

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.006

## 2 自由度夹子式水稻穴盘钵苗拔抛机械手设计与试验\*

马瑞峻 樊元君 黄倩 黄木水 张亚莉

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 根据2自由度机械手拔抛穴盘钵苗的特点和机理,设计了一种2自由度夹子式机械手,简述了其工作对象特征,主要结构组成及控制电路,对关键部件夹秧机构进行了设计,通过Pro/E建模及虚拟装配对秧夹的开闭合过程进行仿真,保证开闭合运动的精度和可靠性。在试验平台上,进行了不同穴盘类型、不同钵土含水率、不同秧夹弹簧拉伸力以及不同穴盘进给模式对机械手拔秧效果影响的试验研究。试验结果表明:穴盘类型和钵土含水率对拔秧成功率有显著影响( $P < 0.01$ ),采用红色穴盘育秧或保持钵土含水率大于30%可以提高拔秧成功率;夹秧机构上复位弹簧拉伸力在15 N和22 N间变化对拔秧成功率没有显著影响;采用自动进给穴盘模式不会对拔秧成功率产生显著影响,秧苗自动输送进给机构的性能满足钵苗行输送进给的要求。

**关键词:** 夹子式机械手 水稻穴盘钵苗 设计 试验

**中图分类号:** S223.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0035-09

### Design and Experiment of 2-DOF Clamp-type Manipulator for Transplanting of Rice Potted-seedlings

Ma Ruijun Fan Yuanjun Huang Qian Huang Mushui Zhang Yali

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** A new kind of 2-DOF clamp-type manipulator was developed relying on the feature and principle of 2-DOF manipulator for automatically pulling up and transplanting multiple cell-tray potted-seedlings. The characteristics of operating targets, main structure and control circuit of the manipulator were described. The key component of seedling clamp mechanism was designed, and 3D structure model was established and virtually assembled by using Pro/E. Dynamics simulation to the seedling clamp mechanism ensured the reliability of its opening and closing process. Preliminary performance experiment was conducted on a program controlled prototype platform. Four related factors were considered, including the type of cell-tray, moisture of soil ball, extending force of clip's spring and feeding mode of cell-tray. And the effect of above factors on the evaluate index of successful pulling up rate of the manipulator was analyzed. Results showed that type of cell-tray and moisture of soil ball both had very significant effects on successful pulling up rate ( $P < 0.01$ ), while no significant difference for both extending force of clip's spring (15, 22 N) and feeding mode of cell-tray ( $P > 0.05$ ). When the extending force of clip's spring and feeding mode of cell-tray were unchanged, cultivating the potted-seedlings by using red tray or maintaining moisture of soil ball of potted-seedling above 30% can increase successful pulling up rate. And the performance of seedlings automatic transporting and feeding mechanism can meet the requirements of transporting and feeding cell-tray potted-seedlings row-by-row. The results provide a useful reference for subsequent optimization on manipulator's performance.

**Key words:** Clamp-type manipulator Rice potted-seedlings Design Experiment

收稿日期: 2015-01-31 修回日期: 2015-04-16

\* 国家自然科学基金资助项目(31471418)

作者简介: 马瑞峻, 副教授, 主要从事农业机械化及其自动化研究, E-mail: maruijun\_mrj@163.com

## 引言

水稻钵苗抛秧移栽技术的高产机理初步认为是带营养土的秧苗入土浅、返青快、低节位分蘖多的缘故<sup>[1-3]</sup>,该技术必须与工厂标准化育秧和有序机械化种植结合才能更好地发挥其增产优势<sup>[4]</sup>。有序抛秧移栽机械移栽钵苗过程中,需要完成钵苗进给、钵苗脱盘和钵苗抛栽等工序,其中,钵苗脱盘主要由取苗机构完成,取苗机构的设计是影响机械抛秧移栽质量的重要因素之一<sup>[5-6]</sup>,而基于不同取苗方式设计的取苗机构作业效果会受到移栽轨迹、传动机构结构参数和机构与钵苗间的相互作用关系等因素的影响<sup>[7-9]</sup>。

随着计算机的发展,通过利用 VB、Matlab 软件对钵苗移栽机构的运动轨迹进行仿真分析并得到机构主要结构参数的最优设计值成为一种高效的机械结构设计手段<sup>[10-13]</sup>。本课题组提出一种机械手式水稻有序行抛秧的设计并不断改进优化<sup>[14-16]</sup>,其主要关键部件取苗机构是基于仿生机理设计的一种夹持指面选用不同截面柔性材料的夹子式机械手,并通过试验研究了秧苗茎秆拔断力力学特性<sup>[17]</sup>以及不同因素对穴盘钵苗拔秧力的影响<sup>[18]</sup>,但 2 自由度夹子式机械手在自动控制环境下按照移栽路径夹拔多穴钵苗的效果则仍有待研究。因此,本文设计并搭建 2 自由度夹子式机械手及其控制系统试验平台,研究穴盘类型、钵土含水率、秧夹弹簧拉伸力和穴盘进给模式对 2 自由度夹子式机械手夹拔钵苗效果的影响,分析不同因素影响下评价指标——拔秧成功率的变化规律,以期为进一步提高 2 自由度夹子式机械手的工作性能和参数优化提供依据。

