

非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计与试验

叶秉良^{1,2} 吴国环³ 俞高红^{1,2} 金学军^{1,2} 孙良^{1,2}

(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;
3. 温州职业技术学院, 温州 325035)

摘要: 针对现有水稻钵苗移栽机构结构复杂、成本高或工作效率低、振动大等问题,提出一种由1个不完全非圆齿轮、6个非圆齿轮和2个移栽臂组成的非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构。分析了该移栽机构的工作机理,采用一种基于人机交互的参数优化方法,编制移栽机构的优化设计软件,得到一组实现水稻钵苗移栽较优工作轨迹和姿态的机构参数。建立移栽机构虚拟样机,研制移栽机构物理样机,开展虚拟样机运动仿真分析和物理样机高速摄影运动学试验,得到机构移栽臂的秧针尖点静轨迹和姿态。理论计算和实际测量得到的推秧角与取秧角角度差分别为53.52°与52.53°,误差为1.45%;仿真分析、试验测试结果与理论分析结果基本一致,验证了移栽机构设计方法和结果的正确性,以及机构应用于实际机器的可行性。

关键词: 水稻钵苗移栽机; 移栽机构; 非圆齿轮; 优化设计; 高速摄像

中图分类号: S223.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0068-06

Optimized Design and Tests on Rice Potted Seedling Transplanting Mechanism of Planetary Gear Train with Non-circular Gears

Ye Bingliang^{1,2} Wu Guohuan³ Yu Gaohong^{1,2} Jin Xuejun^{1,2} Sun Liang^{1,2}

(1. College of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
3. Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

Abstract: The technology of rice potted seedling transplanting can realize high yield, which has advantages of shallow planting, less damage on the seedlings, fast recovery, low and early tiller and high efficiency. Foreign rice potted seedling planting technology is not suitable in China for complicated structure and high cost problem. And there are defects for domestic transplanter with low efficiency, heavy vibration, and tossing transplantation with uncontrollable seedling perpendicularity. A new type of rice potted seedling transplanting mechanism of non-circular planetary gear train with one uncompleted non-circular gear, six non-circular gears and two transplanting arms was presented on the basis of analysis of the shortcomings of the existing rice potted seedling transplanter at home and abroad. The working principle of rice potted seedling transplanting mechanism was introduced, and the parameter optimization method of human-computer interaction optimization was proposed. The analysis and optimization software of the transplanting mechanism was self-developed and used to obtain a set of mechanism parameters for realizing better working trajectory and posture. The virtual prototype and physical prototype of the transplanting mechanism were developed to conduct virtual kinematic simulation analysis and kinematic tests with high-speed photography technology on the test-bed, and the static trajectory and posture of the

收稿日期: 2016-03-24 修回日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275478, 51575495)、浙江省自然科学基金项目(LR12E05002)、浙江省公益技术研究农业项目(2015C32060)、浙江理工大学科研创新团队专项和浙江理工大学“521 人才培养计划”项目

作者简介: 叶秉良(1972—),男,教授,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

通信作者: 俞高红(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事农业种植机械设计与机构学研究, E-mail: yugh@zstu.edu.cn

seedling needle of the transplanting arm were obtained. The results of the simulation analysis, bench test and theoretical analysis are almost consistent, which shows the correctness of the design method and results and the application feasibility of the transplanting mechanism.

Key words: rice potted seedling transplanter; transplanting mechanism; non-circular gear; optimization design; high-speed video

