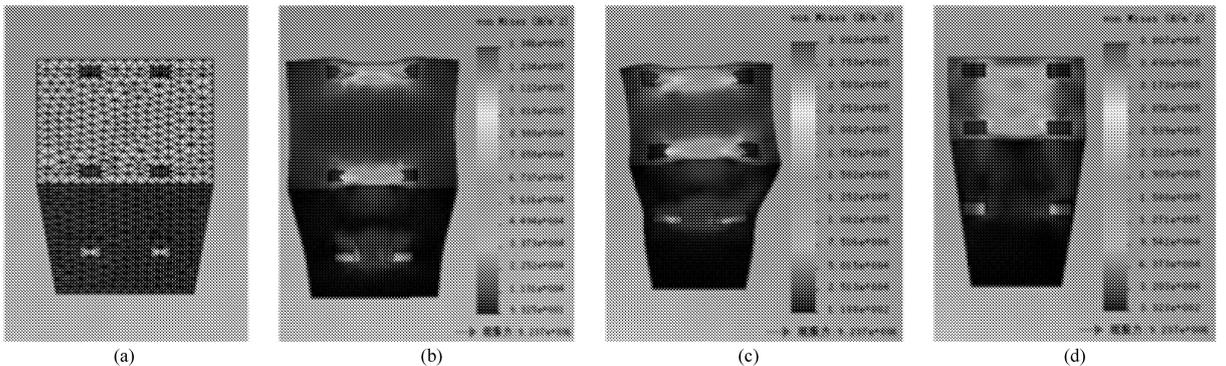


图 6 基质受力分析结果

Fig. 6 Mechanical analysis of matrix

(a) 基质 FEA 模型 (b)  $6 \times 12$  (c)  $8 \times 16(1)$  (d)  $8 \times 16(2)$

寸,机械手指插入基质深度为30mm。将COSMOSMotion运动画面生成设计情形,根据绘制设计情形结果表,提取其应力最大帧如图6b所示,将机械手指作用于育苗基质内部的应力分布情况形象逼真地表现出来,所产生的应力主要分布于基质块的边缘,最大应力在机械手指与基质接触面处。

根据COSMOSWorks模拟基质块FEA模型受力分布结果,可知对于此规格穴盘中的基质,其FEA模型中心有20mm×20mm的微压缩区域,不会由于机械手指对基质中的幼苗茎产生挤压,导致幼苗损伤,影响其成活率。在其释放苗过程中,由于抓取时产生的空隙,在机械手指离开接触面时,机械手指与基质间接触面积很小,其摩擦力*f*可忽略,且*f*远小于基质自重,导致释放苗时不会产生粘连现象,此结构机械手指满足穴盘移栽作业要求。

针对实际移栽作业,采用多种规格穴盘,本研究又对规格为8×16的穴盘基质进行模拟,建立相应规格基质块FEA模型。如图6c所示,规格为8×16穴盘中基质块受力分布,由于此结构机械手指抓取时,主要分布于两对机械手指之间,对于中心区域的苗茎不会产生伤害。但是对于前期设计的机械手指作用于此规格穴盘基质时,对基质中心区域产生挤压,导致苗茎和根受到伤害,如图6d所示。

### 3 试验与结果分析

为了测试移栽机末端机械手指工作性能,对其进行实物样机测试试验,实物样机如图7所示。试验对象采用幼苗期15~20d的佳粉18号番茄幼苗。选用适合于番茄苗生长和适合移栽作业,具有较高柔韧性的育苗基质,其中锯木、蛭石和煤灰的体积比为6:2:2。选用5×10、6×12、8×16规格穴盘进行移栽试验。样机试验主要检测移栽成功率 $L_{YZ}$ 、成活率 $L_{CH}$ 、伤苗率 $L_{SM}$ ,其计算公式为