## 1 工厂化水稻育秧穴盘

2 自由度夹子式机械手主要针对穴孔以矩形布

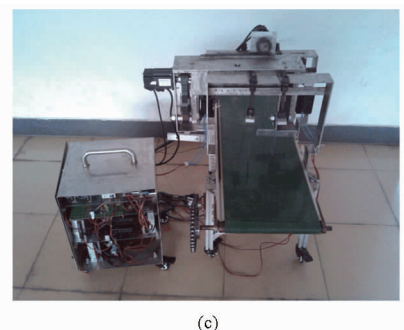
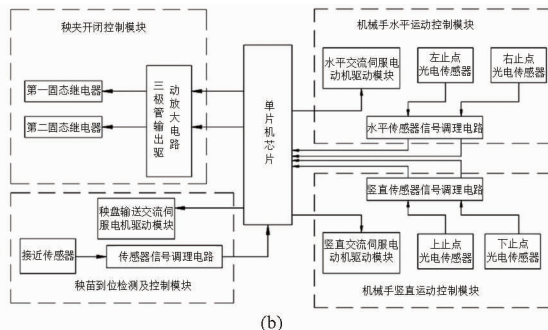
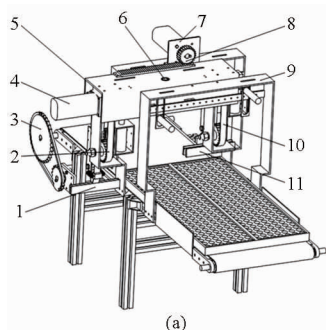


图 2 2 自由度夹子式机械手试验平台结构及其控制电路硬件示意图和实物图

Fig. 2 Schematic diagram and photograph of 2-DOF clamp-type manipulator experiment platform and its control circuit

(a) 2 自由度夹子式机械手试验平台结构示意图 (b) 控制电路硬件示意图 (c) 试验平台实物图

1、11. 夹秧机构 2、10. 同步带导轨机构 3. 秧苗自动输送进给机构 4. 竖直电动机 5. 倒 U 型悬架 6. 竖直同步反向机构 7. 水平电动机 8. 齿轮齿条机构 9. 龙门式支架

置方式的软穴盘所育钵苗的移栽<sup>[19]</sup>,本研究中选用结构尺寸差异相对较大的 2 种穴盘类型,其中,穴盘 I 是 29 行 × 14 列(406 穴),穴形呈倒四棱台形,上边宽 17 mm、下边宽 10 mm、穴高 15 mm,行中心距与列中心距均为 20 mm;穴盘 II 是 23 行 × 12 列(276 穴),穴形呈倒圆台形,上顶圆直径为 22 mm,下底圆直径为 12 mm,穴高为 20 mm,行中心距为 24 mm,列中心距为 25.5 mm,穴盘实物图如图 1 所示。

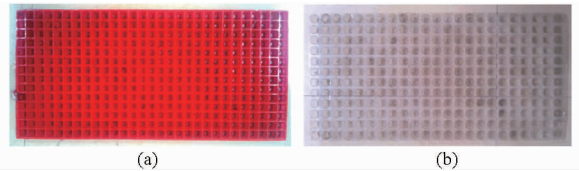


图 1 穴盘实物图

Fig. 1 Picture of plastic tray

(a) 穴盘 I (b) 穴盘 II

## 2 试验平台结构及其工作原理

2 自由度夹子式机械手试验平台结构及其控制电路硬件结构示意图及实物图,如图 2 所示。试验平台包括秧苗自动输送进给机构和 2 自由度夹子式机械手,秧苗自动输送进给机构可为 2 自由度夹子式机械手实现穴盘苗以行为单位的精确进给,2 自由度夹子式机械手主要由夹秧机构、水平电动机、齿轮齿条机构、竖直同步反向机构、竖直电动机和同步带导轨机构等组成,其中,夹秧机构用于半幅钵苗的夹持和释放;水平电动机通过齿轮齿条机构的动力传递,实现夹秧机构在拔秧区和抛秧区间转换的水平往复运动;竖直同步反向机构用于协调 2 个夹秧机构拔秧或抛秧的竖直往复运动;竖直电动机通过竖直同步反向机构和同步带导轨机构的动力传递,同时驱动 2 个夹秧机构完成竖直往复运动。

2 自由度夹子式机械手工作时,按照规定的移

栽路径作业,机械手上的2个夹秧机构分别完成穴盘中一行钵苗的半幅列钵苗的移栽,具体的工作原理可参照文献[16]。

上述钵苗行的精确进给运动、机械手2个夹秧机构水平和竖直往复运动的速度和加速度、秧夹开闭的时序控制等,均由控制电路中单片机编程控制各个功能模块实现,其中,在秧苗自动输送进给机构侧面安装接近传感器用以检测塑料穴盘钵体苗的到位情况,秧苗到位检测及控制模块根据所采集到的信号控制输送进给机构驱动电动机的间歇启停,实现钵苗行的精确进给。调整接近传感器水平安装位置,可使待移栽钵苗的穴钵行中心面与夹秧机构的夹持中心面对齐,保证夹秧机构垂直拔秧的最佳效果(起拔角为 $90^\circ$ 时,所需拔秧力最小<sup>[18]</sup>)。

秧苗自动输送进给机构根据试验需求,可调整为人工进给穴盘模式或自动进给穴盘模式。关闭秧苗到位检测及控制模块,秧苗自动输送进给机构停止工作,人工推送秧盘,即为人工进给模式,此时,穴盘逐行进给、钵苗行与秧夹夹持面对齐定位以及触发机械手进入穴盘移栽钵苗信号均由人工完成,但进入穴盘后的拔抛秧作业仍由控制电路控制机械手自动完成;自动进给模式下,上述作业环节均由单片机控制电路控制机械手全程自动完成。

### 3 关键部件夹秧机构设计

#### 3.1 结构及工作原理

夹秧机构的结构组成如图3所示。当秧夹开闭控制模块收到单片机传来的开启信号,推拉电磁铁瞬间通电,电磁铁的可动铁芯从行程上止点开始带动L型压杆向下作直线运动,当到达行程的下止点时,克服秧夹两侧复位弹簧拉伸力,迫使秧夹完全打开;当单片机程序传来关闭信号时,电磁铁瞬间失电,L型压杆对秧夹不再施加作用力,秧夹在复位弹簧作用下恢复闭合状态,因此秧夹夹持秧苗的夹持

