

三臂回转式水稻钵苗移栽机构反求设计与试验

吴国环^{1,2} 俞高红^{1,3} 周海丽^{1,3} 葛彦杰^{1,3} 叶阿康^{1,3} 王磊^{1,3}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 温州职业技术学院智能制造学院, 温州 325000;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 针对前期正向设计得到的三移栽臂水稻钵苗移栽机构应用中存在绝对运动轨迹回程段前倾造成秧苗回带, 以及推苗角偏小造成推苗直立度差的问题, 提出一种基于局部运动轨迹的反求设计方法完成三臂回转式水稻钵苗移栽机构设计。首先, 分析机构绝对运动轨迹和相对运动轨迹之间关系, 结合原机构存在的问题预设局部较理想绝对运动轨迹回程段轨迹、取推苗角, 确定移栽机构局部相对运动轨迹关键位置点, 应用三次非均匀 B 样条曲线拟合生成相对运动轨迹; 然后, 建立基于相对运动轨迹的移栽机构反求设计模型, 开发了基于 Matlab 的反求设计辅助分析软件, 优化获得满足设计目标的移栽轨迹和机构参数; 最后, 对三臂回转式水稻钵苗移栽机构进行了结构设计、虚拟仿真与样机试验, 结果表明: 仿真轨迹、样机试验轨迹与理论计算轨迹基本一致, 且移栽臂推秧角较原机构增大了 9.08° 以上, 绝对运动轨迹回程高度大于 120 mm, 取推苗角度差与秧箱实际安装角误差控制在 ±2° 以内, 满足水稻钵苗高直立度移栽要求, 验证了所提出方法和三臂回转式水稻钵苗移栽机构设计的正确性。

关键词: 水稻钵苗; 移栽机构; 三臂回转式; 轨迹反求; 参数优化

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)07-0084-08 **OSID:** 

Reverse Design and Tests of Three-arms Rotary Rice Seedling Transplanting Mechanism

WU Guohuan^{1,2} YU Gaohong^{1,3} ZHOU Haili^{1,3} GE Yanjie^{1,3} YE Akang^{1,3} WANG Lei^{1,3}

(1. College of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. School of Intelligent Manufacturing, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325000, China
3. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the existing problems of the three-arm rice transplanting mechanism, such as the insufficient angle of pushing seedlings, and the partial absolute movement trajectory forward after planting, a reverse design method based on the local motion trajectory was proposed to overcome this problem. Firstly, the relationship between the absolute motion trajectory and relative motion trajectory of the mechanism was analyzed, and combined the existing problems of the original mechanism to preset the return section trajectory of the local standard absolute motion trajectory, the picking-seeding angle to reverse the local relative motion trajectory and key position points of the transplanting mechanism. The non-uniform B-spline curve was used to fit the trajectory. Secondly, a reverse design model for transplanting mechanism was established. A Matlab-based reverse analysis design software for seedling transplanting mechanism was developed to solve the parameters that met the design requirements of the mechanism. At last, the structure of three-arms rotary rice seedling transplanting mechanism was designed, and a physical prototype of the mechanism was manufactured. A virtual kinematic simulation and high-speed photographic kinematics bench test of the seedling transplanting mechanism were carried out to study the motion characteristics of the physical prototype of the mechanism. The results showed that the simulation trajectory, test trajectory and theoretical trajectory were basically the same, and the pushing-seedling angle was increased by more than 9.08°, the return height of the moving trajectory greater than 120 mm, the difference between the taking-seedlings and pushing-seedlings' angle difference

and the seedling box's installation angle was within $\pm 2^\circ$, which met the design requirements. The correctness of the design method and design results of the mechanism were verified.

Key words: rice potted-seedling; transplanting mechanism; three-arms rotary; trajectory reversesolution; parameter optimization

0 引言

行星轮系水稻钵苗移栽机构可由一套机构完成取苗、持苗和推苗等动作,其结构紧凑、工作连续平稳,能够克服连杆机构存在的问题,已经成为水稻钵苗移栽机构研究的一个重要方向^[1-12]。浙江理工大学农业机械研究所提出了多种两臂非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构^[8-11],但当两臂水稻钵苗移栽机构移栽效率达到 200 株/(min·行)时移栽取苗成功率受到比较大的影响。文献[12]提出的三臂水稻钵苗移栽机构相对于两臂移栽机构,在同等移栽效率下,可允许行星架转速是传统两臂移栽机构的 2/3,有利于提高移栽机构的取苗成功率。因此,三臂行星轮系水稻钵苗移栽机构的研制对提高水稻移栽机械化水平具有实际价值。但现有三臂移栽机构采用正向设计方法进行设计,即给定非圆齿轮机构参数,以输出的工作轨迹和姿态为目标,人机交互的方式确定各机构参数,无法同时满足良好的轨迹和姿态要求,在实际应用中仍存在移栽绝对运动轨迹前倾造成秧苗推倒、回带,以及植苗时的推苗角偏小造成推苗直立性欠佳的问题。而基于轨迹或位姿的反求设计能够实现机构参数与传动比、轨迹之间

的关联设计^[13-18]。俞高红团队^[19]提出的正反求设计方法,在正向设计的基础上,局部调整其工作轨迹,基于调整后的工作轨迹反向求解总传动比,再采用一定的方法分配总传动比到两级非圆齿轮副,最后求解出非圆齿轮节曲线,该方法对解决原三臂水稻钵苗移栽机构存在的问题具有实际意义。

本文拟在文献[12]原机构的基础上,以解决目前移栽绝对运动轨迹前倾和推苗角偏小的问题为目标,预设较理想局部绝对运动轨迹,优化确定相对运动轨迹,开展移栽机构反求设计模型建立、优化设计软件开发及非圆齿轮设计等研究,通过理论分析、虚拟仿真及样机试验来验证所设计机构解决绝对运动轨迹前倾和推秧角偏小问题的效果。