$$L_{YZ} = \frac{N_{SF}}{N_{NUM}} \times 100\% \quad (14)$$

$$L_{CH} = \frac{N_{CH}}{N'_{NUM}} \times 100\% \quad (15)$$

$$L_{SM} = \frac{N_{YS} + N_{JS}}{N_{NUM}} \times 100\% \quad (16)$$

式中  $N_{SF}$ ——幼苗释放成功数量  
 $N_{NUM}$ ——移栽幼苗总数量  
 $N_{CH}$ ——幼苗成活数量  
 $N'_{NUM}$ ——幼苗移栽成功总数量  
 $N_{YS}$ ——插伤苗叶数量  
 $N_{JS}$ ——插伤苗茎数量

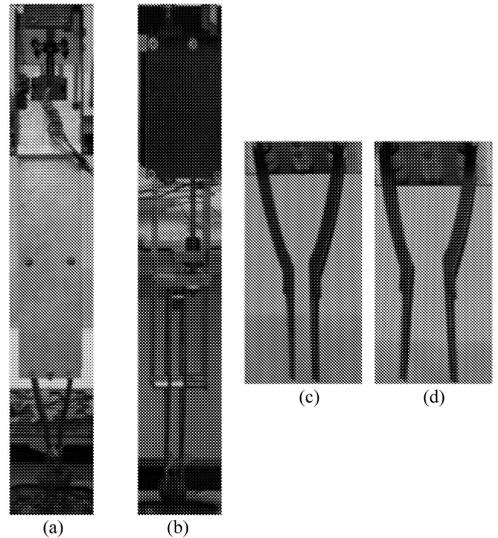


图7 移栽机末端执行器

Fig.7 End-effector of transplanter

(a) 侧视图 (b) 正视图 (c) 抓紧状态 (d) 松开状态

试验结果如表2所示,移栽试验中手指抓取基质移动过程中没有幼苗脱落现象。对于规格5×10和6×12穴盘,移栽成功率分别为94.0%、97.2%,幼苗成活率100%,但这两种规格穴盘存在释放苗失败现象,主要由于基质块水分较高,在释放时产生粘连。对于规格8×16穴盘,抓取失败主要是由于基质块较小,在机械手指的挤压下,导致基质散落;对于此规格穴盘,由于穴孔较小、苗密度大,机械手指在取苗时插伤苗叶,伤苗率较高。

通过样机试验表明,该结构机械末端平均移栽成功率为95.76%,平均成活率98.44%,平均伤苗率3.06%(对于规格较大穴盘伤苗率小于2%)。在实际移栽时,可选用较大规格穴盘、定向播种或者实时动态调节末端机械手指的插入角度,减少末端机械手指对苗叶伤害。

表2 试验结果

Tab.2 Experimental results

样品品种	穴盘规格	基质规格	抓取成功率 /%	释放成功率 /%	移栽成功率 /%	伤苗率 /%	成活率 /%
		/mm×mm×mm					
佳粉18号	5×10	45×30×50	100	94.0	94.0	0	100
佳粉18号	6×12	40×28×50	100	97.2	97.2	1.38	100
佳粉18号	8×16	30×15×50	96.09	100	96.09	7.81	95.31

## 4 结束语

应用 SolidWorks 对温室穴盘苗移栽机虚拟样机设计,对末端执行器的运动和基质块的受力情况进行了分析。选取机械手指的固定结构参数包括: $m = 110 \text{ mm}$ , $n = 88 \text{ mm}$ , $\gamma = 60^\circ$ , $\mu = 0.5$ ,3 种规格穴盘初始间距  $L$  分别选取 30 mm、25 mm、18 mm,对虚拟样机进行模拟。模拟结果表明该机械手指水平位移量主要受  $\Delta h$  影响,而垂直位移量主要受机械手