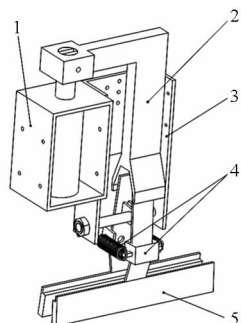


图3 夹秧机构结构示意图

Fig. 3 Structure of seedling clamp mechanism

1. 推拉电磁铁 2. L型压杆 3. 支撑架 4. 复位弹簧及其安装块 5. 秧夹

力由复位弹簧拉伸力决定。

#### 3.2 秧夹参数设计

为了满足秧夹单次夹持半幅列钵苗的要求,指面长度应至少等于半幅列钵苗的宽度,参照前文2种穴盘类型的结构参数,穴盘I和穴盘II半幅列钵苗的宽度分别为137 mm和150 mm。由于夹秧机构从穴盘侧面进入拔秧的水平距离可调,因此,指面长度设计值选取为150 mm,虽然大于穴盘I半幅列钵苗宽度,但不会造成夹秧机构夹持当前半幅列钵苗时,对另外半幅列钵苗的误夹。

依据试验育秧钵苗平均高度为150 mm以及前期试验结果<sup>[17]</sup>可知,钵苗茎部承受的拔断力最大,秧夹茎部的高度在0~40 mm之间,设计秧夹指面宽度为25 mm。

秧夹指面粘贴软性材料,使秧夹闭合时,能够适应不同穴钵苗株数、茎秆粗细等差异,实现夹持拔起多穴钵苗的目的。由于指面材料和形状对机械手拔秧效果的影响较大,需要深入研究,因此,不作为本文的研究重点。本文只选用其中一种指面,材料为普通橡胶,截面形状为矩形,厚度4 mm。

夹秧机构处于初始闭合状态以及开启过程示意图如图4所示。考虑夹秧机构从穴盘侧面进入拔秧过程中,复位弹簧与钵苗发生干涉会一定程度上影响垂直拔秧效果,需要确定复位弹簧安装点与秧夹指面中线的垂直距离 $H_1$ 。观察平均高度为150 mm的抛秧期钵苗茎叶分布情况,以60~70 mm高度为分界线,高度以下范围是茎秆部位,以上范围是叶片,所以,结合上述秧夹夹持点与钵苗分蘖点的平均距离28 mm,设计 $H_1$ 的最小值为32 mm,这时,复位弹簧安装点高度与钵苗茎叶分界线高度相近,复位弹簧只与叶片干涉,但是否对秧夹夹持拔取秧苗的

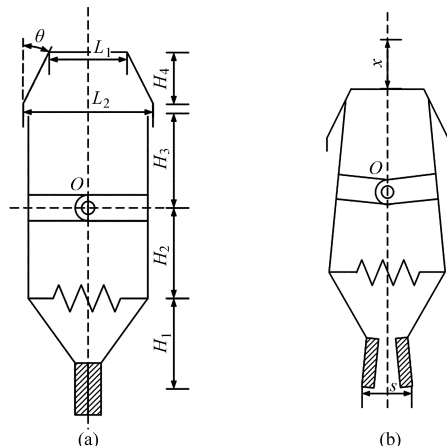


图4 秧夹及内楔形面的结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of clip and inward wedge-shaped surface

(a) 闭合状态 (b) 开启状态

效果有影响,需要通过试验检验,如果有影响,复位弹簧的安装位置高度需要提高。复位弹簧安装点与铰接点  $O$  的垂直距离  $H_2$  以及秧夹上边缘与铰接点  $O$  的垂直距离  $H_3$  的相互大小关系对于后续复位弹簧设计和所需开夹电磁力均有影响,设计中取  $H_3 = H_2 = H_1$ 。

图中  $\theta$ ——内楔形面与竖直方向夹角, ( $^\circ$ )

$L_1$ ——内楔形面上边缘间距, mm

$L_2$ ——内楔形面下边缘间距, mm

$H_4$ ——内楔形面高度, mm

$H_3$ ——秧夹上边缘与铰接点  $O$  的垂直距离, mm

$H_2$ ——复位弹簧安装点与铰接点  $O$  的垂直距离, mm

$H_1$ ——秧夹指面中线与弹簧安装点的垂直距离, mm

$x$ ——L型压杆向下移动距离, mm

$s$ ——秧夹下边缘打开间距, mm

### 3.3 L型压杆内楔形面参数设计

由图4分析可知,内楔形面与竖直方向夹角  $\theta$  过大时,L型压杆向下迫使秧夹打开的瞬间,所形成垂直于秧夹上边缘的开夹分力过小,需要选用较大功率电磁铁; $\theta$ 角过小时,秧夹由完全开启向闭合状态转换过程中,秧夹上边缘与内楔形面的摩擦阻力较大,不利于秧夹的快速闭合,另外,内楔形面上边缘间距  $L_1$  以及下边缘间距  $L_2$  决定了夹秧机构开闭精度。因此,L型压杆内楔形面的结构尺寸对夹秧机构的设计至关重要。

由图4a可知,为了保证夹秧机构处于闭合状态时,秧夹指面完全闭合,内楔形面下边缘间距  $L_2$  应大于等于秧夹上边缘间距。考虑避免夹秧机构从穴盘侧面进入拔秧时,秧夹与相邻钵苗行的干涉,设计  $L_2$  为2种穴盘穴孔行宽度尺寸的较小值,参照2种穴盘穴孔上口径尺寸和边缘间隙分别为17 mm和3 mm、22 mm和4 mm,因此,  $L_2 = \min[(17 + 2 \times 3), (22 + 2 \times 4)] = 23$  mm。

设计秧夹材料为不锈钢,L型压杆材料为铝,以铝与不锈钢的摩擦角  $\beta$  为参考,取  $\theta = 2\beta$ ,不润滑条件下,铝与不锈钢摩擦因数  $\mu = 0.17$ ,根据  $\beta = \arctan\mu$ ,则  $\theta = 2\beta \approx 20^\circ$ 。