1 移栽机构设计目标与工作原理

1.1 移栽机构设计目标

由文献[12]可知原三臂移栽机构的推苗角为 55.32° ,相对运动轨迹如图 1a 中曲线 2 所示,绝对运动轨迹如图 1c 所示,其绝对运动轨迹回程段在竖直秧苗线右侧(视为轨迹前倾),点 D' 、 E' 之间轨迹段尽量左凸,保证移栽臂推完苗后回程阶段向左上方运动,越过秧苗,避免出现移栽臂向前带苗的现

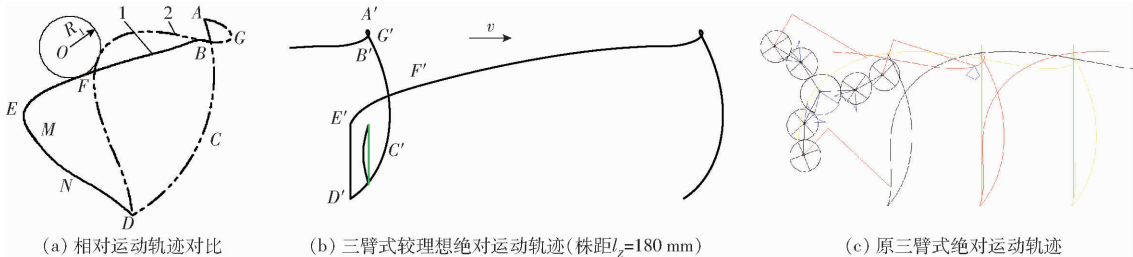


图 1 水稻钵苗移栽轨迹

Fig. 1 Transplanting trajectory of rice seedling

1. 三臂式较理想相对运动轨迹 2. 原三臂式相对运动轨迹

象。通过分析可知,相对运动轨迹回程段越往左,则绝对运动轨迹回程段前倾程度越低,因此,本文在优化机构运动轨迹时,相对运动轨迹回程段应尽量左凸。

设计目标如下:①取苗角取值范围为 $10^\circ \sim 16^\circ$ 。②推苗角取值范围为 $60^\circ \sim 65^\circ$ 。③取苗角和推苗角的角度差范围为 $45^\circ \sim 55^\circ$ 。④移栽臂在地面以上推苗,当株距为 180 mm 时,移栽机构应近似实现如图 1b 所示的绝对运动轨迹(其对应的相对运动轨迹为图 1a 中的曲线 1), $D'E'$ 回程段高度

$L_{D'E'} \geq 120$ mm(参考秧苗高度)。

1.2 机构工作原理

图 2 为三臂回转式水稻钵苗移栽机构示意图,机构中 3 个移栽臂对称布置,行星架转动一周,可以完成 3 次移栽作业。本文以右下侧为例,说明移栽机构工作原理。太阳轮与机架固定,动力输入轴带动行星架顺时针转动,此时凹锁止弧 16 和凸锁止弧进入啮合状态,一级中间轮 17、二级中间轮 15 以及行星轮 18 相对于行星架静止,移栽臂 19 形成 ABCD 段夹持钵苗轨迹段;当凹凸锁止弧分离时,一级中间

轮 17 与太阳轮开始啮合,二级中间轮 15 与一级中间轮 17 同轴转动,从而带动与二级中间轮 15 啮合的行星轮 18,此时与行星轮 18 固连的移栽臂 19 开始转动并在轨迹最下端点 D 处推苗(地面以上),推苗完成后,行星架继续转动,移栽臂 19 的尖点形成 $DEFB$ 段回程轨迹和 BGA 段取苗轨迹,其中环扣最远点 G 为取苗位置。

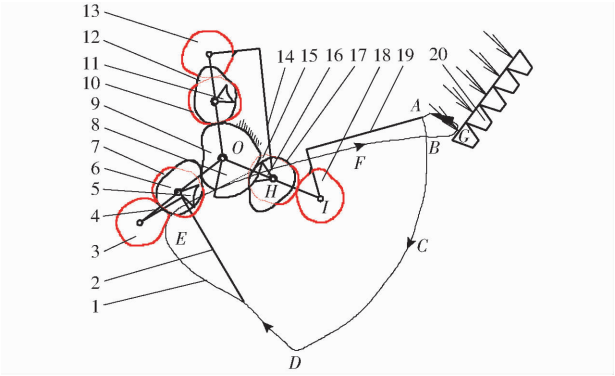


图 2 三臂回转式水稻钵苗移栽机构示意图
Fig.2 Schematic of transplanting mechanism of three-arm rotary rice seedling

1. 移栽轨迹 2、14、19. 移栽臂 3、13、18. 行星轮 4. 行星架
5、11、16. 凹锁止弧 6、12、17. 一级中间轮 7、10、15. 二级中间轮
8. 凸锁止弧 9. 太阳轮 20. 钵苗盘

2 移栽机构反求设计

2.1 相对运动轨迹关键点分析

将移栽机构模型转化为平面 2R 杆开链机构模型,移栽机构关键位置及移栽机构夹苗片尖点的相对运动轨迹如图 3 所示。以点 O 为原点、水平方向为 x 轴,垂直方向为 y 轴建立坐标系,其中点 G 为相对运动轨迹上距离行星架回转中心(原点 O)最远的点,如图 3b 所示,当移栽机构运行到该点时,杆 a 和杆 b 共线,取苗点 G 坐标为

