

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.007

# 旋转式水稻钵苗移栽机构移栽臂设计与试验\*

叶秉良<sup>1,2</sup> 吴国环<sup>1,2</sup> 俞高红<sup>1,2</sup> 李丽<sup>1,2</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 旋转式水稻钵苗移栽机构移栽臂是移栽作业的执行部件, 控制取秧和推秧动作, 直接影响移栽机构取秧和推秧的成功率。针对原水稻钵苗移栽机构存在取秧时间长、成功率偏低, 无推秧装置、推秧效果差等主要问题, 对其移栽臂结构进行改进设计, 优化凸轮机构, 减小凸轮推程运动角, 增加推秧装置。建立机构虚拟样机, 研制机构物理样机, 开展机构虚拟运动仿真和高速摄像运动试验。比较虚拟仿真和高速摄像试验移栽机构夹取秧苗时间的缩短情况, 结果基本一致, 表明移栽臂的改进设计是正确和合理的。开展安装不同凸轮机构和有无推秧装置的移栽机构的取秧试验, 改进后的机构取秧成功率和推秧成功率分别为 94.3% 和 98.6%, 远高于改进前的 82.9% 和 88.6%, 表明改进后的机构能够更好地满足水稻钵苗移栽工作要求, 且具有很好的工作性能。

**关键词:** 水稻钵苗移栽机 移栽臂 推秧装置 设计 试验

**中图分类号:** S223.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0045-08

## Design and Test on Transplanting Arm of Rotary Transplanting Mechanism for Rice Pot-seedling

Ye Bingliang<sup>1,2</sup> Wu Guohuan<sup>1,2</sup> Yu Gaohong<sup>1,2</sup> Li Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The planting arm of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling is the operation component which is used for seedling picking-up. The motion of seedling control and pushing will affect the success rate of seedling picking-up and seedling pushing directly. Aiming to solve the problems such as the long time of seedling picking-up, low success rate, no pushing device and poor pushing seedlings of the original pot-seedling transplanting mechanism, the transplanting mechanism was redesigned. The main work is to redesign cam mechanism in transplanting arms using optimization design method, decrease cam-drive angle and add the seedling pushing device. With the development of virtual prototype and physical prototype, the virtual kinematics simulation and the kinematics test with high-speed digital video camera and image processing technology were carried out. The basic consistency of the shortening time in two test was demonstrated which showed the feasibility and availability of the developed design of planting arms. The seedling picking-up tests of transplanting mechanism with different cam mechanisms as well as the transplanting mechanisms with and without seedling pushing device were developed. The success rate of seedling picking-up and seedling pushing of the developed mechanism were 94.3% and 98.6%, which were 82.9% and 88.6% higher than those of the product by original pot-seedling transplanting mechanism, respectively. It was proved that the improved mechanism can meet the requirements of rice pot-seedling transplanting.

**Key words:** Transplanting mechanism for rice pot-seedling Transplanting arm Seedling pushing device Design Test

收稿日期: 2015-01-26 修回日期: 2015-03-25

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A501)、国家自然科学基金资助项目(51275478)、浙江省自然科学基金资助项目(LR12E05002)、浙江理工大学“521人才培养计划”资助项目和浙江理工大学科研创新团队专项资助项目

作者简介: 叶秉良, 教授, 博士, 主要从事农业机械设计和机构数值分析与综合研究, E-mail: zist\_ybl@zstu.edu.cn

通讯作者: 俞高红, 教授, 博士生导师, 主要从事农业种植机械设计机构学研究, E-mail: yugh@zstu.edu.cn

## 引言

水稻钵苗移栽技术由于按钵体独立取苗栽植,具有不伤根、无缓苗期、增产明显等优点,日益受到广大水稻种植户的青睐<sup>[1]</sup>。因此,决定水稻钵苗移栽机作业质量的核心部件——移栽机构成为国内外学者研究的热点<sup>[2-9]</sup>。俞高红等<sup>[10-11]</sup>针对国外移栽机构不太适合中国国情、多杆式移栽机构的移栽效率低(仅为单行80株/min左右)等问题,提出了一种椭圆齿轮-不完全非圆齿轮行星轮系旋转式移栽机构,开展了机构运动学与分析、人机交互参数优化和试验等研究工作<sup>[12]</sup>。该机构移栽效率可高达200株/(行·min),且运转平稳,但是其取秧成功率偏低,仅为82.9%,而且推秧效果也不佳。通过机构取秧试验,发现影响取秧成功率和推秧效果的两个主要问题是:在取秧过程中,机构夹秧慢造成夹秧准确率较低,进而影响取秧成功率;在推秧过程中,由于无推秧装置,推秧爪推不到土钵,造成推秧效果差且钵苗入土速度低,影响栽植效果。在旋转式移栽机构中,移栽臂是控制机构取秧和推秧动作的关键部件。目前水稻钵苗移栽机的移栽臂凸轮机构都采用图解法设计,虽然直观形象、设计简单,但机构运动精度较低。因此,本文为解决此问题,拟改进移栽臂的结构,对移栽臂的凸轮机构进行优化设计<sup>[13]</sup>,减小凸轮推程运动角以缩短取秧时间,增加推秧装置以改善推秧效果。通过开展机构运动仿真和试验,验证改进设计的正确性和合理性,并进行机构取秧试验,以证明改进设计后的机构具有更好的工作性能。