$\theta$ 值确定的前提下,内楔形面高度  $H_4$  以及内楔形面上底面长度  $L_1$  的设计与所需秧夹下边缘打开间距  $s$  有关。根据上述已确定结构参数,通过 Pro/E Wildfire 4.0对夹秧机构进行三维建模并完成虚拟装配,建立机构运动的约束,包括推拉电磁铁与L型压杆的滑动杆约束、秧夹绕铰接点  $O$  的销钉约束以

及秧夹上边缘与内楔形面的常规约束。在 Pro/E 机构模块下,在点  $O$  设置伺服驱动电动机,进行秧夹开启过程的运动学仿真分析。图5显示开启过程中,秧夹下边缘打开间距  $s$  随着L型压杆向下移动距离  $x$  变化的仿真结果。

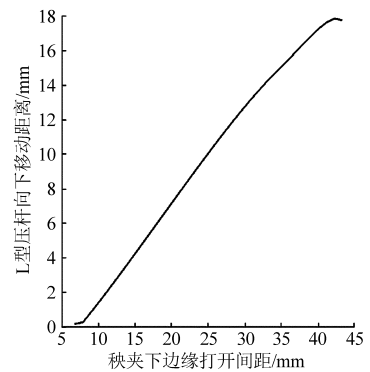


图5  $s$  随  $x$  的变化曲线

Fig. 5 Changing curve of  $s$  vs  $x$

设计内楔形面高度  $H_4$  以及内楔形面上底面长度  $L_1$  的取值由秧夹下边缘打开间距  $s$  等于2种穴盘穴孔行宽度尺寸的较大值30 mm这一条件决定,由图5可知,  $x_1 = f(30) \approx 12$  mm,所以,设计内楔形面高度  $H_4 = x_1 = 12$  mm,计算内楔形面上底面长度  $L_1 = L_2 - 2H_4 \tan\theta \approx 14$  mm。

### 3.4 秧夹复位弹簧设计

秧夹闭合状态的受力分析如图6所示,前期研究表明,在钵土含水率(湿基)27%~29%下,拔起  $n$  穴 ( $6 \leq n \leq 7$ ) 钵苗的平均拔秧力  $F_n \approx 3$  N,而一穴钵苗(每穴1~6株秧苗不等)能承受的平均拔断力在3.7~16 N内<sup>[17-18]</sup>。图中  $ABC$  为单边秧夹模型,  $A$  为秧苗夹持点,  $O$  为秧夹旋转中心,  $B$  为复位弹簧的受力点。

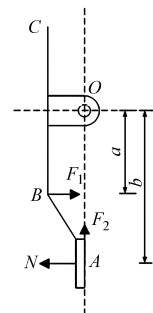


图6 秧夹闭合状态的受力分析

Fig. 6 Force analysis of clip under closed state

图中  $N$ ——秧苗夹持力, N

$F_1$ ——复位弹簧的预紧力, N

$F_2$ ——秧夹指面产生静摩擦力, N

当秧夹顺利拔起多穴钵苗时,所需的拔秧力与秧夹指面和钵苗之间产生的静摩擦力  $F_2$  相等,而静摩擦力  $F_2$  由指面与钵苗摩擦因数  $\mu$  以及秧夹对钵

苗夹持力  $N$  决定, 秧夹夹持钵苗的夹持力  $N$  由复位弹簧预紧力  $F_1$  提供, 因此, 通过设计复位弹簧预紧力  $F_1$ , 保证所对应的静摩擦力  $F_2$  大于等于上述平均拔秧力  $F_n$ , 即可实现拔起多穴钵苗。

设计复位弹簧预紧力  $F_1$  为 20 N, 根据上述秧夹结构参数, 力矩距离  $b = 2a$ , 计算秧苗夹持力  $N = 0.5F_1 = 10$  N。如果选取的秧夹指面材料与秧苗间的静摩擦因数  $\mu \geq 0.4$ , 由  $F = \mu N$  可知, 秧夹指面产生的静摩擦力  $F_2 \geq 4$  N, 大于上述参考的平均拔秧力  $F_n$ , 理论上可实现拔起多穴钵苗。

1 套夹秧机构需要 1 对拉伸弹簧产生预紧力, 所以, 设计单个弹簧产生 10 N 的力。弹簧弹性系数和弹簧初拉力为

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (1)$$

$$F_0 = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_0 \quad (2)$$

其中

$$\tau_0 = \frac{G}{1\ 000}$$

式中  $k$ ——弹簧弹性系数, N/mm  
 $G$ ——弹簧材料切变模量, MPa  
 $d$ ——弹簧丝直径, mm  
 $n$ ——弹簧有效圈数  
 $D$ ——弹簧中径, mm  
 $F_0$ ——弹簧初拉力, N  
 $\tau_0$ ——初切应力, MPa

根据机械设计手册中弹簧设计标准, 设计选用一种不锈钢带圆钩圆柱螺旋拉伸弹簧, 直径  $d$  为 1 mm, 中径  $D$  为 8 mm, 有效圈数  $n$  为 18, 由于不锈钢切变模量  $G = 71\ 000$  MPa, 由式(1)、(2)得:  $k = 0.96$  N/mm,  $F_0 = 3.48$  N。Pro/E 虚拟装配中, 秧夹闭合时, 调整弹簧安装块间距为 43 mm, 这时, 弹簧伸长量  $\Delta x = 7$  mm, 弹簧理论计算预紧力  $F_1 = F_0 + k\Delta x = 10.2$  N, 满足设计要求。

### 3.5 开夹电磁力设计

在 Pro/E 机构仿真模块下, 以上述零件虚拟装配及运动约束为基础, 进行夹秧机构开夹过程动力学仿真分析<sup>[20-21]</sup>。仿真环境设定包括: 传动零件的密度参数、弹簧模型及其参数、弹簧预紧力及其参数。在菜单编辑——质量属性下设置传动零件的密度参数, 在 2 个弹簧安装块上的 4 个弹簧安装端点上, 建立 4 个点对点的相向力模型来仿真秧夹闭合状态受到的弹簧预紧力; 同时, 在对应的 2 个弹簧安装块之间, 建立 2 个弹簧模型来仿真秧夹打开过程变化的弹簧拉力。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 夹秧机构仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of seedling clamp mechanism

