

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.006

# 变行距水稻钵苗移栽机移栽装置设计与试验

蔡金平<sup>1,2</sup> 刘木华<sup>1,2</sup> 肖丽萍<sup>1,2</sup> 林金龙<sup>1,2</sup> 叶洋洋<sup>1</sup> 杨红飞<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学工学院, 南昌 330045; 2. 江西省现代农业装备重点实验室, 南昌 330045)

**摘要:** 针对现有水稻钵苗移栽机移栽行距固定、不能适应南方双季稻区不同行距移栽农艺要求的问题,在步距式水稻插秧机基础上,设计了一种取苗轨迹简单、实用及性能可靠的变行距钵苗移栽装置。根据钵苗最佳拔取角度与取、投苗位置要求,确定取苗运动轨迹,设计取苗连杆机构,建立运动学模型,并应用 Matlab 对机构模型进行优化设计;根据取苗连杆机构运动参数与钵苗下落姿态的要求,设计苗夹开合与旋转运动控制凸轮,并进行取苗连杆机构与苗夹机构之间运动同步性的运动仿真分析;为满足钵苗经过输苗筒后下落至水田时刻的一致,以保证移栽时钵苗株距均匀性,对输苗筒的关键结构进行了理论分析及设计;进行不同取苗速度、不同行距的移栽试验,平均取苗成功率达到 89.96%,平均倒苗率 3.45%,表明该装置具有较好的移栽效果,可应用于水稻钵苗变行距移栽作业。

**关键词:** 水稻; 钵苗移栽; 变行距; 移栽装置

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0050-10

OSID:



## Design and Experiment of Transplanting Device with Variable Row-spacing of Rice Potted-seedling Transplanter

CAI Jinping<sup>1,2</sup> LIU Muhua<sup>1,2</sup> XIAO Liping<sup>1,2</sup> LIN Jinlong<sup>1,2</sup> YE Yangyang<sup>1</sup> YANG Hongfei<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2. Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** As the existing rice pot seedling transplanter with fixed row-spacing failed to meet the agronomic requirements of rice transplanting with different row-spaces in the double cropping rice area in south China, a kind of pot seedling transplanting device gearing to the need of variable row-spacing transplanting was accordingly designed based on the existing walking type rice transplanter. Firstly, the optimal pulling angle of pot seedlings and the location of picking and falling determined the trajectory of pot seedlings, and the kinematics model of connecting rod mechanism of picking seedlings was established, the design of the mechanism model was optimized with the help of Matlab. Secondly, according to the motion parameters of the connecting rod mechanism and the motion requirements of the clamping motion posed by the dropping posture of the pot seedling when it was being thrown, the CAM of the clamping motion control was designed, and the motion simulation was carried out to analyze the synchronism of the movement between the connecting rod mechanism and the clamping motion. Then, in order to maintain the consistency of the time when the pot seedlings fell into the paddy field after passing through the transmission tube to ensure the uniform plant spacing during transplanting, the wall inclination angle of the key parameters of the transmission tube was theoretically analyzed and designed. Finally, transplanting experiments were carried out with different seedling speeds and row-spacings, and the average successful rate of seedling extraction reached 89.96% and the average inverted seedling rate was 3.45%, indicating that the device had a good transplanting effect and could be applied to the transplanting of rice pot seedlings with variable row-spacing.

**Key words:** rice; potted-seedling transplanting; variable row-spacing; transplanting device

收稿日期: 2019-10-16 修回日期: 2019-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51565018)和江西省重点研发计划项目(20181BBF60033)

作者简介: 蔡金平(1984—),男,讲师,博士生,主要从事农业装备研究,E-mail: liujia197@163.com

通信作者: 肖丽萍(1978—),女,副教授,博士,主要从事农业装备研究,E-mail: applexp42@163.com

## 0 引言

水稻钵苗移栽伤秧小、返青快,且抗倒伏能力强,千粒质量提高,籽粒更加充实,具有显著的增产优势<sup>[1-2]</sup>。为此,国内外学者对水稻钵苗移栽机进行了广泛的研究,包春江等<sup>[3]</sup>研制了水稻钵苗空气整根气吸式有序移栽机,该机通过产生气体压差一次完成4个钵苗的移栽。宋建农等<sup>[4-5]</sup>研制出对辊式水稻钵苗行栽机,钵苗在重力的作用下掉落移栽到水田中。俞高红、叶秉良等<sup>[6-15]</sup>研制了顶出式、夹苗式、夹钵式等一系列非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构,这些机构能够较好地实现钵苗移栽。孙良等<sup>[16]</sup>、辛亮<sup>[17]</sup>研制了水稻钵苗宽窄行移栽机构,能实现钵苗宽窄行移栽。现有水稻钵苗移栽机大多为固定行距移栽,不能适应南方双季稻区多种行距种植模式的农艺要求。如江西省水稻种植需要同时适应晚稻和杂交稻稀植、早稻密植,以及超级稻小行距制种,即需要适应230~300 mm行距移栽的种植需求<sup>[18]</sup>,因此开展变行距钵苗移栽机研制很有必要。

现有水稻钵苗移栽机构需实现曲线相对复杂的封闭式取苗轨迹<sup>[19-20]</sup>,而且水稻钵苗变行距移栽需要实现不同行距输送秧苗。本文在步距式水稻插秧机的基础上,通过分析水稻钵苗拔取运动特性和钵苗下落姿态与运动特性,设计一种取苗轨迹简单、能实现不同行距输送秧苗的变行距移栽装置,为变行距水稻钵苗移栽机的设计提供依据。

## 1 结构与工作原理

变行距水稻钵苗移栽机结构如图1所示,移栽装置主要由实现取苗的取苗连杆机构、苗夹与输苗筒等组成。动力总成通过链传动将动力传递到纵向移苗机构、横向移苗机构和移栽装置,实现移栽机行走、移苗、取苗与投苗之间运动的协调性。

取苗连杆机构带动苗夹运动至载苗台上的取苗点时,迅速闭合完成夹持钵苗的动作,随着取苗连杆机构的进一步运动苗夹夹持钵苗离开取苗点完成取苗;苗夹在随取苗连杆机构运动至投苗点的过程中旋转调整钵苗下落时姿态即钵苗与水平方向夹角,苗夹运动至投苗点时张开将钵苗投入输苗筒完成投苗;钵苗投入输苗筒后与其倾斜壁面碰撞滑行后落入水田,既要保持较好的直立度、不倒伏,同时要保证等株距的移栽作业要求。