## 1 水稻钵苗移栽机构工作原理

椭圆-不完全非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构由齿轮传动机构和移栽臂两部分组成,图1a为水稻钵苗移栽机构运动简图。图中 $O$ 为不完全非圆齿轮的转动中心; $O_1$ 、 $O_2$ 为中间椭圆齿轮的转动中心; $B_1$ 、 $B_2$ 为行星椭圆齿轮的转动中心。移栽臂上的秧针形成满足水稻钵苗移栽要求的工作轨迹 $ABCDEF$ ( $AB$ 为夹秧段、 $BCD$ 为持秧段、 $DE$ 为推秧段、 $EFA$ 为空行程段),并满足秧苗的运动姿态要求。

**AB段轨迹:**秧针从 $A$ 点开始慢慢收紧,等快到 $B$ 点时迅速收紧直至 $B$ 点完全夹紧秧苗,完成夹秧动作。此段要求秧针不碰到钵苗盘,并从秧苗的下方夹紧秧苗的茎秆且秧针的上端不能碰到秧苗的叶子,此外秧针夹紧时留有1mm间隙以防夹伤茎秆。

**BCD段轨迹:**此段为移栽臂持秧阶段。此段要求移栽臂所持的秧苗不能碰到未取的秧苗以及放钵苗盘的秧箱。

**DE段轨迹:**移栽臂到达 $E$ 点时,推秧爪在弹簧作用下迅速将秧苗推入水稻田中,完成推秧动作。

**EFA段轨迹:**此段为移栽臂空运行段,主要是为下次取秧做准备。

移栽臂的机构简图如图1b所示,凸轮与齿轮箱体通过螺钉固定,拨叉轴与移栽臂壳体固定,拨叉与拨叉轴间隙配合;凸轮随齿轮箱(行星架)做匀速运动,而移栽臂通过行星轴做非匀速间歇运动。凸轮带动拨叉绕拨叉轴转动,从而带动推秧杆沿着壳体方向往复运动,实现秧针开、合。当凸轮压着拨叉时,推秧杆往复运动,秧针闭合,实现取秧动作;当凸

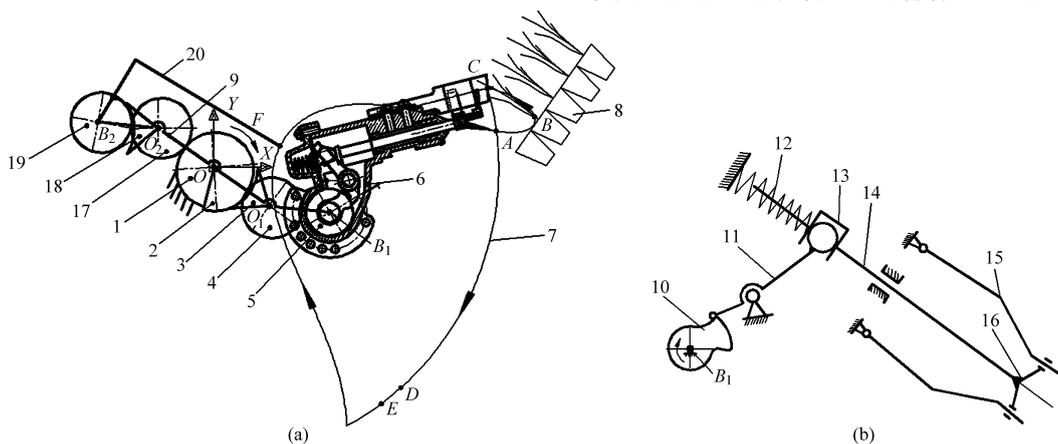


图1 椭圆-不完全非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构简图

Fig. 1 Diagram of rice pot-seedling transplanting mechanism of planetary gear train with elliptical gears and incomplete non-circular gear

(a) 水稻钵苗移栽机构运动简图 (b) 移栽臂结构简图

1. 不完全非圆齿轮 2. 凸锁止弧 3、18. 凹锁止弧 4、17. 中间椭圆齿轮 5、19. 行星椭圆齿轮 6、20. 移栽臂 7. 移栽轨迹  
8. 钵苗盘 9. 行星架 10. 凸轮 11. 拨叉 12. 弹簧 13. 滑块 14. 推秧杆 15. 秧针 16. 推秧爪