参数属性	参数	数值
材料属性	秧夹密度 $\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 827 (不锈钢)
	L 型压杆密度 $\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700 (铝)
点对点力模型属性	力 $F/\text{N}$	10
弹簧模型属性	弹性系数 $k / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.96

仿真开启过程: 在滑动杆约束上设置沿电磁铁中心轴方向竖直向下的驱动力, 模拟电磁铁向下带动 L 型压杆打开秧夹, 力设为常数, 在 0 ~ 40 N 内, 以每次增加 1 N 的增幅进行仿真。

仿真闭合过程: 从上述秧夹完全开启状态开始仿真, 把沿电磁铁中心轴方向竖直向下的力设置为 0 N, 模拟电磁铁失电后的 L 型压杆对秧夹近似无作用力的状态。

每次仿真过程中, 观察秧夹开闭情况, 现象如下: 当力选取小于等于 30 N 时, 秧夹机构无法完全打开; 而当力选取大于 30 N 时, 秧夹短时间内 ( $t < 0.1$  s) 顺利完全打开, 即秧夹下边缘打开间距  $k = 30$  mm, 并且在驱动力设置为 0 N 后, 秧夹短时间内 ( $t < 0.1$  s) 顺利闭合。

上述仿真结果表明, 基于既定的夹秧机构结构参数, 30 N 是夹秧机构短时间内 ( $t < 0.1$  s) 顺利完全开启的临界电磁驱动力。

## 4 拔秧试验

### 4.1 试验材料

试验水稻品种为华航 31 号, 穴盘苗由华南农业大学工程学院自行研制的 2SJB-500 型播种流水线播种, 经过 30 d 温室培育获得, 每穴平均种量范围 1 ~ 4 粒, 秧苗平均高度为 150 mm 左右, 穴盘 I 和穴盘 II 各育苗 4 盘。

### 4.2 试验因素的选择与确定

#### 4.2.1 育秧穴盘类型

穴盘的选择主要是从实际机械抛秧作业生产中使用的穴盘中筛选, 分别选择第 1 节中所述的 2 种穴盘进行育秧。由于 2 种穴盘类型在每行穴数、穴孔行距以及穴孔体积上均有差异, 因此, 考察不同穴盘结构, 育秧后造成钵苗生长的差异对机械手拔秧效果的影响。

#### 4.2.2 钵土含水率

试验中划分 2 种钵土含水率 (湿基) 穴盘苗进行试验, 钵土含水率小于 30% 是指试验前把穴盘苗从温室搬回, 维持穴盘苗本身钵土含水率的情况; 钵土含水率大于 30% 是指试验前均匀喷洒一定量的

水,额外增加穴盘钵土含水率的情况。钵土含水率的测定是试验后随机选取多穴钵苗土,采用传统的干燥法测定。钵土含水率会影响钵土与穴盘之间的粘附力,而粘附力会影响到机械手的拔秧效果。

#### 4.2.3 秧夹弹簧拉伸力

秧夹弹簧拉伸力主要以秧夹复位弹簧预紧力理论设计值 20 N 为参考,分别选择秧夹弹簧拉伸力大于理论设计值的 22 N 以及小于理论设计值的 15 N 进行试验,秧夹弹簧拉伸力的测定是由测力计对所选用的一对类型相同但尺寸不同的弹簧,拉伸至复位弹簧安装尺寸时测定的。不同秧夹弹簧拉伸力对机械手夹持钵苗的夹持力有影响,进而影响其对钵苗的拔起效果。

#### 4.2.4 穴盘进给模式

试验中选择了人工进给穴盘以及自动进给穴盘 2 种模式进行对比试验。人工进给穴盘模式下,可以保证每一行钵苗均到达拔秧位,继而被机械手移栽,即理论进给行数与实际进给行数一样,而自动进给穴盘下,由于秧苗到位检测系统的检测误差,需要考虑漏检行对拔秧效果的影响。因此,考察不同进给模式对机械手拔秧效果的影响,同时检验自动进给系统的性能。

### 4.3 试验评价指标

机械手拔秧试验过程中,标记无苗、拔起苗、漏拔苗、拔断苗在穴盘中的位置,以便分析机械手夹拔钵苗的空间分布规律,同时,记录理论进给行数、无苗穴数、拔起穴数、误拔穴数、漏拔穴数和拔断穴数,其中,无苗穴数、拔起穴数、漏拔穴数、拔断穴数之和等于理论进给穴数。

- (1) 无苗:穴盘穴孔中生长秧苗株数 0 株。
- (2) 拔起:钵苗及其钵土同时从穴盘中脱离。
- (3) 误拔:秧夹拔起到位行钵苗时,误拔起相邻行钵苗。
- (4) 漏拔:钵苗和钵土均遗漏在穴盘中。
- (5) 拔断:钵苗茎秆被拔断,钵土遗留在穴盘中。

评价指标——拔秧成功率为

$$S_r = \frac{C_p - C_f}{C_r - C_n} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $S_r$ ——拔秧成功率, %

$C_p$ ——拔起穴数  $C_f$ ——误拔穴数

$C_r$ ——实际进给穴数

$C_n$ ——无苗穴数

### 4.4 试验方法

拔秧试验的目的是考察单一试验因素水平之间差异对评价指标增减变化的影响规律,以及比较不

同试验因素对评价指标影响的主次关系。

试验中采用 2 自由度夹子式机械手试验平台中的一套秧夹机构进行拔秧试验,1 盘穴盘苗以列为单位划分为左右对称的 2 个半盘,8 盘穴盘苗共分 16 个半盘,试验因素共 4 个,每个因素有 2 个水平,共 16 种水平组合,因此,1 个半盘对应 1 个水平组合,共 16 次试验。