水稻钵苗变行距移栽的关键在于变行距输苗,其中图1所示的输苗筒是实现变行距输苗的关键。装置设计时,不改变载苗台300 mm的取苗间距,利

用钵苗下落时与可移动输苗筒倾斜壁面碰撞而改变其行距。如图2所示,通过输苗筒在位置I与位置II之间平移,实现230~300 mm行距输苗要求。

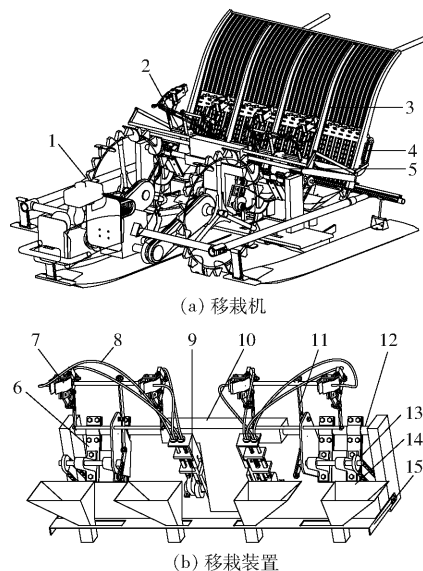


图1 变行距水稻钵苗移栽机结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of variable row-spacing of pot seedling transplanter

1. 动力总成 2. 移栽装置 3. 载苗台 4. 纵向移苗机构 5. 横向移苗机构 6. 取苗连杆固定架 7. 苗夹 8. 拉线 9. 苗夹控制凸轮机构 10. 移苗动力箱 11. 取苗连杆机构 12. 动力输出横杆 13. 链轮 14. 输苗筒 15. 输苗筒固定架

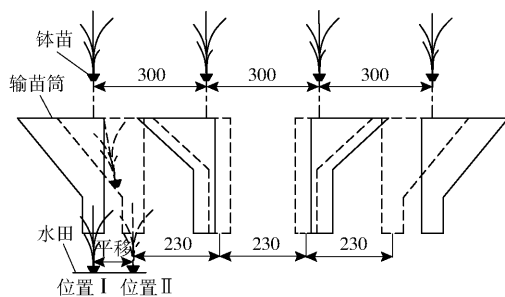


图2 输苗筒变行距输苗工作过程示意图

Fig. 2 Schematic of rice pot seedling transplanting process with variable row-spacing

## 2 关键部件设计与参数确定

移栽装置是整个移栽机的核心部件之一,取苗成功率、投苗位置准确性与钵苗下落至水田的直立度将直接影响移栽效果。

### 2.1 取苗连杆机构

#### 2.1.1 取苗运动轨迹分析

由取苗原理知取苗轨迹即为苗夹夹苗点 $M$ 的运动轨迹,同时需保证轨迹通过取苗点 $M_1$ 与投苗点 $M_2$ 。为确定夹苗点 $M$ 运动轨迹,以图1中动力输出横杆为原点 $O$ 建立坐标系,如图3所示。

前期进行了钵苗拔取特性试验,结果表明拔取

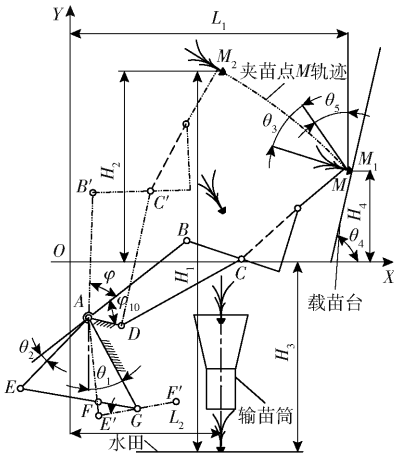


图3 取苗连杆机构取苗运动示意图

Fig. 3 Working schematic of pick-up mechanism

力与钵苗呈  $45^\circ$  夹角时拔取力最小, 拔取位置在距钵土表面  $15\text{ mm}$  时钵苗拉断概率最低<sup>[21]</sup>; 结合载苗台结构参数确定取苗点  $M_1$  的位置参数  $L_1 = 376\text{ mm}$ 、 $H_4 = 123.7\text{ mm}$ , 即  $M_1$  坐标为  $(376\text{ mm}, 123.7\text{ mm})$ 。

根据已有研究表明: 钵苗自由下落位置与水田表面距离超过  $500\text{ mm}$  时可保证钵苗入水田不倒伏且直立度好<sup>[22]</sup>, 考虑到钵苗与输苗筒碰撞、摩擦, 设定投苗点  $M_2$  与水田竖直距离  $H_1 = 600\text{ mm}$ , 由原机型可知作业时动力输出横杆与水田高度  $H_3 = 342\text{ mm}$ , 得  $H_2 = 258\text{ mm}$ ; 由输苗筒空间安装位置确定  $L_2 = 205\text{ mm}$ , 即  $M_2$  坐标为  $(205\text{ mm}, 258\text{ mm})$ 。

根据钵苗拔取力最佳角度  $\theta_3 = 45^\circ$  和载苗台与水平方向安装夹角  $\theta_4 = 73^\circ$ , 确定取苗轨迹在取苗点  $M_1$  处的切线与竖直方向夹角为  $\theta_5 = 28^\circ$ 。为使取苗轨迹简单, 设定夹苗点  $M$  运动轨迹  $M_1M_2$  为圆弧曲线, 根据已确定点  $M_1$ 、 $M_2$ , 以及点  $M_1$  处的切线夹角  $\theta_5$  确定圆弧  $\widehat{M_1M_2}$  的位置参数, 如图 3 所示。

在已知取苗轨迹的情况下, 采用优化设计确定取苗连杆机构的结构参数。由于受取苗空间结构限制, 动力输出与取、投苗点距离较大, 若直接采用曲柄摇杆机构实现目标取苗轨迹, 将可能出现由于杆长偏大而导致机构振动大、运动不准确等问题。因此采用如图 3 所示双曲柄机构  $ABCD$  与曲柄摇杆机构  $AEFG$  的组合机构实现所需的目标取苗轨迹。

### 2.1.2 双曲柄机构设计

双曲柄机构  $ABCD$  结构简图如图 4 所示, 为确定其结构参数, 建立运动学模型。

假定取苗过程中苗夹与取苗机构固定即夹苗点  $M$  与连杆  $BC$  位置固定, 根据图 4 建立矢量封闭方程

$$\mathbf{l}_{AM} = \mathbf{l}_{AB} + \mathbf{l}_{BC} + \mathbf{l}_{CM} \quad (1)$$