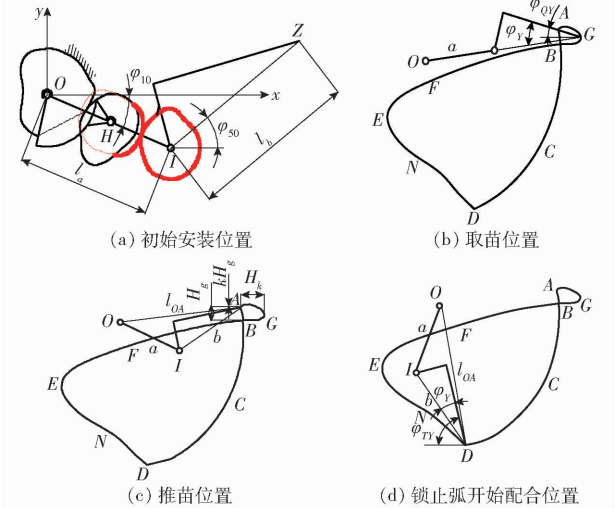


图 3 移栽机构关键位置

Fig.3 Key positions of transplanting mechanism

$$\begin{cases} x_G = (l_a + l_b) \cos(\varphi_Y - \varphi_{QY}) \\ y_G = (l_a + l_b) \sin(\varphi_Y - \varphi_{QY}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 l_a ——行星轮与太阳轮中心距,mm
 l_b ——夹苗片尖点到行星轮回转中心 I 的距离,mm
 φ_{QY} ——取苗角,rad
 φ_Y ——夹苗片所在直线和夹苗片尖点与行星轮回转中心 I 连线的夹角,rad

如图 3c 所示,根据几何关系求出锁止弧开始配合时点 A 的坐标为

$$\begin{cases} x_A = x_G - H_k \\ y_A = y_G + kH_g \end{cases} \quad (2)$$

式中 k ——小于 1 的系数,取 0.6
 H_k ——相对运动轨迹环扣宽度,mm
 H_g ——相对运动轨迹环扣高度,mm
点 A 到原点 O 的距离为

$$l_{OA} = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} \quad (3)$$

当移栽臂夹苗片尖点运动到相对运动轨迹点 A 时,太阳轮和一级中间轮脱离啮合,锁止弧开始配合,杆 a 和杆 b 之间没有相对转动(图 3d)。因此, AD 段相对运动轨迹为圆弧,则推苗点 D 的坐标为

$$\begin{cases} x_D = l_{OA} \cos \left(-\arccos \frac{l_{OA}^2 + l_b^2 - l_a^2}{2l_b l_{OA}} + \varphi_Y - \varphi_{TY} \right) \\ y_D = l_{OA} \sin \left(-\arccos \frac{l_{OA}^2 + l_b^2 - l_a^2}{2l_b l_{OA}} + \varphi_Y - \varphi_{TY} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ_{TY} ——推苗角,rad

2.2 局部相对运动轨迹与绝对运动轨迹关系
夹苗片尖点的相对位移方程为

$$\begin{cases} x_{ZXD} = l_a \cos(\varphi_{10} + \varphi_1) + l_b \cos(\varphi_{30} + \varphi_3) \\ y_{ZXD} = l_a \sin(\varphi_{10} + \varphi_1) + l_b \sin(\varphi_{30} + \varphi_3) \end{cases} \quad (5)$$

式中 φ_{10} ——初始时行星架角位移,rad
 φ_{30} ——初始时移栽臂角位移,rad
 φ_1 ——某一时刻行星架角位移,rad
 φ_3 ——某一时刻移栽臂角位移,rad
夹苗片尖点的绝对位移方程为

$$\begin{cases} x_{ZJD} = x_{ZXD} + \frac{3\varphi_1 l_z}{2\pi} \\ y_{ZJD} = y_{ZXD} \end{cases} \quad (6)$$

为便于计算,假设移栽机构绝对运动轨迹的回程轨迹为直线形,如图 1b 中 $D'E'$ 竖直线段所示,则直线段夹苗片尖点 Z 的绝对位移方程为

$$\begin{cases} x_{ZJD} = x_D \\ y_D \leq y_{ZJD} \leq y_D + 120 \end{cases} \quad (7)$$

结合式(5)~(7),基于 $D'E'$ 竖直线段绝对运动

轨迹可反求得到对应的局部相对运动轨迹,如图 4 中
线段 DM 所示。为保证移栽机构近似实现图 1b 较
理想绝对运动轨迹,在选取相对运动轨迹型值点时,
令相对运动轨迹的线段 DE 向线段 DM 左侧
(DNE_1)调整。其中,点 M 为局部相对运动轨迹的
最高点,点 M 和点 D 的垂直距离为 120 mm。

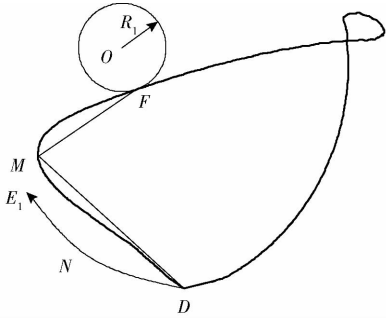


图 4 反求出的局部相对运动轨迹
Fig. 4 Local relative motion trajectory obtained
by inverse calculation