轮与拨叉脱离接触时,在弹簧的作用下,推秧杆往下运动,秧针张开,同时推秧杆快速将秧苗根部的土钵推出,实现推秧动作。

## 2 移栽臂改进设计

### 2.1 凸轮结构优化设计

通过分析水稻钵苗取秧试验结果发现,由于取秧速度过慢,在取秧阶段秧针收拢很慢,只能夹取正中间的秧苗,使夹取秧苗的概率降低(钵苗的秧苗由于播种技术的原因不一定长在穴中间,可能长偏),进而影响取秧成功率。而在移栽机构中,移栽臂中的凸轮机构是决定成功率的核心机构。凸轮推程段的轮廓曲线直接影响取秧速度以及取秧时间。因此,为缩短取秧时秧针夹紧秧苗的时间,关键是对凸轮机构进行优化设计,减小其推程运动角。在理论设计时,把凸轮与拨叉杆的接触设定为滚子接触,在实际制造时,根据经验将滚子与拨叉杆制为一体。

#### 2.1.1 凸轮机构优化设计模型的建立

凸轮机构优化设计的目的是减小其推程运动角,因此,将凸轮推程运动角  $\Phi$  选为设计变量,优化目标确定为  $\min(\Phi)$ 。

根据水稻钵苗移栽对凸轮机构提出的运动要求,考虑凸轮不能失真、压力角限制和制造工艺等因素,提出以下约束条件:

(1)为了保证移栽臂顺利完成推秧,在凸轮机构优化中,凸轮回程运动角与近休止运动角之和保持不变,则推程运动角与远休止运动角之和也应保持不变。由于椭圆-不完全非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽臂凸轮机构原设计方案各阶段对应的凸轮转角为:推程运动角  $60^\circ$ ,远休止运动角  $38^\circ$ ,回程运动角  $70^\circ$ ,近休止运动角  $202^\circ$ 。故得到

$$\Phi + \Phi_s = 98^\circ \quad (1)$$

式中  $\Phi$ ——凸轮推程运动角

$\Phi_s$ ——凸轮远休止运动角

(2)凸轮机构压力角会影响机构的传力性能,太大甚至会造成机构自锁,因此要求压力角不能超过许用值<sup>[12]</sup>,即

$$\alpha \leq [\alpha] \quad (2)$$

其中  $\tan\alpha = \frac{L_{AK} \cos(\psi_0 + \psi) - L_{AJ} \left(1 - \frac{d\psi}{d\varphi}\right)}{L_{AK} \sin(\psi_0 + \psi)} \quad (3)$

$$\psi_0 = \arccos \frac{L_{AK}^2 + L_{AJ}^2 - r_0^2}{2L_{AK}L_{AJ}} \quad (4)$$

式中  $\alpha$ ——凸轮机构推程压力角

$[\alpha]$ ——凸轮机构推程许用压力角,摆动从动件凸轮机构一般不超过  $50^\circ$

$\varphi$ ——推程段凸轮转角

$\psi$ ——拨叉摆角

$\psi_0$ ——拨叉摆角初始角(初始位置为凸轮推程起始点)

$r_0$ ——凸轮基圆半径

移栽臂结构如图2所示,已知的结构参数见表1。

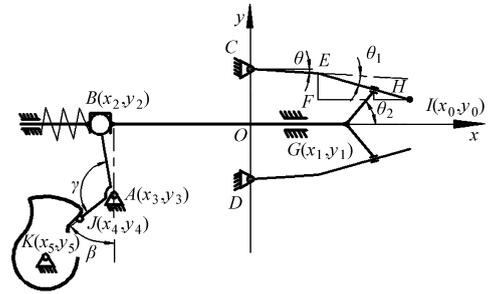


图2 移栽臂结构简图

Fig. 2 Diagram of transplanting arm structure

表1 移栽臂各结构参数

Tab. 1 Structural parameters of transplanting arm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$L_{CE}/\text{mm}$	42.7	$L_{BA}/\text{mm}$	28	$x_5/\text{mm}$	-63
$L_{EI}/\text{mm}$	26	$L_{AJ}/\text{mm}$	15.3	$y_5/\text{mm}$	-42
$L_{HG}/\text{mm}$	10	$L_{AK}/\text{mm}$	28.3	$\theta_1/(\circ)$	23.8
$L_{OC}/\text{mm}$	17.8	$x_3/\text{mm}$	-43	$\theta_2/(\circ)$	90
$L_{BG}/\text{mm}$	95	$y_3/\text{mm}$	-22	$\gamma/(\circ)$	72

图2中, $I(x_0, y_0)$ 为秧针尖点; $G(x_1, y_1)$ 为推秧爪与推秧杆连接点; $B(x_2, y_2)$ 为滑块中心; $A(x_3, y_3)$ 为拨叉摆动中心; $J(x_4, y_4)$ 为滚子转动中心; $K(x_5, y_5)$ 为凸轮转动中心; $\theta$ 为秧针  $CE$  段与  $x$  方向夹角, ( $^\circ$ );  $\theta_1$ 为秧针  $EI$  段与  $x$  方向夹角, ( $^\circ$ );  $\theta_2$ 为推秧爪与  $x$  水平方向夹角, ( $^\circ$ );  $\beta$ 为拨叉  $AJ$  段与  $y$  方向夹角, ( $^\circ$ );  $\gamma$ 为拨叉拐角, ( $^\circ$ )。