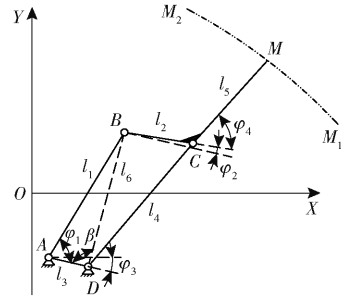


图4 双曲柄机构简图

Fig. 4 Diagram of double crank mechanism

将矢量方程转换为解析方程, 得夹苗点  $M$  的位移方程为

$$\begin{cases} x_M = x_A + l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \\ \quad l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + l_5 \cos(\varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_3) \\ y_M = y_A + l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) + \\ \quad l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + l_5 \sin(\varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_3) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\varphi_2 = \arccos \frac{l_2^2 + l_6^2 - l_4^2}{2l_2l_6} - \beta$$

$$\beta = \arcsin \frac{l_1 \sin \varphi_1}{l_6}$$

$$l_6 = \sqrt{l_1^2 + l_3^2 - 2l_1l_3 \cos \varphi}$$

式中  $(x_A, y_A)$  —— 机架  $A$  点坐标,  $\text{mm}$

$l_1$  —— 曲柄  $AB$  长度,  $\text{mm}$

$l_2$  —— 连杆  $BC$  长度,  $\text{mm}$

$l_3$  —— 机架  $AD$  长度,  $\text{mm}$

$l_4$  —— 曲柄  $CD$  长度,  $\text{mm}$

$l_5$  ——  $CM$  距离,  $\text{mm}$

$l_6$  ——  $BD$  距离,  $\text{mm}$

$\beta$  ——  $BD$  与机架  $AD$  的夹角,  $(^\circ)$

$\varphi_1$  —— 曲柄  $AB$  角位移,  $(^\circ)$

$\varphi_2$  —— 连杆  $BC$  角位移,  $(^\circ)$

$\varphi_3$  —— 机架  $AD$  与  $X$  轴夹角,  $(^\circ)$

$\varphi_4$  —— 连杆  $BC$  与杆  $CM$  夹角,  $(^\circ)$

点  $M$  速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_M = -\dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \\ \quad \dot{\varphi}_2 [l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + l_5 \cos(\varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_3)] \\ \dot{y}_M = \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) - \\ \quad \dot{\varphi}_2 [l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + l_5 \sin(\varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_3)] \end{cases} \quad (3)$$

为避免双曲柄机构运动与其他工作零部件产生干涉, 如图 3 所示, 设定曲柄  $AB$  初始相角  $\varphi_{10} = 50^\circ$ , 摆角  $\psi = 50^\circ$ , 又为使夹苗点  $M$  的运动轨迹最佳逼近圆弧  $\widehat{M_1M_2}$ , 在圆弧  $\widehat{M_1M_2}$  上按弧长均匀取 10 个点  $(x_i, y_i)$ , 根据曲柄  $AB$  转角等分再结合式 (2) 得 10 个夹苗点  $M$  的位移点  $(x_{Mi}, y_{Mi})$ , 并利用其与点

$(x_i, y_i)$  均方根误差最小建立目标函数, 为

$$f(x) = \sum_{i=1}^{10} [(x_{Mi} - x_i)^2 + (y_{Mi} - y_i)^2]^{1/2} \quad (4)$$

双曲柄机构杆长还需满足如下约束条件:

(1) 由双曲柄机构确定最短杆为  $AD$  杆, 且所有杆长需大于零, 得

$$\begin{cases} g_1(x) = l_4 > 0 \\ g_2(x) = l_5 > 0 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 由曲柄存在条件得

$$\begin{cases} g_3(x) = l_1 + l_4 - l_2 - l_3 \leq 0 \\ g_4(x) = l_2 + l_4 - l_1 - l_3 \leq 0 \\ g_5(x) = l_3 + l_4 - l_1 - l_2 \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

(3) 由机架安装位置点  $A$  需在机架与载苗台之间得

$$g_6(x) = -x_A < 0 \quad (7)$$

根据以上约束条件借助 Matlab 软件求解, 得优化后设计参数:  $x_A = 25 \text{ mm}$ 、 $y_A = -75.5 \text{ mm}$ 、 $l_1 = 169.7 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 78.5 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 45.9 \text{ mm}$ 、 $l_4 = 186.7 \text{ mm}$ 、 $l_5 = 186.3 \text{ mm}$ 、 $\varphi_3 = 13^\circ$ 、 $\varphi_4 = 59.4^\circ$ 。

### 2.1.3 曲柄摇杆机构设计

由摇杆  $AE$  与曲柄  $AB$  刚性连接, 可确定其摆角  $\psi = 50^\circ$ ; 因缩短钵苗夹持时间可减少苗夹对钵苗茎秆的损伤<sup>[23]</sup>, 取曲柄摇杆机构行程速比系数  $K = 1.25$ , 最小传动角  $\gamma_{\min} = 40^\circ$ , 曲柄摇杆机构简图如图 5 所示。

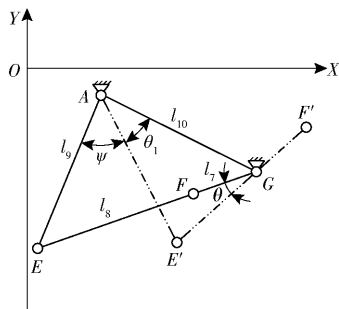


图 5 曲柄摇杆机构简图

Fig. 5 Diagram of crank-rocker mechanism

根据机械原理中行程系数比关系式得

$$\theta = 180 \frac{K-1}{K+1} \quad (8)$$

式中  $\theta$ ——曲柄摇杆机构  $A E F G$  极位夹角,  $(^\circ)$

根据图 5 中的  $\triangle A E G$ 、 $\triangle A E' G$  和  $\triangle E E' G$ , 利用余弦定理得

$$\begin{cases} (l_7 + l_8)^2 = l_9^2 + l_{10}^2 - 2l_9l_{10}\cos(\theta_1 + \psi) \\ (l_8 - l_7)^2 = l_9^2 + l_{10}^2 - 2l_9l_{10}\cos\theta_1 \\ \left(2l_9\sin\frac{\psi}{2}\right)^2 = (l_7 + l_8)^2 + (l_8 - l_7)^2 - 2(l_7 + l_8)(l_8 - l_7)\cos\theta \end{cases} \quad (9)$$

式中  $l_7$ ——曲柄  $FG$  长度,  $\text{mm}$   
 $l_8$ ——连杆  $EF$  长度,  $\text{mm}$   
 $l_9$ ——摇杆  $AE$  长度,  $\text{mm}$   
 $l_{10}$ ——机架  $AG$  长度,  $\text{mm}$   
 $\theta_1$ ——摇杆  $AE$  终止相角,  $(^\circ)$