引言

水稻钵苗移栽技术具有植苗伤苗少、返苗快、有效分蘖多、根系发达、增产效果好等优点,故与该技术相适应的水稻钵苗移栽机械也成为国内外相关学者的研究重点。目前日本所研制的水稻钵苗栽植机价格高,其移栽机构结构复杂,并且采用高成本的半硬塑胶穴盘,育苗要求也高,不适合在国内推广应用。吉林省延吉市光华机械厂公开的一种多杆式组合移栽机构^[1]和吉林鑫华裕农业装备有限公司研制的一种五杆式双曲柄水稻钵苗移栽机构^[2]均存在工作效率低(单行 80 株/min)、振动大的问题,并且受结构限制,移栽效率很难再提高^[2-9]。浙江理工大学农业机械研究所研制出顶出式抛秧机构^[10]和旋转式移栽机构^[11-14],其中顶出式抛秧机构经常出现秧根挂在钵盘上导致顶秧(分苗)失败,已顶出的钵苗不能顺利落下;另外一种由 5 个齿轮所组成的行星轮系旋转式水稻钵苗移栽机构^[13,15]由于受到工作轨迹和移栽姿态的优化空间限制,移栽机构的推秧角还不够大,推秧效果还未达到最佳;同时,推秧角和取秧角的角度差不够大还会导致秧苗的直立度受到影响。因此,本文提出一种由 7 个齿轮组成的非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构,使移栽机构不仅能满足移栽臂的姿态和工作轨迹的要求,还能获得更理想的推秧角以及推秧角和取秧角的角度差,能够进一步提高秧苗栽植效果。通过开展机构运动仿真与试验,验证机构设计的正确性和可行性,以及移栽机构良好的工作性能。

1 移栽机构工作原理

如图 1 所示,非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构由 1 个不完全非圆齿轮、6 个非圆齿轮和 2 个移栽臂组成,太阳轮 6 固定于机架,第一中间非圆齿轮 3 和第二中间非圆齿轮 4 同轴固结,且分别与太阳轮 6 和行星轮 2 啮合,在行星架 7 的带动下带动行星椭圆齿轮 2 实现非匀速转动。以一侧齿轮结构为例,机构在工作时,行星架 7 绕 O 点顺时针匀速转动,当第一中间非圆齿轮 3 转动到太阳轮 6 的无齿部分时,太阳轮 6 上的凸锁止弧 5 与凹锁止弧 13 进入啮合状态,第一中间非圆齿轮 3、第二中间非圆齿

轮 4 和行星椭圆齿轮 2 相对行星架 7 静止,即移栽臂 14 相对行星架 7 不动,形成相对于行星架的间歇运动,移栽臂 14 的尖点形成 ACD 段持苗轨迹;当凹锁止弧 13 与凸锁止弧 5 分离时,第一中间非圆齿轮 3 与不完全非圆齿轮 6 的有齿部分开始啮合,此时与之同轴固连的第二中间非圆齿轮 4 转动后带动行星椭圆齿轮 2 开始转动,与行星椭圆齿轮 2 同轴固连的凸轮也跟着转动,凸轮与拨叉脱离则拨叉在弹簧的作用下在 D 点前完成推苗作业;推苗完成后,移栽臂 14 在行星架 7 带动下开始非匀速运动,移栽臂 14 尖点形成 DEB 回程轨迹和 BGA 段取苗轨迹;当移栽臂 14 处于取苗阶段时,凸轮转动压紧拨叉使推秧杆往回运动从而带动秧针闭合夹取秧苗^[16]。

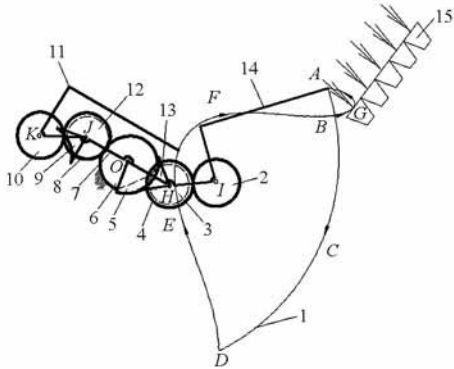


图 1 非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构传动示意图
Fig. 1 Transmission schematic of rice potted seedling transplanting mechanism of planetary gear train with non-circular gears

- 1. 移栽静轨迹 2、10. 行星椭圆齿轮 3、12. 第一中间非圆齿轮 4、8. 第二中间非圆齿轮 (椭圆齿轮) 5. 凸锁止弧 6. 太阳轮 (不完全非圆齿轮) 7. 行星架 9、13. 凹锁止弧 11、14. 移栽臂 15. 水稻钵苗盘