(3)考虑凸轮制造工艺、凸轮机构运动不失真和强度等要求<sup>[14]</sup>,可得到

$$0.1r_0 \leq r_r \leq 0.5r_0 \quad (5)$$

$$\rho_{\min} > r_r \quad (6)$$

$$\rho > \rho_{\min} \quad (7)$$

式中  $\rho$ ——凸轮理论廓线的曲率半径

$\rho_{\min}$ ——凸轮理论廓线最小曲率半径

$r_r$ ——滚子半径

#### 2.1.2 凸轮机构基本参数的确定

待确定的凸轮机构基本参数包括凸轮基圆半径  $r_0$ 、拨叉最大摆角  $\psi_m$  和滚子半径  $r_r$ 。

为避免取秧作业过程中移栽臂的秧针碰到秧苗的叶子,且便于快速夹紧秧苗,确定两秧针之间的最大距离为 22 mm;在取秧时需夹住秧苗的茎部且尽

量不伤着秧苗的茎部,确定秧针夹紧时两秧针之间的最小距离为1 mm。因此,可得到两秧针间距离最大、最小时,对应 $y_0$ 值分别为 $y_{0\max} = 11$  mm、 $y_{0\min} = 0.5$  mm。图2中各坐标未知点的坐标值均可根据几何关系计算得到<sup>[15]</sup>,本文不再赘述。

根据图2所示移栽臂结构可知,在移栽臂的两秧针间距离最大和最小时,根据几何关系可计算得到滚子转动中心 $J(x_4, y_4)$ 和凸轮转动中心 $K(x_5, y_5)$ 之间的距离 $R_1$ 和 $R_2$ ,两者较小值即为凸轮基圆半径 $r_0$ ;同时可计算得到 $AJ$ 与过 $A$ 点的垂线之间的夹角 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ ,两者之差即为拨叉最大摆角 $\psi_m$ 。即

$$r_0 = \min(R_1, R_2) \quad (8)$$

$$\beta_1 - \beta_2 = \psi_m \quad (9)$$

$$\beta = \arctan \frac{|x_4 - x_3|}{|y_4 - y_3|} \quad (10)$$

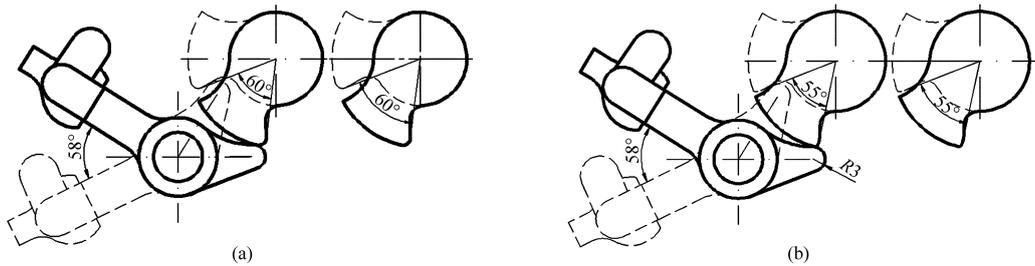


图3 优化前后推程运动角的比较

Fig. 3 Comparison of push-away movement angle before and after optimization

(a) 优化前 (b) 优化后

为避免因凸轮机构的加速度突变而产生冲击,从动件运动规律选用五次多项式。

利用 Matlab 编程绘制出凸轮机构推程压力角曲线,如图4所示。从图4可知,优化后凸轮机构推程的最大压力角为 $49^\circ$ ,满足许用压力角要求。此外,凸轮实际廓线最小曲率半径为0.5 mm,凸轮机构运动不会失真。

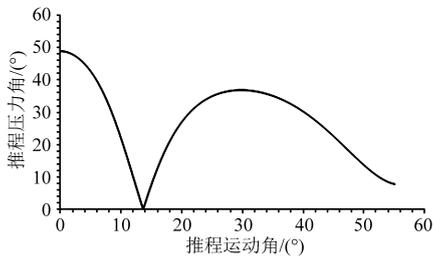


图4 推程压力角曲线

Fig. 4 Pressure angle curve of push-away movement

## 2.2 推秧装置设计

移栽臂结构改进前的水稻钵苗移栽机构由于没有推秧装置,造成夹紧的秧苗不能很好地脱离秧针,连带在秧针上并随之进入下次取秧。秧苗连带不仅影响秧苗的推秧效果,使其无法被植入田中,而且还