指初始插入角度  $\alpha$  影响,最终确定可调参数  $\alpha$  为  $5 \sim 15^\circ$ , $\Delta h$  为 10 ~ 20 mm,针对不同穴盘规格,选用不同初始间距  $L$ 。基质 FEA 模型受力分析结果表明机械手指产生的作用力主要作用于基质块边缘,不会对基质中的幼苗茎产生损伤。此结构机械末端平均移栽成功率为 95.76%,平均伤苗率 3.06% (对于穴盘规格较大时伤苗率小于 2%),满足实际移栽作业要求。通过虚拟样机设计,提高了末端执行器的设计质量。

## 参 考 文 献

- 王君玲,高玉芝,李成华. 蔬菜移栽生产机械化现状与发展方向[J]. 农机化研究,2004,26(2):42~43.  
Wang Junling, Gao Yuzhi, Li Chenghua. The present state and development direction of vegetable transplanting mechanization [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2004,26(2):42~43. (in Chinese)
- Wang H, Sistler F E. A robotic pepper transplanter[J]. Applied Engineering in Agriculture,1986,2(1):2~5.
- Simonton W. Robotic end-effector for handling greenhouse plant material [J]. Transactions of the ASAE,1991,34(6):2615~2621.
- Kim K D, Ozaki S, Kojima T. Transplanting and raising seedling robot in a nursery room [C] // Proceedings of ARBIP95, 1995,1:157~163.
- Ryu K H, Kim G, Han J S. Development of a robotic transplanter for bedding plants [J]. Automation and Emerging Technologies,2001,78(2):141~146.
- Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of a seeding pick-up device for vegetable transplanters [J]. Transactions of the ASAE, 2002,45(1):13~19.
- Kutz K C, Miles G A, Hammer P A, et al. Robotic transplanting of bedding plants [J]. Transactions of the ASAE,1987,30(3):586~590.
- Brewer H L. Conceptual modeling automated seedling transfer from growing trays to shipping modules [J]. Transactions of the ASAE,1994,37(4):1043~1051.
- 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计 [J]. 农业机械学报,2008,39(3):109~112.  
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):109~112. (in Chinese)
- 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述 [J]. 农业机械学报,2008,39(3):175~179.  
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):175~179. (in Chinese)
- 周婷,汪小岳,王超群,等. 温室穴盘苗移栽机的设计与仿真分析 [J]. 机械设计与研究,2009,25(2):121~124.  
Zhou Ting, Wang Xiaochan, Wang Chaoqun, et al. Design and simulation analysis of transplanter for potted tray seedlings in greenhouse [J]. Machine Design & Research,2009,25(2):121~124. (in Chinese)
- 牛国栋,张士新. 虚拟样机技术在农业机械产品开发中的应用 [J]. 农机化研究,2008,30(5):157~158.  
Niu Guodong, Zhang Shixin. Application of virtual prototyping technology in the design of agricultural mechanical products [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(5):157~158. (in Chinese)
- 徐丽明,张铁中,史志清. 玉米自动移栽机取苗机构的设计 [J]. 中国农业大学学报,2000,5(4):58~60.  
Xu Liming, Zhang Tiezhong, Shi Zhiqing. Design on the picking seedling machinery in the maize auto-transplanter [J]. Journal of China Agricultural University,2000,5(4):58~60. (in Chinese)
- 赵清华,张颖,韩霞. 水稻插秧机秧针运动轨迹模拟——基于 MATLAB 及 COSMOSMotion [J]. 农机化研究,2009,31(9):72~74.  
Zhao Qinghua, Zhang Ying, Han Xia. Simulating the motion trajectory of rice transplanter transplanting mechanism needle-based on MATLAB & COSMOSMotion [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2009,31(9):72~74. (in Chinese)

为 $0.6 \sim 1.0 \text{ hm}^2/\text{h}$ ,作业效率远高于人工插秧和撒播。由表2可以看出,其种子伤芽率仅为1.5%,能满足水稻芽种播种要求;各行排种(肥)量一致性变异系数、总排种(肥)量稳定性变异系数、播种(施肥)均匀性变异系数、施肥深度合格率、断条率等重要指标均符合国家相关标准规定。