根据最小传动角  $\gamma_{\min}$  计算关系得

$$\cos\gamma_{\min} = \frac{l_8^2 + l_9^2 - (l_{10} - l_7)^2}{2l_8l_9} \quad (10)$$

由机械原理可知在速比系数  $K$  与摇杆  $AE$  摆角  $\psi$  已确定, 机架的长度将不影响摇杆  $AE$  的运动速度, 考虑机架  $AG$  的空间安装位置, 设定  $l_{10} = 140 \text{ mm}$ , 将  $\gamma_{\min} = 40^\circ$ 、 $\psi = 50^\circ$  代入式 (8) ~ (10), 得曲柄摇杆机构设计参数  $l_7 = 54 \text{ mm}$ 、 $l_8 = 107.6 \text{ mm}$ 、 $l_9 = 133.5 \text{ mm}$ 。

根据取苗连杆机构中曲柄  $AB$  与摇杆  $AE$  的连接特性及双曲柄机构  $ABCD$  与曲柄摇杆机构  $A E F G$  的极限位置, 确定如图 3 所示复合机构的安装位置角  $\theta_1 = 22^\circ$ 、 $\theta_2 = 8.5^\circ$ 。

### 2.2 苗夹机构

苗夹机构是取、投苗的执行部件, 如图 6 所示, 主要由苗夹、拉线、弹簧、苗夹运动控制凸轮 (包括开合凸轮和旋转凸轮) 等组成, 运动控制凸轮为苗夹机构核心零件, 其通过弹簧与拉线实现苗夹的运动要求。开合凸轮控制苗夹在取苗点  $M_1$  时能闭合取苗, 在投苗点  $M_2$  时张开投苗; 旋转凸轮控制苗夹旋转调节投苗时钵苗下落姿态。

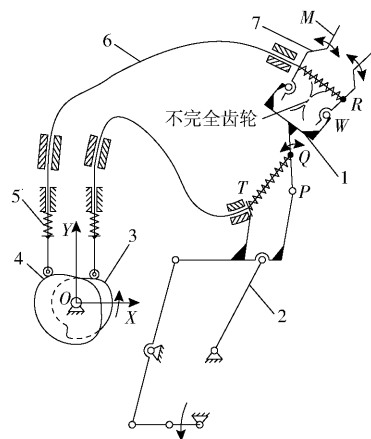


图 6 苗夹机构工作原理图

Fig. 6 Working schematic of seedling collecting mechanism

1. 苗夹固定架 2. 取苗连杆机构 3. 开合凸轮 4. 旋转凸轮
5. 弹簧 6. 拉线 7. 苗夹

苗夹由两个苗夹片及其固联的不完全齿轮实现苗夹的开合运动, 由夹苗点  $M$  与苗夹片旋转中心  $W$  距离、钵苗盘钵孔直径, 以及苗夹片旋转中心  $W$  与拉线固定点  $R$  距离, 计算出两苗夹片开口张角为  $14^\circ$ , 从而确定开合凸轮行程为  $10 \text{ mm}$ 。

根据取苗连杆机构计算知,钵苗到达投苗点时与水平方向的夹角为 $-15^\circ$ ,前期试验表明当钵苗与水平方向夹角小于 $15^\circ$ 下落时与输苗筒碰撞后可能出现钵体朝上苗朝下的“倒栽葱”现象,损伤秧苗且不符合栽植需求<sup>[20]</sup>,因此通过苗夹固定架绕 $Q$ 点旋转调整钵苗下落姿态。由于受空间限制,在满足投苗角度要求的情况下,旋转凸轮取较小的行程以减小其结构尺寸,因此设定苗夹固定架旋转角为 $35^\circ$ ,此时钵苗与水平夹角为 $20^\circ$ ,大于投苗所需最小水平夹角,符合投苗角度要求。且根据点 $T$ 、 $P$ 、 $Q$ 几何关系可确定旋转凸轮行程为 $25\text{ mm}$ 。

取苗连杆机构作业时,苗夹到达取苗点时迅速闭合夹紧,要求开合凸轮回程角减小;到达投苗点时苗夹应完成旋转再张开投苗,根据取苗机构的运动参数、苗夹运动需求确定凸轮的设计参数如表1所示。

$$s(\varphi) = \begin{cases} r_0 + h \left( \frac{\varphi}{\Phi} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\Phi} \right) & (0 \leq \varphi \leq \Phi) \\ r_0 + h & (\Phi < \varphi \leq \Phi + \Phi_s) \\ r_0 + h \left[ 1 - \frac{\varphi - \Phi - \Phi_s}{\Phi'} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{\Phi'} (\varphi - \Phi - \Phi_s) \right] & (\Phi + \Phi_s < \varphi \leq \Phi + \Phi_s + \Phi'_s) \\ r_0 & (\Phi + \Phi_s + \Phi'_s < \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $s$ ——凸轮从动件位移,mm

$r_0$ ——凸轮基圆半径,mm

$\varphi$ ——凸轮运动转角, $(^\circ)$

$h$ ——凸轮行程,mm

$\Phi$ ——凸轮推程角, $(^\circ)$

$\Phi'$ ——凸轮回程角, $(^\circ)$

$\Phi_s$ ——凸轮远休止角, $(^\circ)$

$\Phi'_s$ ——凸轮近休止角, $(^\circ)$

根据反转法原理与滚子圆族包络线方程并结合图6建立的 $XOY$ 坐标系得凸轮实际轮廓曲线方程为

$$\begin{cases} X_T = (s(\varphi) + r_0) \cos\varphi - r_T \cos\varphi \\ Y_T = -(s(\varphi) + r_0) \sin\varphi + r_T \sin\varphi \end{cases} \quad (12)$$

式中  $(X_T, Y_T)$ ——凸轮实际轮廓线坐标,mm

$r_T$ ——凸轮滚子半径,mm

利用Pro/E软件参数化建模设计盘形凸轮结构,完成凸轮的三维建模,如图7所示。

### 2.3 取苗过程运动仿真与分析

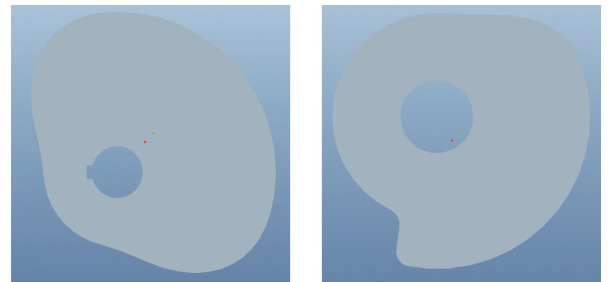
为了分析取苗连杆机构与苗夹机构运动相关性,将Pro/E软件所建立的取苗连杆机构和苗夹机构三维模型导入ADAMS软件中,设置各连接点约束条件,并假定取苗连杆机构与凸轮运动转速为 $60\text{ r/min}$ ,苗夹运动起始位置为取苗点。图8a所示为优化设计的取苗连杆机构取苗轨迹仿真曲线,从图中可看出仿真取苗轨迹与设计目标取苗轨迹基本