通过计算得到凸轮的基圆半径 $r_0 = 15.3$  mm,拨叉最大摆角 $\psi_m = 58^\circ$ 。进而根据约束条件(3)确定滚子半径 $r_r = 3$  mm,即在实际制造中,拨叉杆与凸轮接触的前端圆角半径为3 mm。

### 2.1.3 凸轮机构优化结果与分析

优化前凸轮机构的推程运动角为 $60^\circ$ 。通过 Matlab 编程优化,凸轮推程运动角从 $60^\circ$ 开始依次减小 $0.5^\circ$ ,在凸轮推程运动角减小到 $55^\circ$ 之前,凸轮推程压力角都在许用压力角范围内。若继续减小则推程压力角出现局部偏大,不能满足压力角的约束条件。此外,当推程运动角为 $55^\circ$ 时,此段凸轮实际廓线的最小曲率半径为0.5 mm,推程运动角继续减小的同时,此段的最小曲率半径会越来越小。因此,得到优化后的推程运动角为 $55^\circ$ 。该值比优化前减小了 $5^\circ$ (图3),表明优化设计后有效减小了凸轮推程运动角,缩短了取秧时间。

影响到下一次取秧作业,降低移栽成功率。为解决这一问题,需在原来的移栽臂上增加推秧装置。

图5为推秧爪与秧针的作用图,左右秧针对称,秧针是由厚度为8 mm的弹性大、强度高的弹簧片制成,秧针一端固联在定位板的两侧(定位板固定在移栽臂壳体的外部),秧针另一端位于推秧装置的内侧。推秧爪的中心距离为27 mm,通过推秧爪的前后移动,挤压秧针使其绕固定点做小幅度弹性变形,控制秧针的闭合、张开。故通过推秧爪与秧针的配合,实现移栽臂取秧、推秧动作。图5a为推秧后秧针与推秧爪的相对位置(也为取秧前秧针与推秧爪的相对位置),取秧前,秧针初始张开距离为22 mm,取秧开始时,推秧爪向内移动,左右秧针分别绕固定点向内旋转收拢到取秧结束,两秧针夹紧秧苗,此时左右秧针只有1 mm的夹秧距离,如图5b所示;当移栽臂到达推秧点时,推秧杆推动推秧爪向外移动,左右秧针分别绕固定点向两侧旋转远离,与此同时推秧爪前端推块推动秧苗的土钵,完成推秧动作,推秧爪与秧针又回到图5a所示的位置。

推秧装置设计方案如图6所示。图6a所示方

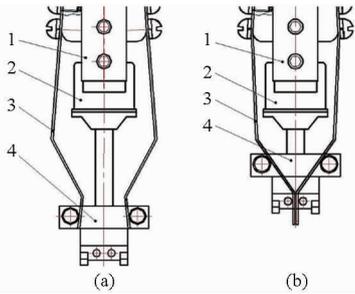


图 5 推秧装置与秧针作用图

Fig. 5 Interaction between seedling pushing device and seedling needle

(a) 秧针张开 (b) 秧针闭合

1. 定位板 2. 移栽臂壳体 3. 秧针 4. 推秧装置

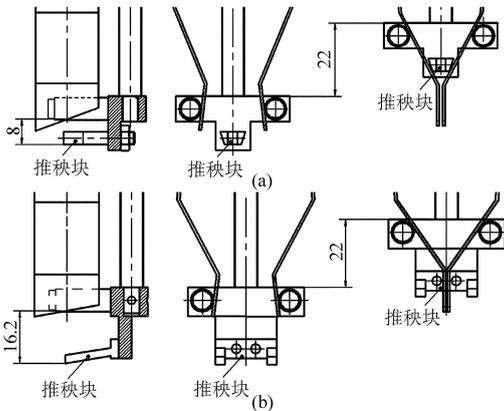


图 6 推秧装置设计方案图

Fig. 6 Design proposal of seedling pushing device

(a) 方案 1 (b) 方案 2

案 1 为秧针夹紧时推秧爪前端的推块收到秧针内部,其结构较为紧凑,但是推秧行程太短,只有 8 mm 左右,若秧针夹紧的是秧茎上部,推秧块离土钵太远无法推到土钵,达不到预期的推秧效果。采用图 6b 所示的方案 2 可以解决这个问题,推秧块在秧针的外部,秧针收拢过程中在不与秧针干涉的前提下,推秧的行程可以达到 16.2 mm 左右,不管秧针夹紧秧苗的位置是秧针的上部还是下部都可以推到秧苗的土钵。此外,钵盘具有一定的倾斜度,为了给秧苗的土钵倾斜面的垂直方向的力,推秧爪前边的推块部分向前倾斜 10°,使秧苗沿推秧角方向扎进秧田中,从而不易倾倒。推秧爪的两侧利用套筒滚子实现推秧爪与秧针间的相对滚动,变滑动摩擦为滚动摩擦,可以减小推秧爪与秧针的摩擦阻力和磨损。因此,本文机构物理样机的推秧装置采用方案 2。推秧爪与秧针配合控制秧针闭合、张开的三维实体图如图 7 所示。