2.3 相对运动轨迹拟合

当机构关键参数与原机构取值相同时,通过局
部较理想绝对运动轨迹反求得到局部相对运动轨
迹,将其代替原移栽轨迹相应的局部轨迹,求得总
传动比如图 5 所示,总传动比曲线峰值过大,不利
于非圆齿轮齿廓生成,因此,需要对机构参数进行
重新求解。由于图 4 相对运动轨迹的 DMF 段的
形状决定了总传动比峰值,即 $\angle DMF$ 间接影响了
总传动比峰值,同时约束了 l_a 、 l_b 取值范围,所
以利用 $\angle DMF$ 辅助确定相对运动轨迹。参考原机
构参数及设计目标,初定 $\angle DMF = 78^\circ$,取苗角
 $\varphi_{QY} = 13^\circ$,推苗角 $\varphi_{TY} = 65^\circ$,环扣宽度 $H_k = 45$
mm,环扣高度 $H_g = 26$ mm, $l_a = 120$ mm, $l_b = 150$
mm, $R_1 = l_b - l_a$, $R_2 = l_b + l_a$ 。以 R_1 、 R_2 为
半径的圆弧应与拟合好的轨迹分别外切和内切,点
 F 和点 G 为切点。参考图 4 中 DNE_1 路径选择
6 个坐标点作为拟合局部相对运动轨迹的型值点,
在 EG 轨迹段选择 12 个型值点,在取苗段 GA
段选择 7 个型值点,其中点 G 为取苗点、点 A 为
锁止弧开始配合点和点 D 为推苗点。用三次 B
样条曲线拟合相对运动轨迹,如图 6 所示。由于持
苗阶段 AD 段轨迹为圆弧,不需要拟合该段轨迹。

2.4 传动比计算

用三次 B 样条曲线拟合出移栽机构夹苗片尖
点的相对运动轨迹,根据拟合好的相对运动轨迹,
反求出移栽机构行星轮旋转中心的位置,进而求
出行星架和移栽臂的角位移,行星架角位移变化
量和移栽臂角位移变化量比值即为该机构的总
传动比。

行星轮旋转中心 I 的坐标为

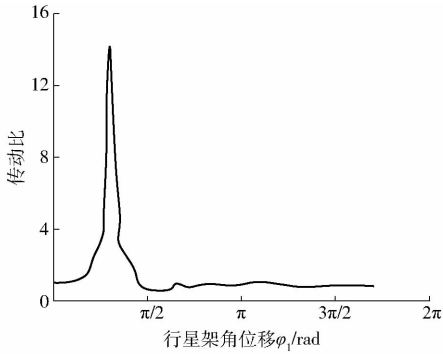


图 5 原机构参数下总传动比
Fig. 5 Total ratio under original mechanism parameters

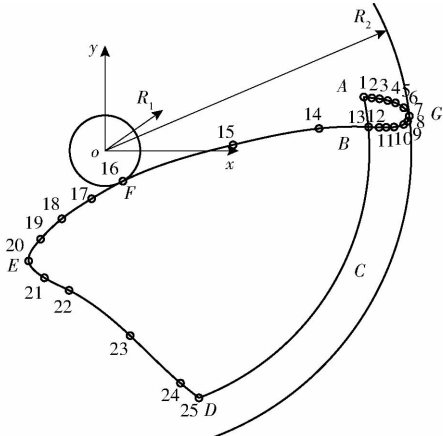


图 6 相对运动轨迹曲线
Fig. 6 Fitting relative motion trajectory

$$\begin{cases} x_I = k_1 - \frac{y_I}{x_A} \\ y_I = k_1 \pm \sqrt{\frac{4k_1^2}{x_A^2} - \frac{4k_1^2}{x_A y_A}} \end{cases} \quad (8)$$

其中

传动比为

$$i = \frac{d\varphi_5}{d\varphi_1} \quad (9)$$

其中

$$d\varphi_1 = d \left(\arctan \frac{y_I}{x_I} \right)$$
$$d\varphi_5 = d \left(\arctan \frac{y_Z - y_I}{x_Z - x_I} \right)$$

根据图 6 中相对运动轨迹反求移栽机构总传动
比,如图 7 中曲线 a 所示,在总传动比曲线上选取
25 个能表现传动比曲线变化规律的型值点,调整
传动比变化过大位置的型值点数值(传动比变化
过大,则非圆齿轮曲率半径变化过大,无法获得
齿廓^[20]),最后用三次 B 样条曲线拟合这 25 个
型值点,如图 7 中曲线 b 所示。

将总传动比分配到两级非圆齿轮传动中,初定
第 2 级传动比 i_{20} 为

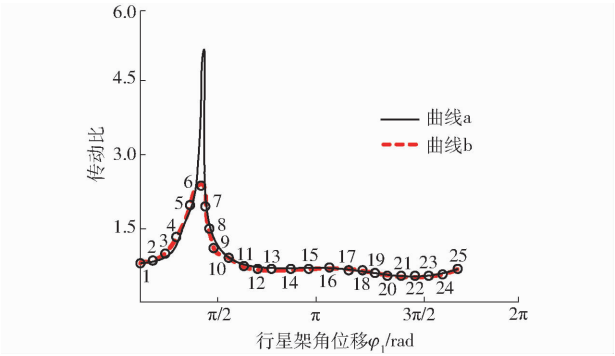


图 7 传动比调整前后曲线对比

Fig. 7 Comparison of transmission ratio before and after adjustment

$$i_{20} = \frac{\sqrt{2}}{2} i^{\frac{1}{3}} \tag{10}$$

在非圆齿轮的啮合传动过程中,单级非圆齿轮的主、从动轮节曲线作纯滚动,则只要保证主从动轮的节曲线周长相等,即可保证主从动轮同时旋转一周。为了实现这一目的,引入调整系数