表1 凸轮设计参数

Tab.1 Structural parameters of cam

参数	数值	
	开合凸轮	旋转凸轮
基圆半径/mm	50	50
偏心距/mm	0	0
行程/mm	10	25
凸轮滚子半径/mm	3.5	3.5
推程运动角/ $(^\circ)$	40	60
远休止角/ $(^\circ)$	160	160
回程运动角/ $(^\circ)$	14	60
近休止角/ $(^\circ)$	146	80

为减小开合凸轮与旋转凸轮运动过程中的冲击,增加凸轮机构的稳定性,选用正弦运动曲线,得凸轮从动件运动曲线方程为



(a) 苗夹旋转控制凸轮

(b) 苗夹开合控制凸轮

图7 凸轮三维模型

Fig.7 3D model of cam

重合。

又根据取苗连杆机构转速并结合式(2)计算出取苗、投苗、取苗的3个时刻分别为 $0$ 、 $0.44$ 、 $1.0\text{ s}$ 。从图8b中可以看出,夹苗点 $M$ 速度在这3个时刻为速度零点,满足实际取、投苗点速度为零的运动要求。

从图8c可以看出, $0 \sim 0.44\text{ s}$ 时,开合凸轮处于近休止角而苗夹一直保持夹紧状态,当 $0.44\text{ s}$ 时凸轮进入升程苗夹开始张开,到 $1.0\text{ s}$ 时凸轮快速完成回程苗夹迅速闭合,实现取苗时苗夹迅速夹紧,投苗时苗夹张开;苗夹在夹紧和张开时已经完成旋转并处于静止状态,所以不影响取、投苗速度。

结合图8b、8c可得出,取苗时苗夹夹紧,投苗时苗夹张开,满足取苗运动的要求。验证了取苗连杆机构与苗夹机构之间运动的同步性。

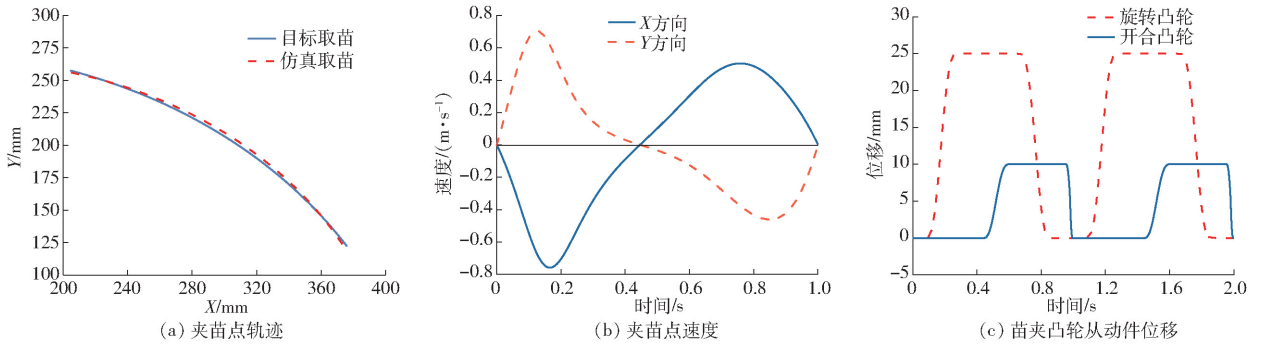


图8 取苗运动过程仿真曲线

Fig. 8 Kinematic simulation curves of seedling pick-up mechanism

2.4 输苗筒参数设计

输苗行距小于 300 mm 时钵苗下落过程中将与输苗筒壁面发生碰撞、滑行,如行距 230 mm 输苗时钵苗下落过程如图 9 所示。现有研究表明钵苗在输苗筒中的滑行摩擦阻力不能忽略<sup>[24]</sup>,由于钵苗下落后在各输苗筒壁面滑行距离不同,因此钵苗摩擦能量损失不一致,如果输苗筒设计不合理,将引起钵苗下落至水田的时刻不同从而导致移栽时的株距偏差,而不能保证等株距输苗要求。

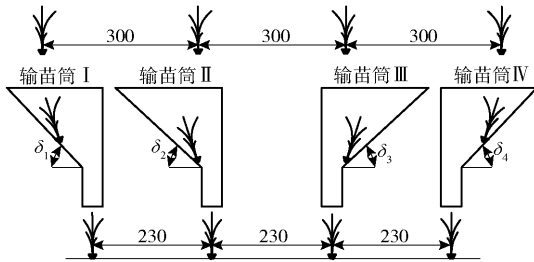


图9 230 mm 行距输苗时钵苗下落过程示意图

Fig.9 Falling schematic of pot seedlings with 230 mm distance

若实现等株距输苗需满足钵苗下落时刻的一致性,根据钵苗运动过程的分析可知,改变输苗筒壁面倾角  $\delta$  可实现钵苗下落时刻的同步性。为了确定各输苗筒的壁面倾角,对钵苗下落与输苗筒接触过程进行运动学分析,并计算其下落过程所需总时间  $t_2$ ,其下落运动过程受力分析如图 10 所示,根据钵苗下落所需总时间  $t_2$  相等确定各输苗筒的壁面倾角  $\delta$