### 3 机构运动仿真

为了验证优化设计后的移栽机构夹取秧苗时间的减小情况,建立机构虚拟样机(图 8)进行虚拟仿

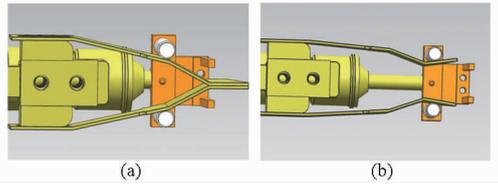


图 7 推秧装置

Fig. 7 Seedling pushing device

(a) 秧针闭合 (b) 秧针张开

真试验<sup>[15]</sup>。虚拟仿真模拟水稻钵苗移栽机构的相对运动过程时,建立机构的虚拟工况,将机架与地面固定,行星架在电动机的带动下以 100 r/min 的转速顺时针转动,得到机构在转动 1 周过程中,推秧爪上标记点与移栽臂壳体上标记点(具体位置如图 9 所示)的相对位移变化曲线,优化后与优化前的仿真结果如图 10 所示。

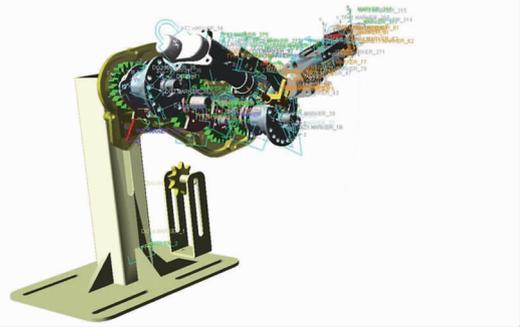


图 8 虚拟样机

Fig. 8 Virtual prototype

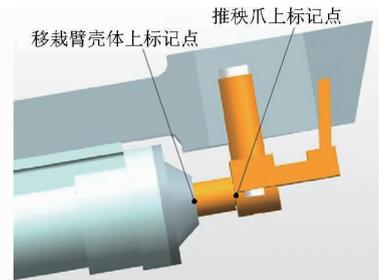


图 9 虚拟仿真测量标记点

Fig. 9 Measuring marks of virtual simulation

从图 10 对比得知,仿真分析中,移栽机构优化前,取秧过程行星架转角为 31.8°;优化后,取秧过程行星架转过的角度为 26.9°。由此可知,移栽机构采用优化设计后的凸轮机构,取秧时间可比采用优化前有效缩短了 15.4%。

## 4 机构高速摄像试验和取秧试验

### 4.1 机构高速摄像试验

研制出移栽机构物理样机,将其安装在自主设计的水稻钵苗移栽试验台上进行高速摄像运动学试验。高速摄影仪及其设备主要包括日本 Keyence 公司的 VW - 6000/5000 动态分析三维显微系统和

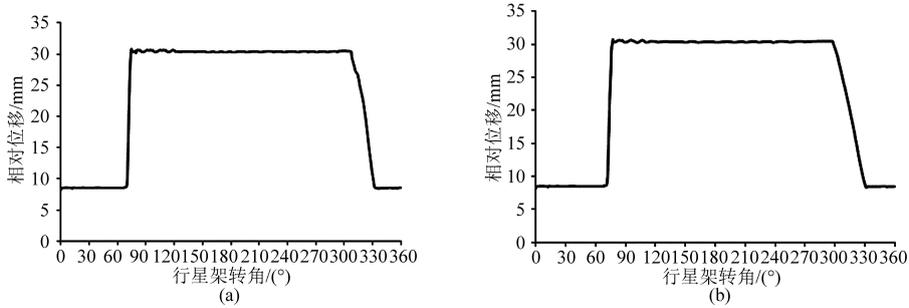


图10 推秧爪上标记点与移栽臂壳体上标记点的相对位移变化曲线

Fig. 10 Relative displacement curves of marks on seedling pushing rod and transplanting arm shell

(a) 优化后 (b) 优化前

Blaster's MAS 图像分析软件,高速摄像试验现场如图 11 所示。试验时,先调整摄像头支座位置以摄像头正对移栽机构侧面为宜,微调摄像头至控制台屏幕上清晰显示移栽机构,设置拍摄帧数为 250 帧/s,利用高速摄影仪及其配套设备对高速运转的移栽机构进行视频录制,将录制好的视频导入 Blaster's MAS 图像分析软件中,利用图像分析软件获取移栽机构旋转 1 周高速摄影仪捕捉的画面,从中挑选出最接近开始取秧的位置点和夹紧秧苗位置点的图像,利用图像分析软件分别在开始取秧位置、夹紧秧苗位置时秧针上沿秧针方向画 2 个点连线,测得连线与水平的夹角即为开始取秧位置角、夹紧秧苗位置角。分析移栽机构一个工作周期的运动过程,比较凸轮机构优化前后虚拟仿真和高速摄像试验中机构取秧时间的变化情况。高速摄像试验与仿真分析得到取秧过程所对应的行星架转角见表 2。