$$k_2 = \frac{\int_0^{2\pi} \frac{1}{i_{20}} d\varphi_2}{2\pi} \tag{11}$$

式中 φ_2 ——中间齿轮角位移

第 2 级传动比 i_2 为

$$i_2 = k_2 i_{20} \tag{12}$$

第 1 级传动比 i_1 为

$$i_1 = \frac{i}{i_2} \tag{13}$$

节曲线方程的计算参考文献[19],本文不再赘述。

2.5 相对运动轨迹优化

基于 Matlab 编程软件,开发了水稻钵苗移栽机构的辅助分析与优化软件(图 8),主要包括打开、反求局部相对运动轨迹、拟合相对运动轨迹、拟合传动比、获取轨迹点及获取传动比点等命令按钮,数据点区用于输入相对运动轨迹型值点和总传动比型值点数据。输入初定机构参数和局部绝对运动轨迹数据,反求得到局部相对运动轨迹关键型值点;结合局部相对运动轨迹输入完整相对运动轨迹的 25 个型值点,拟合相对运动轨迹并生成总传动比数据,点击选取 25 个总传动比型值点并输入软件,拟合总传动比,通过人机交互的方式获得一组满足设计目标的运动轨迹及机构参数,进而完成机构结构设计。总传动比曲线的峰值、谷值以及波动程度变化对移栽相对运动轨迹的影响显著,因此,主要研究总传动比关键型值点变化对相对运动轨迹的影响,如图 9 所示。

图 9a 显示,调整传动比曲线的型值点 4~8 数

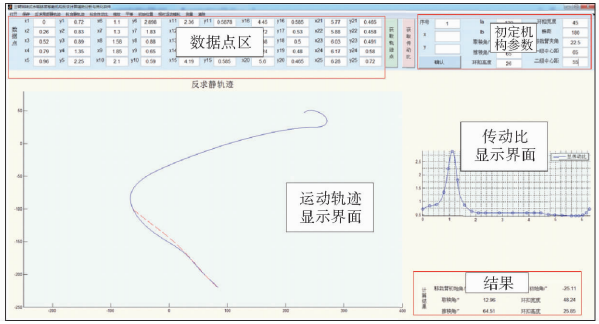


图 8 反求辅助设计软件界面

Fig. 8 Aided software interface of reverse design

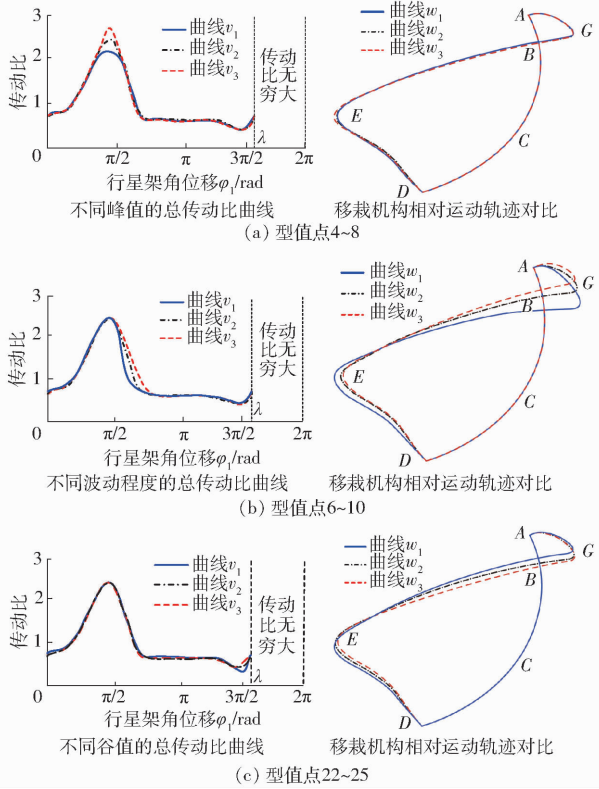


图 9 传动比对移栽相对运动轨迹的影响

Fig. 9 Influence of transmission ratio on transplanting static trajectory

值使峰值变大时,相对运动轨迹回程段越往左侧偏移(有利于减小绝对运动轨迹回程段前倾程度),BC 段轨迹略微下移,对移栽机构的相对运动轨迹右上角环扣形状影响不大。

图 9b 显示,调整传动比曲线的型值点 6~10 数值使曲线的波动程度由急到缓时,相对运动轨迹回程段越往右侧偏移(容易发生带苗现象),移栽机构的相对运动轨迹右上角的环扣高度(H_g)增大,取苗点位置降低。

图 9c 显示,调整传动比曲线的型值点 22~25 数值使曲线末端谷值变大时,相对运动轨迹回程段越往右侧偏移(容易发生带苗现象),取苗点位置升高,移栽轨迹右上角环扣高度(H_g)、宽度(H_k)变小。

综合上述参数的影响,围绕设计目标,通过人机

交互的方式获得一组较优参数： $l_a = 119\text{ mm}$, $l_b = 152\text{ mm}$, $H_g = 25.85\text{ mm}$, $H_k = 48.24\text{ mm}$, $\varphi_{QY} = 12.96^\circ$, $\varphi_{TY} = 64.51^\circ$, $\varphi_{10} = -25.11^\circ$, $\varphi_{50} = 37.19^\circ$, $l_z = 180\text{ mm}$ 。在这组参数下求得最终的相对运动轨迹、绝对运动轨迹、传动比曲线及齿轮节曲线如图 10 所示。理论结果显示,移栽机构绝对运动轨迹回程段位于秧苗位置竖直线左侧,导入 CAD 软件测得 $L_{D'E'} > 120\text{ mm}$,与原机构绝对运动轨迹(图 1c)相比,本文设计的移栽机构绝对运动轨迹不前倾,且推苗角增大到 64.51° ,理论上解决了原机构存在的问题。