2 移栽机构运动学建模

如图 2 所示,以太阳轮 5 的中心为坐标原点 O,建立坐标系 XOY。由于水稻钵苗移栽机构是对称结构(如图 1),故以其一侧为例进行运动学模型的建立。太阳轮 5 固定不动,行星架 6 从初始位置开始绕 O 点做顺时针匀速转动^[17]。图 2a 所示为机构的初始位置,图 2b 为行星架 6 从初始位置开始转过角度 φ_1 时,机构的运动位置状态(规定逆时针转动为正)。构造第一中间非圆齿轮节曲线表达式为

$R_2(\varphi_2) = \frac{a(b + \sqrt{1 + c\cos\varphi_2})}{d\sqrt{1 + c\cos\varphi_2}}$, 其中 a 、 b 、 c 和 d 均为该齿轮节曲线系数; 第二中间非圆齿轮 (椭圆齿轮) 节曲线半径 $R_3(\varphi_2) = \frac{b^2}{a - c\cos(\varphi_2 - \delta)}$, 非圆齿轮节曲线模型和运动学模型的详细推导过程如下。

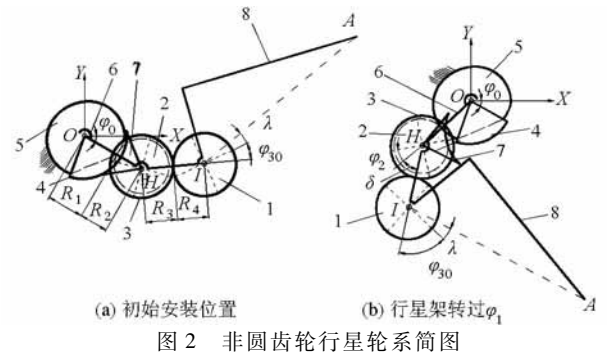


Fig. 2 Diagrams of planetary gear train with non-circular gears
1. 行星椭圆齿轮 2. 第二中间非圆齿轮 3. 第一中间非圆齿轮
4. 凸锁止弧 5. 不完全非圆齿轮 (太阳轮) 6. 行星架 7. 凹锁止弧 8. 移栽臂

参考文献[18], 可推导得出

$$\varphi_1 = \int_0^{\varphi_2} \frac{a(b + \sqrt{1 + c\cos\varphi_2})}{L_1 d \sqrt{1 + c\cos\varphi_2} - a(b + \sqrt{1 + c\cos\varphi_2})} d\varphi_2 \quad (1)$$

式(1)中, 当 $\varphi_1 = \alpha$ 时, $\varphi_2 = 2\pi$ 。当行星架顺时针转过 α , 同时 a 、 b 、 c 、 d 参数确定时, 通过数值积分, 不完全非圆齿轮与中间非圆齿轮的中心距 L_1 便可以确定。求解框图如图 3 所示, 利用黄金分割法求解。

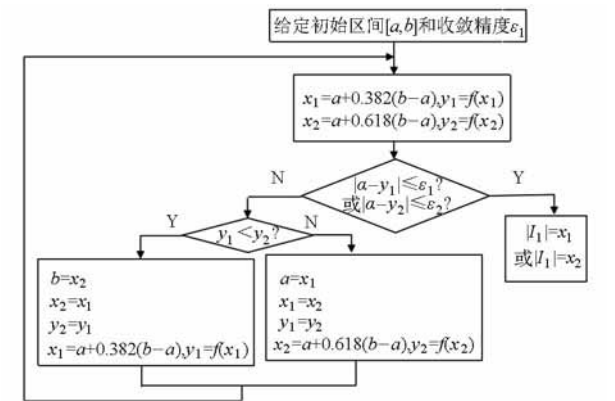


Fig. 3 Flow chart of golden section to center distance

设

$$f(\varphi_2) = \int_0^{\varphi_2} \frac{a(b + \sqrt{1 + c\cos\varphi_2})}{L_1 d \sqrt{1 + c\cos\varphi_2} - a(b + \sqrt{1 + c\cos\varphi_2})} d\varphi_2 \quad (2)$$

则有 $\varphi_1 = f(\varphi_2)$ 。中间非圆齿轮相对于行星架转过的角度 φ_2 为

$$\varphi_2 = \begin{cases} \frac{1}{f(\varphi_1)} & (0 \leq \varphi_1 \leq \alpha) \\ 2\pi & (\alpha \leq \varphi_1 \leq 2\pi) \end{cases} \quad (3)$$