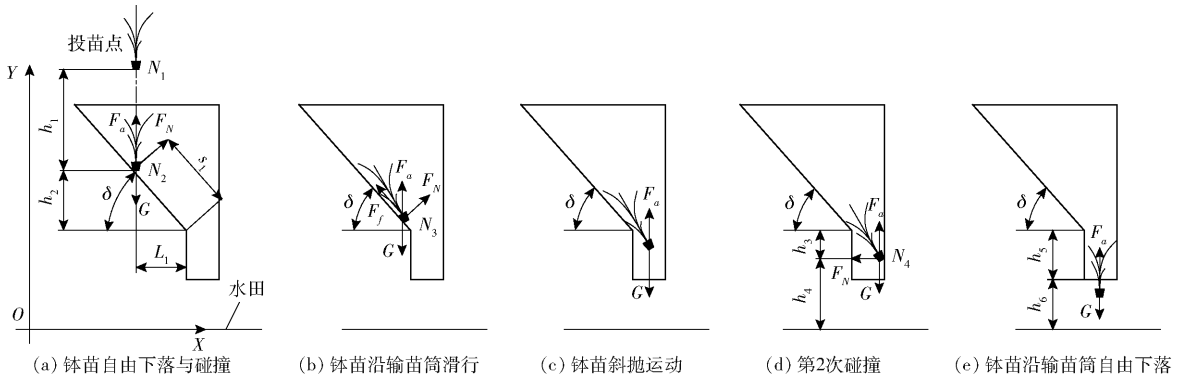


图10 钵苗下落时在输苗筒中运动受力分析

Fig. 10 Analysis of movement of pot seedling falling into tube

(其中由输苗筒对称布置结构得  $\delta_1 = \delta_4, \delta_2 = \delta_3$ )。

2.4.1 移栽过程钵苗下落运动学分析

(1) 钵苗自由下落过程

钵苗在投苗点  $N_1$  开始下落至输苗筒壁面做自由下落运动,如图 10a 所示,在该过程中由于投苗速度为零可知钵苗初速度为零,钵苗只受自身重力  $G = m_A g$  和空气阻力  $F_a = m_A g v_1^2 / v_L^2$ <sup>[25]</sup>,则钵苗在自由下落过程中动力学微分方程为

$$m_A g - m_A g \frac{v_1^2}{v_L^2} = m_A \frac{dv_1}{dt} \quad (13)$$

式中  $m_A$ ——钵苗质量, g

$g$ ——重力加速度,取 9.8 m/s<sup>2</sup>

$v_1$ ——钵苗自由下落  $t$  时刻速度, m/s

$v_L$ ——钵苗下落时漂浮速度,取 17.5 m/s<sup>[24]</sup>

$t$ ——钵苗运动时间, s

对式(13)积分得钵苗自由下落过程的速度及位移方程为

$$\begin{cases} v_1 = v_L \frac{1 - e^{-2gt/v_L}}{1 + e^{-2gt/v_L}} \\ h_1 = v_L t + \frac{v_L^2}{g} \ln(1 + e^{-2gt/v_L}) - \frac{v_L^2}{g} \ln 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $h_1$ ——钵苗自由下落  $t$  时刻位移, mm

(2) 钵苗与输苗筒壁面碰撞过程

根据钵苗土钵的物理特性,假设其与输苗筒碰撞为塑性碰撞,碰撞时间很短忽略摩擦力的影响,在

点  $N_2$  碰撞结束后只剩下沿输苗筒速度<sup>[24]</sup>, 由图 10a 几何关系得碰撞后钵苗速度为

$$v_{2a} = v_{1a} \sin \delta \quad (15)$$

式中  $v_{1a}$ ——钵苗自由落体结束时速度, m/s

$v_{2a}$ ——钵苗与输苗筒碰撞结束时速度, m/s

### (3) 钵苗沿输苗筒壁面下滑过程

钵苗碰撞结束后沿输苗筒壁面向下滑动, 钵苗在输苗筒壁下滑过程受力情况如图 10b 所示, 受力有自身重力  $G = m_A g$ 、壁面作用力  $F_N = m_A g \cos \delta$ 、摩擦力  $F_f = \mu F_N$ 、空气阻力  $F_a = m_A g v_3^2 / v_L^2$ 。则钵苗在输苗筒壁面滑行动力学微分方程为

$$m_A g \sin \delta - \mu m_A g \cos \delta - m_A g \frac{v_3^2}{v_L^2} = m_A \frac{dv_3}{dt} \quad (16)$$

式中  $\mu$ ——钵苗与输苗筒壁面摩擦系数, 取 0.67

$v_3$ ——钵苗沿壁面滑行  $t$  时刻速度, m/s

整理式(16)并积分得钵苗速度和位移方程为

$$\begin{cases} v_3 = Av_L \frac{1 - e^{-2gAt/v_L}}{1 + e^{-2gAt/v_L}} + v_{2a} \\ s_1 = v_{2a}t + Av_L t + \frac{v_L^2}{g} \ln(1 + e^{-2gAt/v_L}) - \frac{v_L^2}{g} \ln 2 \end{cases} \quad (17)$$

其中  $A = \sqrt{\sin \delta - \mu \cos \delta}$

式中  $s_1$ ——钵苗沿壁面滑行  $t$  时刻位移, mm

### (4) 钵苗斜抛运动过程

当钵苗土钵经过点  $N_3$  后脱离输苗筒壁面, 钵苗只受自身重力  $G = m_A g$  和空气阻力  $F_a = m_A g v_4^2 / v_L^2$  作用, 由于钵苗在输苗筒壁面上下滑后具有水平方向初始速度, 开始做斜抛运动, 如图 10c。斜抛运动过程受力为自身重力和空气阻力, 不考虑钵苗姿态对空气阻力的影响, 钵苗斜抛运动  $Y$  轴方向动力学微分方程为

$$m_A g - m_A g \frac{v_4^2}{v_L^2} = m_A \frac{dv_4}{dt} \quad (18)$$

式中  $v_4$ ——钵苗斜抛  $t$  时刻  $Y$  轴向速度, m/s

整理式(18)并积分得钵苗  $Y$  轴向速度和位移方程为

$$\begin{cases} v_4 = v_L \frac{1 - e^{-2gt/v_L}}{1 + e^{-2gt/v_L}} + v_{3a} \sin \delta \\ h_3 = v_{3a} t \sin \delta + v_L t + \frac{v_L^2}{g} \ln(1 + e^{-2gt/v_L}) - \frac{v_L^2}{g} \ln 2 \end{cases} \quad (19)$$

式中  $v_{3a}$ ——钵苗沿输苗筒滑行结束时速度, m/s

$h_3$ ——钵苗斜抛  $t$  时刻  $Y$  轴向位移, mm

### (5) 钵苗与输苗筒竖直壁面第 2 次碰撞过程

根据钵苗土钵的物理特性, 假设其与输苗筒碰撞为塑性碰撞, 在点  $N_4$  碰撞结束后只剩下竖直方向

速度, 水平速度为零, 如图 10d 所示, 得

$$v_{5a} = v_{4a} \quad (20)$$

式中  $v_{4a}$ ——钵苗斜抛结束时  $Y$  轴向速度, m/s

$v_{5a}$ ——钵苗与竖直壁面第 2 次碰撞结束时速度, m/s

### (6) 钵苗沿输苗筒自由下落过程

钵苗在输苗筒中自由下落中, 忽略钵苗与输苗筒竖直壁面摩擦力, 如图 10e 所示。下落过程参照第 1 次自由下落过程, 得钵苗速度和位移方程为

$$\begin{cases} v_6 = v_L \frac{1 - e^{-2gt/v_L}}{1 + e^{-2gt/v_L}} + v_{5a} \\ h_4 = v_{5a}t + v_L t + \frac{v_L^2}{g} \ln(1 + e^{-2gt/v_L}) - \frac{v_L^2}{g} \ln 2 \end{cases} \quad (21)$$