## 4 结论

(1) 设计了一种水稻芽种播种施肥机,可一次完成平田、开沟(厢沟、畦沟、肥沟)、作畦、播种、施肥、压种、盖肥等工序。

(2) 室内台架试验表明,振动阀门与改进后的槽轮排种器配套,能有效防止种子堵塞和架空。只要芽长不超过种子长度,均具有良好的适应性,伤芽率不大于1.5%。播种量为 $12 \sim 75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,能同时满足不同播量的杂交稻和常规稻芽种的直播要求。

(3) 田间生产试验表明,该机播种、施肥、开沟等关键部件工作可靠、作业效果好、效率高,满足水稻直播的农艺技术要求。其主要指标均能达到国家相关标准规定。

(4) 该机结构简单,生产效率高,纯小时生产率达到 $0.6 \sim 1.0 \text{ hm}^2/\text{h}$ 。

## 参 考 文 献

- 臧英,罗锡文,周志艳. 南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J]. 农业机械学报,2008,39(1):60~63.  
Zang Ying, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan. Development strategy on rice planting and harvesting mechanization in South China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):60~63. (in Chinese)
- 罗锡文,谢方平,区颖刚. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报,2004,20(1):136~139.  
Luo Xiwen, Xie Fangping, Ou Yinggang. Experimental investigation of different transplanting methods in paddy production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(1):136~139. (in Chinese)
- 何瑞银,罗汉亚,李玉同,等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价[J]. 农业工程学报,2008,24(1):168~171.  
He Ruiyin, Luo Hanya, Li Yutong, et al. Comparison and analysis of different rice planting methods in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(1):168~171. (in Chinese)
- 王洋,张祖立,张亚双,等. 国内外水稻直播种植发展概况[J]. 农机化研究,2007(1):48~50.  
Wang Yang, Zhang Zuli, Zhang Yashuang, et al. Research and progress of rice direct sowing at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(1):48~50. (in Chinese)
- 罗锡文,蒋恩臣,王在满,等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(12):52~56.  
Luo Xiwen, Jiang Enchen, Wang Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(12):52~56. (in Chinese)
- 唐湘如,罗锡文,黎国喜,等. 精量穴直播早稻的产量形成特性[J]. 农业工程学报,2009,25(7):84~87.  
Tang Xiangru, Luo Xiwen, Li Guoxi, et al. Yield formation characteristics of precision hill-drop drilling early rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(7):84~87. (in Chinese)
- 王林力,谢方平,孙松林,等. 水稻芽种偏心顶杆式精量播种机设计[J]. 农业机械学报,2007,38(12):215~217.  
Wang Linli, Xie Fangping, Sun Songlin, et al. The design of rice bud eccentric push-rod precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):215~217. (in Chinese)
- 高金福,马特. 2BS-14G型水稻直播机试验研究[J]. 农牧与食品机械,1994(5):10~11.

(上接第53页)

- 张卧波,杨俊峰,王建明,等. 挖掘机工作及运动状态的仿真与应用研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):149~151.  
Zhang Wobo, Yang Junfeng, Wang Jianming, et al. Simulation and application on work and motion state of excavator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(2):149~151. (in Chinese)
- 孙宇,朱俊平,西庆坤. 农业机械中的摆线轮齿廓强度有限元分析[J]. 农机化研究,2008,30(4):25~28.  
Sun Yu, Zhu Junping, Xi Qingkun. Finite element analysis for tooth strength of cycloid-gear in the field of agricultural machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(4):25~28. (in Chinese)
- 王芳,王春光,杨晓清. 西瓜的力学特性及其有限元分析[J]. 农业工程学报,2008,24(11):118~121.  
Wang Fang, Wang Chunguang, Yang Xiaoqing. Mechanics characteristics and finite element analysis of watermelon [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(11):118~121. (in Chinese)