利用数值计算的方法建立 φ_1 和 φ_2 的关系求解 φ_2 , 数值计算流程图如图 4 所示。

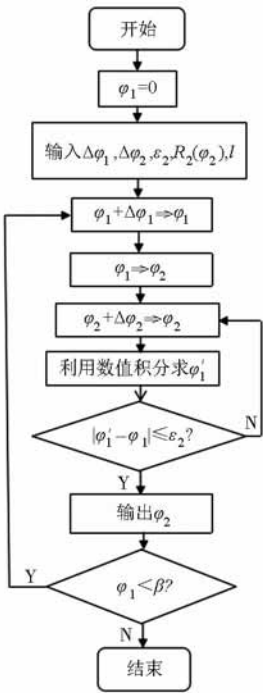


Fig. 4 Flow chart of numeral calculation

行星齿轮节曲线方程模型 R_4 、行星椭圆齿轮相对行星架角位移 φ_3 和行星椭圆齿轮相对行星架初始角位移 φ_{30} 的求解过程参照文献[15, 19]。

第一中间非圆齿轮旋转中心 H 的位移方程为

$$\begin{cases} x_H = L_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) \\ y_H = L_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) \end{cases} \quad (4)$$

行星椭圆齿轮旋转中心 I 位移方程

$$\begin{cases} x_I = x_H + L_2 \cos(\delta + \varphi_0 + \varphi_1) \\ y_I = y_H + L_2 \sin(\delta + \varphi_0 + \varphi_1) \end{cases} \quad (5)$$

秧针尖点 A 的位移方程

$$\begin{cases} x_A = x_I + S \cos(\lambda + \delta + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_{30} + \varphi_3) \\ y_A = y_I + S \sin(\lambda + \delta + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_{30} + \varphi_3) \end{cases} \quad (6)$$

式中 L_1 ——不完全非圆齿轮与第一中间非圆齿轮之间的中心距

L_2 ——第一中间非圆齿轮与行星椭圆齿轮之间的中心距

φ_0 ——行星架初始角位移, $\varphi_0 < 0$

φ_1 ——某一时刻行星架转过的角位移, $\varphi_1 < 0$

δ ——行星架 OH 和 HI 的夹角

λ ——行星椭圆齿轮中心 I 和秧针尖点 A 之间的连线 IA 与行星椭圆长轴间的夹角

S ——行星椭圆齿轮中心 I 到秧针尖点 A 距离

3 移栽机构参数优化

3.1 优化目标和变量

为了获得较好的轨迹与姿态,保证移栽机构具有优良的作业性能,以取秧环扣大小、取秧角、推秧角、取秧角与推秧角角度差等因素为优化目标,利用 Visual Basic 可视化平台设计了非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构设计参数优化软件^[20-21],人机交互主界面如图 5 所示。优化目标具体要求如下:运动过程中移栽臂不能相互干涉;环扣宽度在 25 ~ 35 mm 之间;环扣高度在 25 ~ 30 mm 之间;取秧角在 5° ~ 12°之间;推秧角在 55° ~ 65°之间;推秧角与取秧角的角度差在 45° ~ 55°之间;移栽静轨迹的高度大于 260 mm。

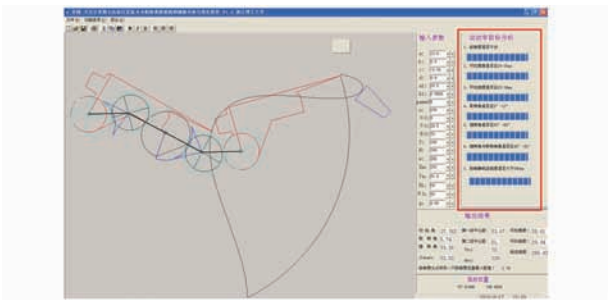
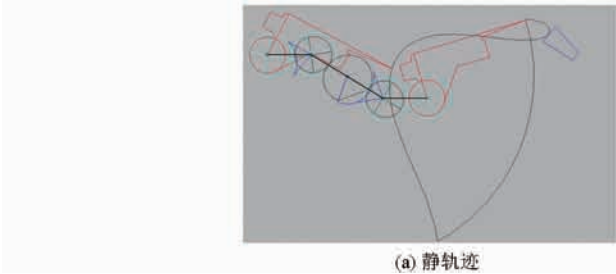