### 4.5 拔秧试验结果

#### 4.5.1 试验因素对机械手拔秧效果的影响

根据 8 盘穴盘苗在 4 种试验因素不同水平下无苗、拔起苗、漏拔苗和拔断苗的试验情况,绘制的穴盘苗位置分布图如图 7 所示。

从图 7 可以看出,随着不同试验因素水平组合的变化,拔起苗在 16 个半盘中的分布状况是不一样的,说明对机械手拔秧效果的影响程度也是不一样的。

根据图 7 中拔起苗在不同因素水平下分布数量的多少(图中●)可以看出,相比之下,穴盘 I 的拔起苗要明显多于穴盘 II,钵土含水率大于 30% 的拔起苗要明显多于钵土含水率小于 30%,而对比秧夹弹簧拉伸力 22 N 和 15 N 以及人工进给穴盘和自动进给穴盘条件下拔起苗分布数量的差异发现,两者之间数量变化不明显,这说明了穴盘类型以及钵土含水率 2 个试验因素对机械手拔起秧苗效果的影响要大于其他 2 个试验因素秧夹弹簧拉伸力和穴盘进给模式。

从图 7 还可以发现,当钵土含水率小于 30% 时,不仅有相对较多的漏拔苗,而且还出现了少量的拔断苗,而穴盘 II 的拔断苗数量要多于穴盘 I,初步分析上述现象的原因是钵土含水率较小时,会增加钵土与塑料穴钵之间的粘附力,因此,拔起钵土含水率小于 30% 的钵苗所需的拔秧力就越大,当指面与钵苗间无法保持足够的静摩擦力来拔秧,静摩擦力也不超过钵苗茎秆所能承受的拔断力时,就会出现较多的漏拔苗。另一方面,穴盘 II 的穴孔体积比穴盘 I 大,钵土与塑料穴钵接触面积增大,增加了穴盘 II 钵土与塑料穴钵壁间的粘附力,所需的拔秧力更大,同时,由于相应的静摩擦力大于钵苗茎秆能承受拔断力,导致穴盘 II 出现了较多的拔断苗。

从图 7 中 16 个半盘漏拔苗的分布情况还可以发现,在穴盘中心侧的穴盘列上的大部分钵苗出现漏拔,试验中观察发现,其原因是秧夹上设计安装弹簧的位置偏低,秧夹侧面进入夹秧时,弹簧与钵苗茎叶发生干涉,导致靠近穴盘中心侧穴盘列的钵苗茎秆在其他列钵苗茎秆的挤出作用下,部分出现脱离了秧夹指面夹持范围的情况。针对上述问题,可以

通过适当增大复位弹簧安装点与秧夹指面中线的垂直距离,避免弹簧和钵苗茎秆的干涉来加以解决。

#### 4.5.2 试验因素对拔秧成功率的影响

试验数据及拔秧成功率的计算结果见表 2 和表 3。

从表 2、表 3 可知,无论是人工进给还是自动进给穴盘,在其他 2 个试验因素处于同一水平时,穴盘

I 的拔秧成功率比穴盘 II 高,原因是穴盘 I 营养土钵体积小,与秧盘粘附力小;钵土含水率小于 30% 比钵土含水率大于 30% 的拔秧成功率低,而当钵土含水率低于 20% 时,拔秧成功率下降到接近 0,主要是漏拔苗数量增加,原因是拔起秧苗所需拔秧力增大,拔起秧苗的难度增加。