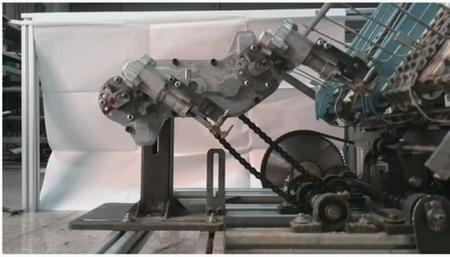


图 11 高速摄像试验现场

Fig. 11 High-speed digital video camera and image processing test

表 2 取秧过程行星架转角

Tab. 2 Comparison of rotary angles of planetary carrier during seedling picking-up process (°)

位置	优化前 仿真结果	优化后 仿真结果	优化后高速 摄影结果
开始取秧	298.0	308.5	309.2
夹紧秧苗	329.8	335.4	335.8

从表 2 得知,仿真分析中,凸轮机构优化前,行星架从初始位置顺时针转动 298.0°后移栽臂开始取秧,转到 329.8°时夹紧秧苗,取秧过程行星架转

角为 31.8°;优化后,取秧过程行星架转过的角度为 26.9°,取秧时间比优化前的缩短了 15.4%。高速摄影试验中,取秧过程行星架转过的角度为 26.6°,取秧时间比优化前缩短了 16.4%。高速摄影试验结果与仿真结果基本吻合,由于移栽臂凸轮机构是决定取秧时间的关键机构,故试验表明移栽机构采用优化设计后的凸轮机构可提高取秧成功率,同时在高速摄像过程中可知,移栽臂取苗动作连贯正常证明凸轮实际运动不存在运动失真。

#### 4.2 机构取秧试验

选用平均茎秆高度为 15 cm 左右,每穴中平均有 3 或 4 株秧苗的水稻钵苗,且秧苗根部土壤湿度适宜,进行 2 次试验,试验 1 移栽机构转速为 100 r/min,取秧效率 200 株/min;试验 2 移栽机构转速为 60 r/min,取秧效率 120 株/min(转速较低便于记录成功推秧的株数)。

试验 1:移栽机构安装不同的凸轮机构。

试验目的是通过对比安装优化前后不同凸轮机构的移栽机构的取秧成功率,验证凸轮机构优化设计是有效的。图 12 为移栽机构开始取秧时的截图。

将均安装了推秧装置的移栽机构安装在试验台上,其中一侧的移栽臂安装了优化后的凸轮机构(并在此移栽臂上标上红色标记),而另一侧移栽臂则安装了优化前的凸轮机构。调整好移栽机构相对于试验台的送秧机构的相位,对移栽机构进行调试,待其自行运转正常后,记录起点为某行钵苗的第 1 株(并记录第 1 株取秧的是否为带有红色标记点的移栽臂),连续取秧 10 行,分别记录 2 套移栽机构成功取秧的数目,计算出取秧成功率。

试验 2:移栽机构安装和不安装推秧装置。

试验目的是验证移栽臂增加推秧装置后的推秧效果及推秧成功率。图 13 为移栽机推秧时的截图。

机构移栽臂如图 14 所示,均安装了优化后的凸轮机构。

首先将有推秧装置移栽机构安装在自动送秧试



图 12 取秧试验

Fig. 12 Seedling picking-up test



图 13 推秧试验

Fig. 13 Seedling pushing test



图 14 试验装置

Fig. 14 Transplanting arm of test

(a) 有推秧装置 (b) 无推秧装置

验台上,调整好移栽机构相对于试验台送秧机构的相位,使移栽臂的取秧动作与送秧机构的移动与配合一致。对移栽机构进行调试,待自行运转正常后进行取秧试验,每行 14 株秧苗,取 10 行,记录成功推秧(秧苗不回带)的数目。取下有推秧装置移栽机构,装上无推秧装置移栽机构,调试完成后同样取 140 株秧苗,记录成功推秧(秧苗不回带)的数目。同时用摄像机记录 2 次试验秧苗推秧情况。

在试验 1 中,安装了优化后凸轮机构的移栽臂夹取钵盘中奇数钵穴上的秧苗,而安装了优化前凸轮机构的移栽臂则夹取钵盘中偶数钵穴上的秧苗,试验 1 结果见表 3。对比可知,装有优化后的凸轮机构的移栽臂机构的取秧成功率达到 94.3%,远高

于装有优化前的 82.9% 的成功率,表明凸轮机构的优化设计是有效的。

试验 2 结果见表 4。对比可知,有推秧装置移栽机构推秧成功率为 98.6%,远高于无推秧装置移栽机构的 88.6%,表明移栽机构在增加推秧装置后,推秧效果得到明显改善。