图 5 水稻钵苗移栽机构优化设计软件主界面
Fig.5 Main interface of optimized design software with rice potted seedling transplanting mechanism

将以上优化目标数值化,通过蓝色进度条直观定性地显示出来,蓝色进度条格子越多,说明优化越



接近目标。优化变量包括第一中间齿轮的节曲线参数 a 、 b 、 c 、 d ,第二中间齿轮节曲线参数 a_1 、 b_1 、 k_1 ,行星架初始角位移 φ_0 ,行星椭圆齿轮中心 I 和秧针尖点 A 之间的连线 IA 与行星椭圆长轴间的夹角 δ ,行星架 OH 和 HI 的夹角 λ ,行星轮旋转中心 I 到秧针尖点的距离 S 等。

3.2 参数优化步骤与结果

- 参数优化的过程如下:
- (1)初步给定各个参数的初始值,获得初始工作轨迹与优化目标值。
 - (2)借助专家经验,不断调整各个参数值,观察运动学优化目标优化进度,蓝色进度条格子数越多表示越满足优化要求。

根据以上步骤,利用人机交互的方式得到一组较优的机构参数: $a = 13.6$; $b = 0.5$; $c = -0.58$; $d = 0.9$; $a_1 = 25.5$; $k = 0.992\ 8$; $\lambda = 5^\circ$; $\alpha = 278^\circ$; $\varphi_{30} = 5^\circ$; $\delta = 29.5^\circ$; $S = 160\text{ mm}$ 。

优化后的移栽静轨迹和动轨迹如图 6 所示。该动轨迹为株距 200 mm 的情况下,移栽机构在运动时移栽臂秧针尖点的轨迹,即通过动轨迹可以看出移栽机在田间移动时移栽臂运动情况。

根据参数优化得到可保证理想移栽姿态的移栽静轨迹,其中关键的几个优化目标结果如表 1 所示。

非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构与椭圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构^[11]的取秧角、推秧角和角度差优化结果如表 2 所示。

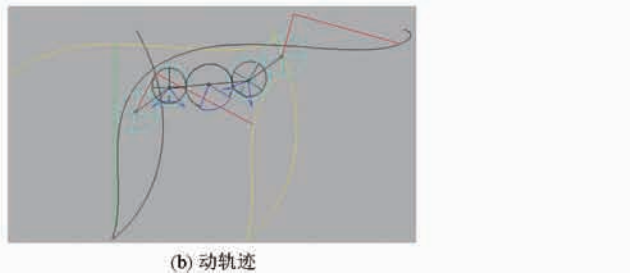


图 6 优化后移栽轨迹
Fig.6 Optimized transplanting trajectory

表 1 优化目标结果			
Tab.1 Results of optimization target			
优化参数	数值	优化参数	数值
取秧角/(°)	5.74	环扣高度/mm	29.94
推秧角/(°)	59.26	环扣宽度/mm	28.61
角度差/(°)	53.52	轨迹高度/mm	286.42

由表 2 可知,本文移栽机构的推秧角比椭圆齿轮水稻钵苗移栽机构更大,推秧效果会更好。

4 移栽机构结构设计和样机试验

根据前面优化设计得到行星轮系中各个齿轮的

表 2 角度优化结果		
Tab.2 Optimization results of angle		
参数	非圆齿轮行星轮系 水稻钵苗移栽机构	椭圆齿轮行星轮系 水稻钵苗移栽机构
取秧角/(°)	5.74	8.83
推秧角/(°)	59.26	56.27
角度差/(°)	53.52	47.44

节曲线数据点,开发“非圆齿廓造齿软件”计算得到每个齿轮轮廓线数据点坐标,在 CAD 中用样条曲线绘制;根据优化设计得到的各齿轮中心距等相关结构参数并结合移栽机构的整体结构设计出机构齿轮