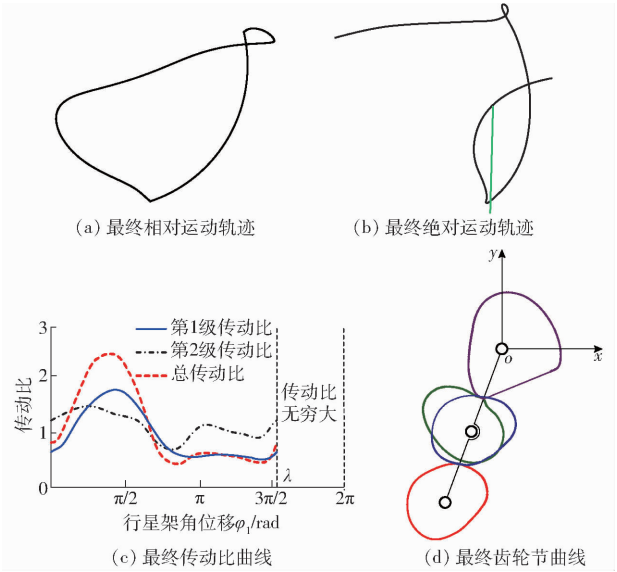


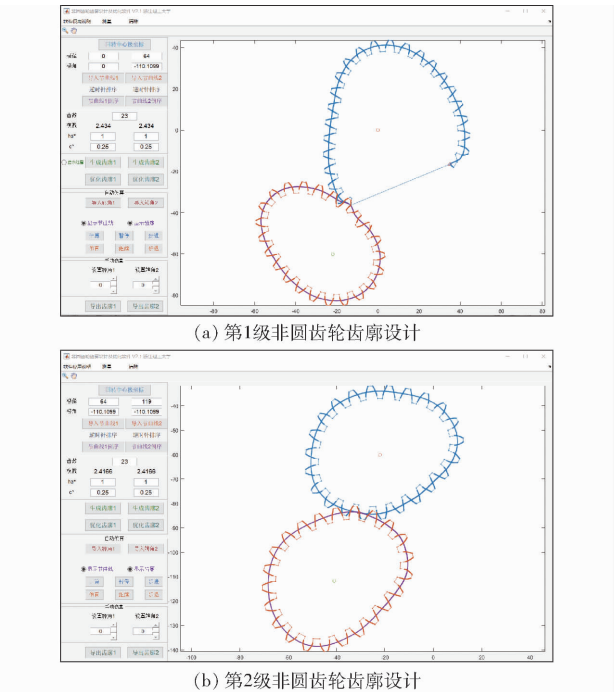
图 10 移栽机构最终优化结果

Fig.10 Final optimization results of transplanting mechanism

3 移栽机构虚拟仿真

根据反求设计得到满足设计要求的移栽机构各个齿轮节曲线和齿轮相对位置的参数,将各个齿轮节曲线数据导入自主开发的齿廓生成软件^[21-23],给定齿轮的齿数,得到各非圆齿轮的齿廓线数据(图 11);结合这些数据完成移栽机构的结构设计,运用三维建模软件 UG 12.0 对该机构各个零件进行三维实体建模和虚拟样机装配,利用 ADAMS 软件对移栽机构虚拟样机进行了相对运动和绝对运动仿真,绘制出移栽臂尖点的移栽轨迹,如图 12 所示。

由仿真结果可以看出虚拟仿真得到的相对运动轨迹与理论设计得到的相对运动轨迹基本重合,其中环扣部分轨迹不重合,主要原因是设计齿轮脱离啮合后,锁止弧的作用代替了被切除齿的传动,对齿轮起到了导向作用;轨迹下端部分轨迹不重合,主要原因是齿轮进入啮合前,缓冲弧的作用使得移栽臂提前发生了转动。此外,绝对运动轨迹回程段位于秧苗位置竖直线左侧,导入 CAD 软件测得 $L_{D'E'} > 120\text{ mm}$,即绝对运动轨迹回程段不前倾,虚拟样机



(a) 第1级非圆齿轮齿廓设计

(b) 第2级非圆齿轮齿廓设计

图 11 齿廓设计界面

Fig.11 Interface of profile design software

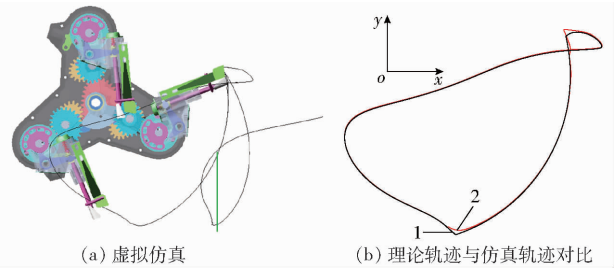


图 12 理论轨迹与仿真轨迹对比

Fig.12 Comparison between theoretical trajectory and simulation trajectory

1. 理论计算轨迹 2. 虚拟仿真轨迹

推秧角约 63.34° ,理论上验证了所设计机构解决了原机构绝对运动轨迹回程段前倾和推秧角偏小的问题。

4 样机试验

为了进一步验证反求设计方法正确性及所设计的移栽机构满足设计要求,研制了移栽机构物理样机,搭建了水稻钵苗移栽机构运动学试验平台(图 13a),并完成了轨迹与位姿验证试验和推苗试验。在进行轨迹验证时,设置移栽机构转速在 60 r/min 左右,采用高速摄影技术及 Blaster's MAS 图像分析软件分析移栽机构在运转时移栽臂夹苗片尖点的相对运动轨迹。在进行位姿验证时,采用 DMI410 数显倾角仪测量 3 个移栽臂在取苗和推苗位置时的姿态角(图 14),分别测量 3 组并分别计算推苗角和取苗角的角度差(简称取推苗角度差)。此外,开展了土槽试验台上的推苗效果试验,如