式中  $v_6$ ——钵苗沿输苗筒下落  $t$  时刻速度, m/s

$h_4$ ——钵苗沿输苗筒下落  $t$  时刻位移, mm

由于钵苗与输苗筒壁面碰撞时间很短, 所以不考虑其对钵苗下落时间的影响, 因此钵苗沿输苗筒下落至水田所用总时间为

$$t_z = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (22)$$

式中  $t_1$ ——钵苗第 1 次自由下落时间, s

$t_2$ ——钵苗沿输苗筒斜壁面下滑时间, s

$t_3$ ——钵苗在输苗筒内斜抛运动时间, s

$t_4$ ——钵苗沿输苗筒自由下落时间, s

由钵苗运动特性分析可知, 输苗筒壁面倾角  $\delta$  会影响钵苗下落时间。

## 2.4.2 输苗筒壁面参数设计

由钵苗下落运动特性分析知, 在变行距输苗时, 可改变输苗筒壁面倾角实现钵苗等株距。但为减少输苗筒的制造数量, 本文只取时刻相差最大即 230 mm 行距输苗时来确定一组壁面倾角。为减小输苗筒的高度, 现取输苗筒 I 壁面倾角  $\delta_1 = 45^\circ$ , 由前述知投苗点与水田距离为 600 mm, 结合图 10 得几何关系式为

$$\begin{cases} h_2 = L_3 \tan \delta \\ s_1 = L_3 / \cos \delta \\ h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 600 \\ h_3 + h_4 = h_5 + h_6 \end{cases} \quad (23)$$

式中  $L_3$ ——投苗点与输苗筒中心水平距离, mm

$h_2$ ——钵苗沿输苗筒壁面滑行  $Y$  轴向高度, mm

$h_5$ ——输苗筒直筒段长度, mm

$h_6$ ——输苗筒距泥面高度, mm

将输苗筒 I 已确定参数  $h_5 = 40$  mm、 $h_6 = 210$  mm、 $L_3 = 105$  mm 代入式(14)、(15)、(17)、(19)~(23)求出钵苗下落总时间  $t_z = 0.445$  s。

从图 9 可知, 输苗筒变行距输苗时, 输苗筒 II 移动距离是输苗筒 I 的 1/3, 即  $L_3 = 35$  mm; 将  $t_z =$

0.445 s 代入式(14)、(15)、(17)、(19)~(23)求得输苗筒Ⅱ壁面倾角  $\delta_2 = 41^\circ$ 。

### 3 移栽试验

#### 3.1 试验目的与方案设计

为了检验移栽装置在实际作业中的工作性能,将装配好的移栽装置安装在步距式水稻插秧机动力总成上,不改变原有的横、纵移苗机构,并于2019年6月在江西农业大学试验田开展田间移栽试验,试验现场如图11所示。试验用钵盘为  $14 \times 25$  穴,钵孔直径 22 mm,钵土材质为育秧基质,秧龄 25 d。通过多次取苗、投苗试验发现,苗夹取苗时与钵苗夹角约为  $45^\circ$ ,投苗时钵苗与水平夹角约为  $25^\circ$ ,钵苗下落至水田后直立角约为  $70^\circ$ 。



图 11 移栽试验现场

Fig. 11 Scene of transplanting experience

进行了取苗机构转速分别为 60、75、90 r/min 的取苗,每一种转速下进行了行距分别为 230、265、

300 mm 输苗试验,并记录试验钵数、空穴数、取苗失败数和钵苗入泥倒苗数,分析移栽装置的工作性能。

#### 3.2 试验结果与分析

性能试验结果如表 2 所示,苗盘平均空穴率 21.03%,取苗机构转速为 60 r/min 时平均取苗成功率 94.52%,90 r/min 时平均取苗成功率 85.40%,总体平均取苗成功率 89.96%;在不同取苗机构转速工况下输苗行距 230 mm 时平均倒苗率 4.18%,行距 300 mm 时平均倒苗率 2.8%,总体平均倒苗率 3.45%。

通过对试验结果的进一步分析,知移栽装置能够快速实现取苗和投苗动作,变行距输苗效果好。由于钵土为育秧基质,与钵穴的吸附力偏小,在纵向送苗时容易引起钵土震落,导致试验空穴率偏高。随着取苗机构转速的提高,取苗成功率逐渐下降,反之逐渐增加,在取苗速度较快的情况下,取苗成功率下降,这与育苗的质量、零件加工精度、苗夹夹苗时的闭合程度都有较大关系。随着输苗行距的减小,倒苗率升高,因钵苗在输苗筒滑行摩擦距离增大导致下落速度减小,减小钵苗的入泥深度,从而增加倒苗率。通过后期增大苗夹摩擦因数、改进苗夹凸轮机构运动参数,提高在较高转速下的取苗成功率;改善输苗筒壁面曲面结构与减小摩擦因数,增加钵苗入泥速度从而减小倒苗率,提高钵苗移栽成功率。

表 2 试验结果

Tab. 2 Test results

转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	行距/ mm	试验 钵数	空穴 数	空穴 率/%	实际取 苗数	取苗失 败数	倒苗 数	取苗成 功率/%	倒苗 率/%	移栽成 功率/%
60	230	140	25	17.86	115	5	5	95.65	4.54	91.30
60	265	140	27	19.29	113	7	4	93.80	3.77	90.27
60	300	140	32	22.86	108	6	3	94.11	2.94	91.67
75	230	140	26	18.57	114	11	4	90.35	3.88	86.84
75	265	140	31	22.14	109	10	3	90.83	3.03	88.07
75	300	140	34	24.29	106	12	2	88.68	2.13	86.79
90	230	140	27	19.29	113	16	4	85.84	4.12	82.30
90	265	140	30	21.43	110	15	3	86.24	3.30	83.63
90	300	140	33	23.57	107	17	3	84.11	3.33	81.31