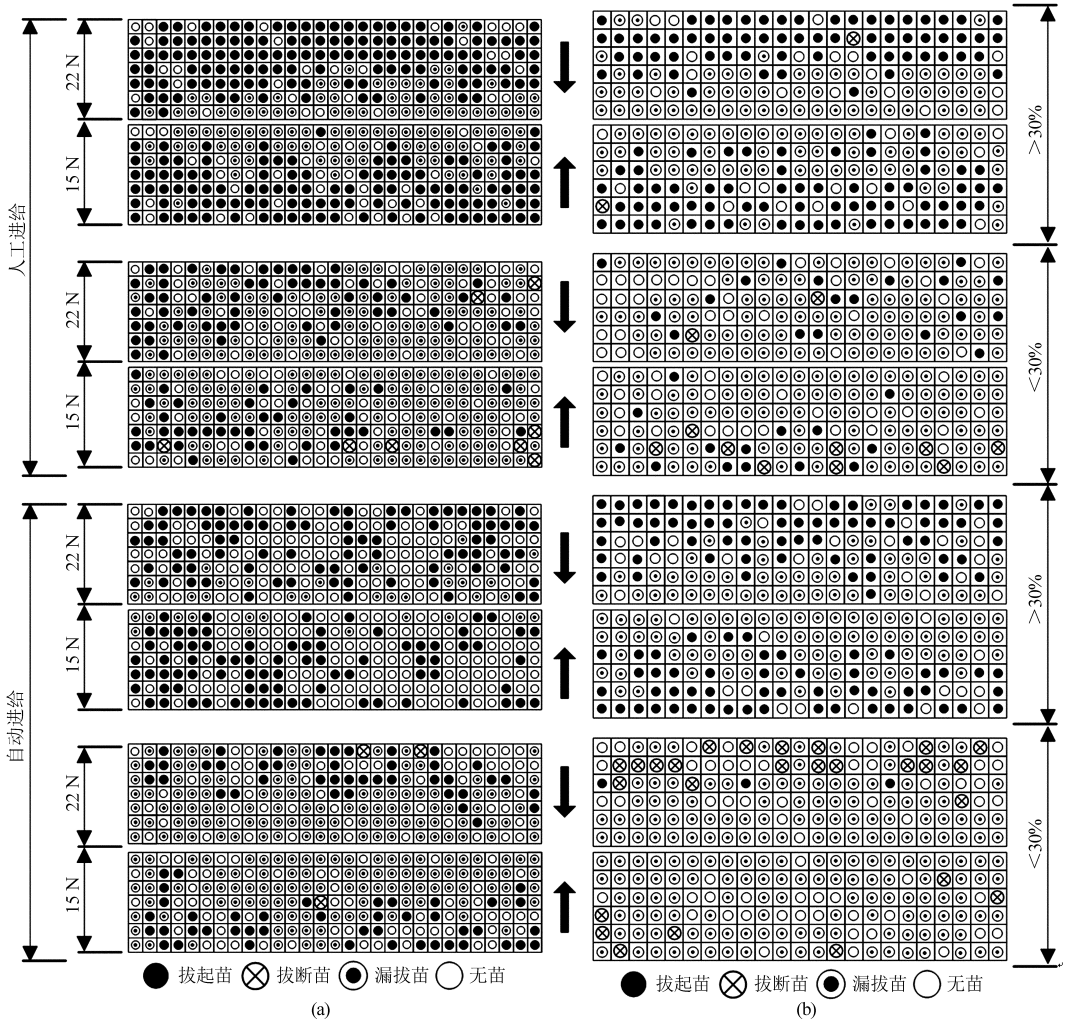


图 7 拔秧试验后钵苗位置分布状况

Fig. 7 Distribution of seedlings on surface of cell tray after experiment

(a) 穴盘 I (b) 穴盘 II

表 2 拔秧试验结果(人工进给)

Tab. 2 Experimental results of pulling potted-seedlings performance ( manual feeding)

试验序号	因素			秧苗夹拔情况						拔秧成功率/%
	穴盘类型	钵土含水率/%	秧夹弹簧拉伸力/N	理论进给数量/行	无苗数量/穴	拔起数量/穴	误拔数量/穴	拔断数量/穴	漏拔数量/穴	
1	I	> 30 (35.48)	22	29	30	126	9	0	47	67.63
2	I	> 30 (35.39)	15	29	34	109	21	0	60	52.07
3	I	< 30 (23.88)	22	29	51	56	3	2	94	34.87
4	I	< 30 (27.10)	15	29	46	39	10	6	112	18.47
5	II	> 30 (35.08)	22	23	17	64	1	1	56	52.07
6	II	> 30 (33.23)	15	23	14	65	6	1	58	47.58
7	II	< 30 (26.60)	22	23	29	18	1	2	88	16.51
8	II	< 30 (29.63)	15	23	23	14	1	9	92	11.30

表3 拔秧试验结果(自动进给)

Tab.3 Experimental results of pulling potted-seedlings performance (automatic feeding)

试验 序号	因素			秧苗夹拔情况						拔秧 成功率/%
	穴盘 类型	钵土含水率/ %	秧夹弹簧 拉伸力/N	理论进给 数量/行	无苗数量 /穴	拔起数量 /穴	误拔数量 /穴	拔断数量 /穴	漏拔数量 /穴	
9	I	>30 (35.06)	22	29	98	82	8	0	23	70.48
10	I	>30 (37.23)	15	29	108	82	6	0	13	80.00
11*	I	<30 (28.41)	22	29	54	41	5	2	106	24.16
12	I	<30 (28.16)	15	29	58	43	3	1	101	27.59
13	II	>30 (34.34)	22	23	23	65	17	0	50	41.74
14	II	>30 (34.84)	15	23	14	52	4	0	72	38.71
15	II	<30 (17.55)	22	23	33	3	0	19	83	2.86
16*	II	<30 (17.75)	15	23	26	0	0	7	105	0

注: \* 代表自动进给模式下秧苗到位检测系统出现遗漏检测钵苗行情况, 所遗漏钵苗行将无法被夹秧机构移栽, 同等条件下直接导致漏拔穴数的额外增加。

除了在表3中, 由于无苗穴数过多(108穴)以及遗漏检测钵苗行的干扰外, 当其他3个试验因素处于同一水平时, 秧夹弹簧拉伸力为22N的拔秧成功率均比15N高。

结合表2和表3可以看出, 当其他3个试验因素处于同一水平时, 穴盘进给模式差异对拔秧成功率的变化没有形成有规律的影响。

对表2和表3的试验结果进行多因素方差分析, 结果见表4。

表4 多因素方差分析结果

Tab.4 Analysis results of MANOVA

偏差来源	平方和	自由度	F	P
穴盘类型	1 691.266	1	24.777	<0.01**
钵土含水率	6 182.677	1	90.576	<0.01**
弹簧拉伸力	74.823	1	1.096	0.318-
进给模式	13.988	1	0.205	0.660-
误差	750.854	11		
总和	30 178.786	16		

注: \*\* 代表极显著差异, - 代表不显著。

方差结果显示, 穴盘类型和钵土含水率均对拔秧成功率差异极显著( $P < 0.01$ ), 穴盘进给模式和

秧夹弹簧拉伸力均对拔秧成功率差异不显著( $P > 0.05$ )。

从上述分析可以得出, 采用穴盘I育秧或提高钵土含水率达到大于30%均可提高夹子式机械手的拔秧成功率, 而安装在夹秧机构上的秧夹弹簧拉伸力在15N和22N间变动, 以及选用2种穴盘进给模式输送进给钵苗, 均不会对夹子式机械手拔秧成功率造成显著影响。

## 5 结论

(1) 试验表明, 所设计的2自由度夹子式机械手实现了在自动控制环境下适应夹拔不同类型穴盘育秧水稻钵苗的目标。

(2) 试验结果表明, 穴盘类型和钵土含水率对2自由度夹子式机械手的成功拔秧效果均有显著影响, 采用穴盘I育秧, 保持钵苗钵土含水率大于30%可以提高拔秧成功率。

(3) 方差结果表明, 穴盘进给模式和秧夹弹簧拉伸力(15、22N)对2自由度夹子式机械手成功拔秧效果的影响均不显著, 秧苗自动输送进给系统及夹秧机构上复位弹簧拉伸力的设计, 满足设计要求。