图 15 所示。

移栽机构轨迹高速摄影结果如图16所示,移栽

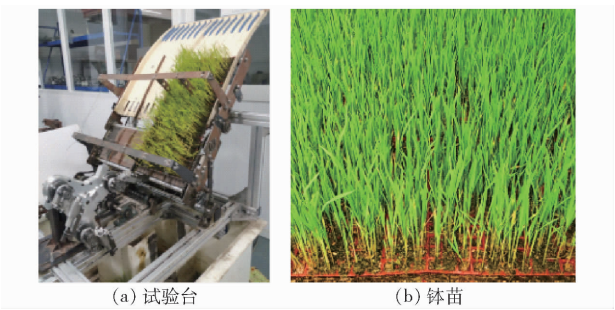


图 13 水稻钵苗移栽机构试验台与钵苗
Fig. 13 Test bench of rice seedling transplanting mechanism and rice seedling

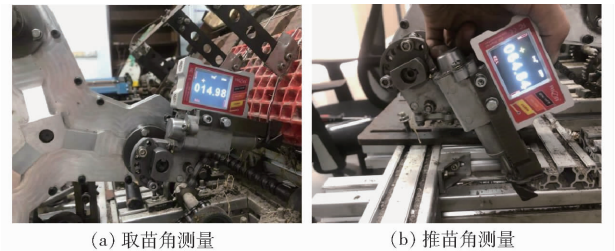


图 14 取苗、推苗角测量
Fig. 14 Measurement of taking-seedling and pushing-seedling angles

机构 3 个移栽臂的取苗角、推苗角、角度差实际测量结果如表 1 所示,并与理论计算、ADAMS 虚拟样机仿真结果及设计目标进行了对比。



图 15 推苗试验
Fig. 15 Tests of pushing-seedling

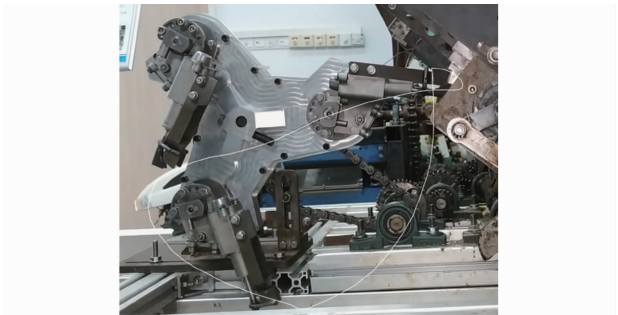


图 16 移栽机构试验轨迹
Fig. 16 Test trajectory of transplanting mechanism

表 1 移栽机构设计结果对比

Tab. 1 Comparison of transplanting mechanism design results

类型	取苗角/(°)			推苗角/(°)			取推苗角度差/(°)			秧箱安装角/(°)	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
设计目标		10 ~ 16			60 ~ 65			44 ~ 55			
理论设计值		12.96			64.51			51.55		50	
虚拟仿真值	13.22	13.87	14.25	63.34	63.54	64.13	50.12	49.67	49.88	50	
样机试验值	第1组	14.73	14.98	14.77	64.40	64.84	64.71	49.67	49.86	49.94	49
	第2组	14.64	15.01	14.60	64.51	64.80	64.68	49.87	49.79	50.08	49
	第3组	14.91	14.90	14.83	64.48	64.82	64.72	49.57	49.92	49.89	49

比较理论计算、虚拟样机仿真、高速摄影试验得到的相对运动轨迹结果,可以看出轨迹基本一致,在株距(移栽机前进速度相同)和行星架转速相同情况下,相对运动轨迹相同,则其绝对运动轨迹必相同。因此,根据理论计算、虚拟仿真及高速摄影试验中相对运动轨迹基本一致,可间接验证其实际作业与理论计算、虚拟仿真得到的绝对运动轨迹基本一致,即绝对运动轨迹回程段位于秧苗位置竖直线左侧, $L_{D'E'} > 120\text{ mm}$,解决了绝对运动轨迹前倾问题。由表 1 可知,同一组的 3 个移栽臂实际测量的取苗角、推苗角以及 3 个移栽臂的 3 组实际测量的取苗角、推苗角存在误差,误差均在 1°以内,其主要原因是非圆齿轮加工和装配存在误差,导致啮合时产生微小侧隙。但 3 个移栽臂取苗角、推苗角均在设计

目标范围内,验证了设计的合理性和有效性。与前期研发的 3 臂水稻钵苗移栽机构^[12]相比,本文所设计的移栽机构的推苗角提高了 9. 08°以上,取推苗角度差与秧箱实际安装角误差在 - 2° ~ 2°范围内,解决了推苗角偏小的问题。

5 结论

- (1)针对前期研发的三移栽臂水稻钵苗移栽机构应用中存在的问题,建立基于局部运动轨迹的反求设计模型,开发了基于 Matlab 的反求设计辅助分析软件,通过人机交互的方式获得一组满足设计要求的结构参数和相应参数下的运动轨迹,完成了三臂回转式水稻钵苗移栽机构改进设计。
- (2)搭建了运动学试验平台开展高速摄影试

验,通过比较理论计算、ADAMS 虚拟样机仿真与高速摄影试验得到的相对运动轨迹,得出了理论轨迹、虚拟仿真轨迹和实际运动轨迹基本一致的结论,验证了移栽机构反求设计的正确性。

(3)通过分析理论设计、虚拟样机仿真的结果,可知绝对运动轨迹回程段 $D'E'$ 高度 $L_{D'E'} > 120 \text{ mm}$ 、

3 个移栽臂实际推苗角(误差相差在 1° 以内)相对原机构提高了 9.08° 以上,取推苗角度差与秧箱实际安装角误差在 $\pm 2^\circ$ 以内,证明所设计机构解决了原机构移栽绝对运动轨迹前倾和推苗角偏小的问题,同时表明了移栽机构推苗直立度得以改善。