箱体及其他部件结构,最后进行二维图及三维虚拟样机绘制。

4.1 缓冲装置设计

由于理论计算得到的移栽静轨迹下端为尖点,推秧在最低点进行,根据实际情况可知在最低点推秧太晚,秧苗直立性大大降低;同时,由于该非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构是利用不完全非圆齿轮和凹凸锁止弧形成间歇运动,在机构的运行过程中,由于凹凸锁止弧在啮合分离时,中间非圆齿轮与不完全非圆齿轮突然啮合会产生较大的冲击,受力突然增加,影响机构的平稳性。因此,移栽机构设计中需要增加一套缓冲装置,在凹凸锁止弧分离之前,缓冲装置开始接触作用,减小凹凸锁止弧啮合分离时第一级齿轮的刚性冲击,提高机构的工作稳性。缓冲装置作用图如图 7 所示。由于增加了缓冲装置,太阳轮缓冲弧取代了不完全非圆齿轮的一个齿的啮合作用,并且在缓冲弧尚未完全分离时太阳轮和中间轮的第 2 个齿即将进入啮合,故使得传动跨度增大,提前了移栽机构移栽臂推秧的时刻,同时移栽轨迹下端的尖点变为圆弧,进一步改善了推秧效果,增加缓冲装置后移栽轨迹如图 8 中曲线 2 所示。

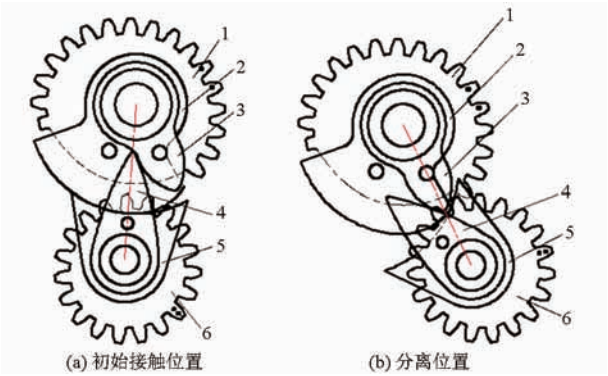


图 7 缓冲装置作用图

Fig. 7 Effect diagrams of cushioning device

1. 不完全非圆齿轮 2. 凸锁止弧 3. 太阳轮缓冲弧 4. 中间轮缓冲弧 5. 凹锁止弧 6. 第一中间非圆齿轮

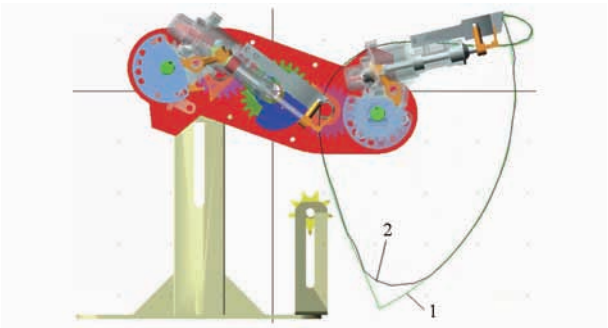


图 8 移栽机构虚拟仿真与理论计算分析秧针尖点轨迹比较

Fig. 8 Comparison of theoretical and simulation trajectories

4.2 移栽机构虚拟样机仿真

利用 ADAMS 软件对移栽机构进行虚拟仿真,设置电动机转速为 360 r/s,仿真时间为 1 s,步长为 200 步。移栽机构虚拟运动仿真得到秧针移栽静轨迹后,将理论计算得到的移栽静轨迹导入 ADAMS 与之进行对比。图 8 中轨迹 1 为理论计算得到的移栽静轨迹,轨迹 2 为仿真得到的静轨迹。从图中可以看到虚拟仿真分析与理论计算所得到的移栽静轨迹基本一致,因此可以初步确定该非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构设计的正确性。由于添加了缓冲装置,机构运秧到推秧再到回程段时其移栽静轨迹下端为圆弧而不是尖点,而理论计算时未添加缓冲装置。