## 参 考 文 献

- 张洪程, 郭保卫, 陈厚存, 等. 水稻有序摆、抛栽的生理生态特征及超高产形成机制[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 463-475.  
Zhang Hongcheng, Guo Baowei, Chen Houcun, et al. Eco-physiological characteristics and super high yield formation mechanism of ordered transplanting and optimized broadcasting rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 463-475. (in Chinese)
- 罗锡文, 谢方平, 区颖刚, 等. 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, et al. Experimental investigation of different transplanting methods in paddy production [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 136-139. (in Chinese)
- 周海波, 马旭, 姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 301-306.  
Zhou Haibo, Ma Xu, Yao Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 301-306. (in Chinese)
- 张稳成, 唐湘如, 谢俊锋, 等. 不同机械种植方式对水稻产量的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(11): 4-6.  
Zhang Wencheng, Tang Xiangru, Xie Junfeng, et al. Effect of different mechanical planting mode on rice yield[J]. Guangdong



- Agricultural Sciences, 2013, 40(11): 4-6. (in Chinese)
- 5 韩长杰,杨宛章,张学军,等.穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(8):51-61.  
Han Changjie, Yang Wanzhang, Zhang Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 51-61. (in Chinese)
  - 6 李建桥,张国凤,陈建能,等.钵苗有序移栽机构的研究进展及应用展望[J].农机化研究,2008(2):1-5.  
Li Jianqiao, Zhang Guofeng, Chen Jianneng, et al. Developments and prospects of application of the ordered throwing mechanism for plotted rice-seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(2): 1-5. (in Chinese)
  - 7 Thomas E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4): 395-410.
  - 8 Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.
  - 9 向卫兵,罗锡文,王玉兴,等.气力有序抛秧气流场的有限元仿真分析与试验[J].农业工程学报,2004,20(1):44-47.  
Xiang Weibing, Luo Xiwen, Wang Yuxing, et al. Finite element simulation analyses and experiments on rice seedling ordered pneumatic throwing plantation[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 44-47. (in Chinese)
  - 10 俞高红,黄小艳,叶秉良,等.旋转式水稻钵苗移栽机构的机理分析与参数优化[J].农业工程学报,2013,29(3):16-22.  
Yu Gaohong, Huang Xiaoyan, Ye Bingliang, et al. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16-22. (in Chinese)
  - 11 张国凤,陈建能,李建桥,等.水稻钵苗有序抛秧机顶出机构的参数优化[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(2):101-105.  
Zhang Guofeng, Chen Jianneng, Li Jianqiao, et al. Parameter optimization of ejection mechanism of ordered transplanter for plotted rice-seedling[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2): 101-105. (in Chinese)
  - 12 王玉兴,罗锡文,唐艳芹,等.气力有序抛秧机输秧机构动态模拟研究[J].农业工程学报,2004,20(2):109-112.  
Wang Yuxing, Luo Xiwen, Tang Yanqin, et al. Dynamic simulation of the rice-seedling feeding mechanism of paddy seedling pneumatic throwing transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 109-112. (in Chinese)
  - 13 钱孟波,俞高红,蒋晨晓,等.非圆齿轮水稻钵苗抛秧机构运动机理与参数优化[J].农业机械学报,2014,45(6):64-69.  
Qian Mengbo, Yu Gaohong, Jiang Chenxiao, et al. Work principle and parameter optimization of rice-seedling transplanter with non-circular gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 64-69. (in Chinese)
  - 14 邵耀坚.水稻工厂化育秧拔苗机械手及仿生机理的研究[J].华南农业大学学报,2000,21(1):78-81.  
Shao Yaojian. Study on bionics and robot arm for gripping and throwing of factory-sprouted rice seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2000, 21(1): 78-81. (in Chinese)
  - 15 马瑞峻,区颖刚,邵耀坚.机械手式水稻有序行抛机构的设计[J].农业机械学报,2002,33(1):36-38.  
Ma Ruijun, Ou Yinggang, Shao Yaojian. Study on manipulator of a seedling throwing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 36-38. (in Chinese)
  - 16 马瑞峻,区颖刚,赵祚喜,等.水稻钵苗机械手取秧有序移栽机的改进[J].农业工程学报,2003,19(1):113-116.  
Ma Ruijun, Ou Yinggang, Zhao Zuoxi, et al. Development of the order throwing machine for rice seedlings sprouted in the cell-tray[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 113-116. (in Chinese)
  - 17 马瑞峻,区颖刚,赵祚喜,等.穴盘水稻秧苗拔断力学特性的试验研究[J].农业机械学报,2004,35(1):56-59.  
Ma Ruijun, Ou Yinggang, Zhao Zuoxi, et al. Experimental study on fracture mechanic characteristics of rice seedlings sprouted in plastic cell-tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 56-59. (in Chinese)
  - 18 马瑞峻,区颖刚,赵祚喜,等.穴盘水稻秧苗拔秧力试验研究[J].农业机械学报,2005,36(9):32-36.  
Ma Ruijun, Ou Yinggang, Zhao Zuoxi, et al. Experimental study on the force of pulling up the rice seedlings sprouted in the plastic cell-tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 32-36. (in Chinese)
  - 19 春郎,郎小飞,郎明飞.水稻钵苗育秧摆栽机专用秧盘:中国,200920099436.5[P].2010-03-03.  
Chun Lang, Lang Xiaofei, Lang Mingfei. Special seedling tray for rice bowl placed seedling planting machine: CN, 200920099436.5[P]. 2010-03-03. (in Chinese)
  - 20 李晶飞,张伟.基于Pro/E仿真技术的农业机械设计[J].农机化研究,2009(3):92-94.  
Li Jingfei, Zhang Wei. Design of agricultural machine based on Pro/E simulation technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(3): 92-94. (in Chinese)
  - 21 江敬强,谢进,陈永.一种仿生微扑翼机构的动力学分析和模拟[J].机械设计,2008,25(2):24-26.  
Jiang Jingqiang, Xie Jin, Chen Yong. Dynamic analysis and simulation of a bionic micro flapping wing mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(2): 24-26. (in Chinese)