从上述分析可知,移栽臂改进设计是合理和有效的,能够显著提高取秧和推秧的成功率。

表 3 取秧试验 1 结果

Tab. 3 Result of test 1

移栽机构	取秧总数/ 株	未取出的 秧苗数/株	取秧成功 率/%
改进后	70	4	94.3
改进前	70	12	82.9

表 4 取秧试验 2 结果

Tab. 4 Result of test 2

移栽机构	取秧总数/ 株	成功推秧数/ 株	推秧成功率/ %
改进后	140	138	98.6
改进前	140	124	88.6

## 5 结论

(1) 根据水稻钵苗移栽机构的工作要求,对其移栽臂进行了改进设计。对移栽臂的凸轮机构进行了优化设计,使凸轮机构在具有较好传力性能的前提下,不仅能够很好地满足取秧工作要求,也使推程运动角减小了  $5^\circ$ 。机构仿真分析和高速摄像试验结果表明安装优化设计后凸轮机构的移栽机构,其取秧时间分别缩短 15.4% 和 16.4%,有利于提高机构的取秧成功率。设计增加移栽臂上的推秧装置,改善了机构的推秧效果。

(2) 开展装有不同凸轮机构和有无推秧装置的移栽机构取秧试验。从机构取秧试验可知,安装了优化后凸轮机构的移栽机构的取秧成功率从 82.9% 提高到 94.3%,有推秧装置的移栽机构推秧成功率从原来的 88.6% 提高到 98.6%。表明移栽臂进行改进设计后,移栽机构的工作性能得到明显提升。

## 参 考 文 献

- 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2014,45(8):44-53.  
Yu Xiaoxu, Zhao Jun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):44-53. (in Chinese)
- 伊藤尚胜,清水修一,和田俊郎,等. 移植机;日本,ZL99118740.7[P]. 2000-05-03.
- 赵雄,陈建能,王英,等. 水稻钵苗“D形”静轨迹移栽机构逆向设计与分析[J]. 农业工程学报,2012,28(8):92-97.  
Zhao Xiong, Chen Jianneng, Wang Ying, et al. Reverse design and analysis of rice seedling transplanter with D-shape static

- trajectory[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 92-97. (in Chinese)
- 4 徐洪广,赵匀,张允慧,等.水稻钵苗移栽机变性卵形齿轮分秧机构的运动机理分析[J].农业工程学报,2012,28(7):9-15.  
Xu Hongguang, Zhao Yun, Zhang Yunhui, et al. Analysis on kinematic principle for seedling-picking machinery of rice transplanter with deformed oval gears[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 9-15. (in Chinese)
- 5 原新斌,张国凤,陈建能,等.顶出式水稻钵苗有序移栽机的研究[J].浙江理工大学学报,2011,45(5):749-752.  
Yuan Xinbin, Zhang Guofeng, Chen Jianneng, et al. Development on rice plotted-seeding sequential transplanter of ejection type [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 45(5):749-752. (in Chinese)
- 6 陈恒高,田金和,宋来田.机械手式水稻抛秧机的研究[J].农业机械学报,1998,29(3):48-52.  
Chen Henggao, Tian Jinhe, Song Laitian. Study on riceseedling throwing transplanter of manipulator type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 48-52. (in Chinese)
- 7 杨坚,阳潮声,陈兆耀,等.2ZB-8电磁振动式小型水稻钵苗移栽机的研究[J].农业工程学报,2002,18(6):84-87.  
Yang Jian, Yang Chaosheng, Chen Zhaoyao, et al. Study on 2ZB-8 electromagnetic vibration minitype rice seedling transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 84-87. (in Chinese)
- 8 陈旭暄,宋建农,刘建军,等.水稻钵苗输秧拔秧机构参数优化[J].中国农业大学学报,2005,10(2):19-21.  
Chen Xuxuan, Song Jiannong, Liu Jianjun, et al. Parametric optimization of transporting and evulsing mechanism of potted rice seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(2): 19-21. (in Chinese)
- 9 Guo L S, Zhang W J. Kinematic analysis of a rice transplanting mechanism with eccentric planetary gear trains [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001,36(11/12): 1175-1188.
- 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 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)
- 12 俞亚新,骆春晓,俞高红,等.椭圆-不完全非圆齿轮行星轮系取苗机构参数优化[J].农业机械学报,2013,44(6):62-68.  
Yu Yaxin, Luo Chunxiao, Yu Gaohong, et al. Parameters optimization of pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6):62-68. (in Chinese)
- 13 叶秉良,李丽,俞高红,等.蔬菜钵苗移栽机取苗臂凸轮机构的设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(8):21-29.  
Ye Bingliang, Li Li, Yu Gaohong, et al. Design and test on cam mechanism of seedling pick-up arm applied in vegetable seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(8): 21-29. (in Chinese)
- 14 邹慧君,张春林,李杞仪.机械原理[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- 15 孙国祥,汪小岳,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)