参 考 文 献

- [1] 许通.水稻钵苗摆栽机构设计与仿真[D].延吉:延边大学,2015.
XU Tong. Design and simulation of the rice seedling transplanting mechanism [D]. Yanji: Yanbian University, 2015. (in Chinese)
- [2] 郑鑫.旋转式水稻钵苗夹摆秧机构设计与仿真研究[D].延吉:延边大学,2015.
ZHENG Xin. Design and simulation study of rotation taking and placing rice potted-seedling mechanism [D]. Yanji: Yanbian University, 2015. (in Chinese)
- [3] FELEZI M E, VAHABI S, NARIMAN Z N. Pareto optimal design of reconfigurable rice seeding transplanting mechanisms using multi-objective genetic algorithm[J]. Neural Comput. & Applic., 2016, 27(7): 1907 – 1916.
- [4] 左彦军,曹鹏,赵匀,等. B 样条非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构的设计与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 10 – 17.
ZUO Yanjun, CAO Peng, ZHAO Yun, et al. Design and optimization of transplanting mechanism with B-spline non-circular planet gear train for rice pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 10 – 17. (in Chinese)
- [5] SUN Liang, MAO Shimin, ZHAO Yun, et al. Kinematic analysis of rotary transplanting mechanism for wide-narrow row pot seedlings[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 475 – 485.
- [6] ZHOU Maile, SUN Liang, DU Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of rice pot seedling transplanting mechanism with planetary bezier gears[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6): 1537 – 1548.
- [7] 俞高红,黄小艳,叶秉良.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. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16 – 22. (in Chinese)
- [8] 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的优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 47(11): 68 – 73. (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]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2017, 10(6): 43 – 55.
- [10] YE Bingliang, JIN Xuejun, YU Gaohong, et al. Parameter modification guiding optimization design and tests of arotary transplanting mechanism for rice plug seedlings[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(6): 863 – 873.
- [11] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100 – 108. (in Chinese)
- [12] 吴国环,俞高红,项筱洁,等.三移栽臂水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 15 – 22.
WU Guohuan, YU Gaohong, XIANG Xiaojie, et al. Design and test of rice potted-seedling transplanting mechanism with three transplanting arms[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 15 – 22. (in Chinese)
- [13] 陈建能,黄前泽,王英,等.钵苗移栽机非圆齿轮行星轮系栽植机构参数分析与反求[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 18 – 26.
CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Parametric analysis and inversion of transplanting mechanism with planetary non-circular gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 18 – 26. (in Chinese)
- [14] 赵雄,王川,杨茂祥,等.非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 30 – 36.
ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling pick-up mechanism with non-circular gear planetary train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30 – 36. (in Chinese)
- [15] 李革,应孔月,张继钊,等.基于秧针静轨迹的分插机构非圆齿轮求解[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1): 64 – 71.
LI Ge, YING Kongyue, ZHANG Jizhao, et al. Computation method of non-circular gear based on seedling needle tip point's static trajectory in transplanting mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 64 – 71. (in Chinese)
- [16] ZHAO X, CHU M, MA X, et al. Research on design method of non-circular planetary gear train transplanting mechanism based on precise poses and trajectory optimization[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(12): 1 – 12.

Chinese)

[23] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82 – 89.
LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82 – 89. (in Chinese)

[24] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21 – 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21 – 27. (in Chinese)

[25] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123 – 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 – 132. (in Chinese)

[26] 韩树杰,戚江涛,坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 101 – 108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101 – 108. (in Chinese)

[27] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 227 – 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227 – 235. (in Chinese)

[28] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 343 – 350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343 – 350. (in Chinese)

[29] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 140 – 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140 – 147. (in Chinese)

[30] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125 – 135.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 91 页)

[17] YE J, ZHAO X, WANG Y, et al. A novel planar motion generation method based on the synthesis of planetary gear train with non-circular gears[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(2): 4939 – 4949.

[18] 孙良,胡艺翔,邢子勤,等. 基于近似多位姿的轮系式钵苗移栽机构运动综合[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 103 – 111.  
SUN Liang, HU Yixiang, XING Ziqin, et al. Motion synthesis of rotary pot seedling transplanting mechanism based on approximate multi-pose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 103 – 111. (in Chinese)

[19] 吴国环,俞高红,叶秉良,等. 行星轮系水稻钵苗移栽机构正反求设计方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 85 – 93, 102.  
WU Guohuan, YU Gaohong, YE Bingliang, et al. Forward-reverse design method for rice potted-seedling transplanting mechanism with compound planetary gear train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 85 – 93, 102. (in Chinese)

[20] 华瑶. 基于二次不等幅传动比行星轮系取苗机构的研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.  
HUA Yao. Research of planetary gear train seedling pic-up mechanism based on two-unequal-amplitude transmission ratio[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)

[21] MUNDO D. Geometric design of a planetary gear train with non-circular gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(4): 456 – 472.

[22] 谭伟明,梁燕飞,安军,等. 渐开线非圆齿轮的齿廓曲线数学模型[J]. 机械工程学报, 2005, 38(5): 75 – 79.  
TAN Weiming, LIANG Yanfei, AN Jun, et al. Mathematical model for tooth profile of non-circular in volute gears[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 38(5): 75 – 79. (in Chinese)

[23] 刘大伟,任廷志. 由补偿法构建封闭非圆齿轮节曲线[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 147 – 152.  
LIU Dawei, REN Tingzhi. Creating pitch curve of closed non-circular gear by compensation method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 147 – 152. (in Chinese)

[24] CHEN Zaigang, SHAO Yimin. Mesh stiffness of a internal spur gear pair with ring gear rim deformation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 69: 1 – 12.