### 4 结论

(1)在满足南方双季稻区变行距种植农艺要求的基础上,设计了一种简单、实用及性能可靠的变行距钵苗移栽装置,并对取苗过程进行了运动学仿真,验证了装置具有较好的运动协调性。

(2)为保证在变行距输苗时也满足等株距输苗,分析了钵苗下落过程的运动特性,并根据其下落

运动过程,建立了不同运动阶段的动力学模型。通过不同的输苗筒壁面倾角可实现下落时刻一致,即等株距输苗,并确定输苗筒Ⅰ、Ⅳ壁面倾角为  $45^\circ$ ,输苗筒Ⅱ、Ⅲ壁面倾角为  $41^\circ$ 。

(3)对移栽装置进行了田间试验,其平均取苗成功率达 89.96%,平均倒苗率 3.45%,表明该装置变行距移栽效果较好。



## 参 考 文 献

- [1] 张洪程,朱聪聪,霍中洋,等.钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点[J].农业工程学报,2013,29(21):50-59.  
ZHANG Hongcheng, ZHU Congcong, HUO Zhongyang, et al. Advantages of yield formation and main characteristics of physiological and ecological in rice with nutrition bowl mechanical transplanting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 50-59. (in Chinese)
- [2] 朱聪聪,张洪程,郭保卫,等.钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J].作物学报,2014,40(1):122-133.  
ZHU Congcong, ZHANG Hongcheng, GUO Baowei, et al. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 122-133. (in Chinese)
- [3] 包春江,李宝筏,包文育,等.水稻钵苗空气整根气吸式有序移栽机的研究[J].农业工程学报,2003,19(6):130-134.  
BAO Chunjiang, LI Baofa, BAO Wenyu, et al. Air-sucking sequential rice transplanter for air-pruning tray grown seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 130-134. (in Chinese)
- [4] 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 a transporting and evulsing mechanism of potted rice seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(2): 19-21. (in Chinese)
- [5] 宋建农,黄育仕,魏文军,等.水稻钵苗对辊式拔秧机构[J].江苏大学学报(自然科学版),2006,27(4):291-294.  
SONG Jiannong, HUANG Yushi, WEI Wenjun, et al. Evulsing rice potted-seedling mechanism equipped with double-roller [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2006, 27(4): 291-294. (in Chinese)
- [6] 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,2011,28(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, 28(5): 749-752. (in Chinese)
- [7] 叶秉良,吴国环,俞高红,等.旋转式水稻钵苗移栽机构移栽臂设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):45-52.  
YE Bingliang, WU Guohuan, YU Gaohong, et al. Design and test on transplanting arm of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 45-52. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150707&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150707&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.007. (in Chinese)
- [8] 叶秉良,朱浩,俞高红,等.旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):53-61.  
YE Bingliang, ZHU Hao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 53-61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160508&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160508&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008. (in Chinese)
- [9] YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(6): 43-55.
- [10] 叶秉良,易卫明,俞高红,等.不完全非圆齿轮传动钵苗移栽机构缓冲装置研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):69-75.  
YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Buffer device of transplanting mechanism for plug seedlings based on transmission with incomplete no circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 69-75. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170308&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170308&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.008. (in Chinese)
- [11] 叶秉良,吴国环,俞高红,等.非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):68-73.  
YE Bingliang, WU Guohuan, YU Gaohong, et al. Optimized design and tests on rice potted seedling transplanting mechanism of planetary gear train with non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 68-73. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161109&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161109&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.009. (in Chinese)
- [12] 俞高红,杜立恒,李革,等.高速水稻钵苗移栽机送秧装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):53-61.  
YU Gaohong, DU Liheng, LI Ge, et al. Design and experiment of feeding-seedling device for high speed rice pot-seedling transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 53-61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150507&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150507&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.007. (in Chinese)
- [13] YE Bingliang, JIN Xuejun, YU Gaohong, et al. Parameter modification guiding optimization design and tests of a rotary transplanting mechanism for rice plug seedlings[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(6): 863-873.

- [14] 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 CSAE, 2013, 29(3): 16-22. (in Chinese)
- [15] 俞高红, 金也, 常数数, 等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100-108.  
YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu, et al. Design and test of clipping plug type transplanting mechanism of rice plug seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100-108. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190710&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190710&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.010. (in Chinese)
- [16] 孙良, 刘兵, 陈旋, 等. 差速水稻钵苗 Z 字形宽窄行移栽机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 18-27.  
SUN Liang, LIU Bing, CHEN Xuan, et al. Design of differential transplanting mechanism for zigzag wide-narrow row rice pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 18-27. (in Chinese)
- [17] 辛亮. 斜置回转式水稻宽窄行钵苗移栽机构机理分析与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.  
XIN Liang. Research of the inclined rotary rice wide-and-narrow row potted seedling transplanting mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 蔡金平, 肖丽萍, 刘木华, 等. 水稻机械化移栽技术发展现状与展望[J]. 农机化研究, 2018, 40(10): 6-10.  
CAI Jinping, XIAO Liping, LIU Muhua, et al. Development status and prospect of rice mechanization transplanting technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 6-10. (in Chinese)
- [19] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53.  
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140808&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140808&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [20] 肖丽萍, 蔡金平, 刘木华, 等. 变行距输秧筒输送钵苗过程的运动分析和试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 22-26.  
XIAO Liping, CAI Jinping, LIU Muhua, et al. Kinematic analysis and conveying process of variable-spacing seedling transmission cylinder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 22-26. (in Chinese)
- [21] 蒲闯, 刘木华, 蔡金平, 等. 水稻钵苗拔取特性研究及试验[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 219-225.  
PU Chuang, LIU Muhua, CAI Jinping, et al. Study and test on the characteristics of picking of pot rice seedlings [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(2): 219-225. (in Chinese)
- [22] 程路超. 不完全齿轮行星系钵苗移栽机构试验研究仿真优化[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
CHENG Luchao. Research on the experiment and simulation optimization of pot seedling transplanting mechanism with intermittent gears planetary system[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [23] 马瑞峻, 萧金庆, 郑普峰, 等. 穴盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 43-53.  
MA Ruijun, XIAO Jinqing, ZHENG Pufeng, et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 43-53. (in Chinese)
- [24] 张国凤, 赵匀, 陈建能. 水稻钵苗在空中和导苗管上的运动特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(3): 529-534.  
ZHANG Guofeng, ZHAO Yun, CHEN Jianneng. Characteristic analysis of rice plotted-seedlings motion in air and on turbination-type guide-canal[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(3): 529-534. (in Chinese)
- [25] 金鑫, 姬江涛, 刘卫想, 等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 58-67.  
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 58-67. (in Chinese)