4.3 水稻钵苗移栽机构样机试验

为了进一步验证该非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构的实际可行性和工作性能的可靠性,缩短机构研发周期,开展了机构的虚拟样机仿真分析;加工移栽机构零件装配得到物理样机,安装到试验台上进行机构运动学试验,利用高速摄像设备获得了移栽机构秧针尖点的运动轨迹和姿态;将仿真分析、理论分析和台架试验的结果进行比较,验证了机构设计方法和结果的正确性,以及机构的实际应用性。

将物理样机安装在试验台上完成高速摄像运动学试验,通过 Blaster's MAS 图像分析软件分析绘制移栽机构静轨迹,如图 9a 所示。将该轨迹与图 9b 所示的机构运动学仿真分析获得的机构移栽静轨迹进行对比可知,仿真分析与高速摄像试验所得到的移栽静轨迹基本一致。

记移栽臂上的秧针尖点处于最高点时(即移栽机构处于初始安装位置时)行星架转角为零,推秧杆推程为零,通过试验得到移栽臂在行星架顺时针转过约 75°时开始推苗,行星架转角约 90°时推苗结束,推秧杆行程为 27 mm;移栽臂在行星架顺时针转过约 298°时(移栽臂弹簧上的夹秧弹簧片尖点位于移栽静轨迹最右边时)开始夹紧秧苗,行星架转角约 325°时取苗结束。

在移栽机构的移栽臂分别处于取秧和推秧位置时,将 DMI410 型单轴数显倾角仪放置于移栽臂秧针弹簧片上方分别测量得到取秧角和推秧角,并与理论计算得到的取秧角和推秧角进行比较,如表 3 所示。理论计算得到的角度差为 53.52°,实际测量得到的角度差为 52.53°,误差为 1.45%;移栽机构的设计关键在于移栽轨迹和移栽臂姿态即推秧角和取秧角,以及两者的角度差,实际试验过程中秧箱倾角(秧箱与

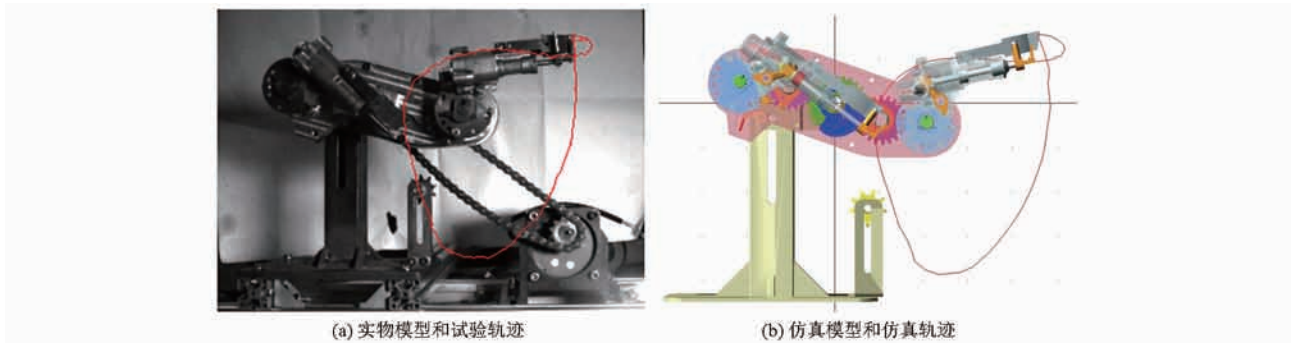


图 9 仿真轨迹和试验轨迹对比

Fig.9 Comparison sketches of simulation trajectory and test trajectory

水平夹角)为 52° 左右,为了保证推秧时秧苗的直立性,要求推秧角与取秧角的角度差值约等于秧箱倾角,故该机构在理论上可以保证推秧时秧苗的直立性。

表 3 理论计算和实际测量的比较

Tab.3 Comparison of theoretical calculation and actual measurement (°)

	取秧角	推秧角	角度差
实际测量	7.63	60.16	52.53
理论计算	5.74	59.26	53.52

综上分析,非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构的设计方法和结果是正确的,并且具有实际应用的可行性。

5 结论

(1)分析了现有旋转式移栽机构的机构特点,提出一种由 7 个齿轮组成的新型非圆齿轮水稻钵苗移栽机构,并增加了一套缓冲装置。该移栽机构具有较优的移栽工作轨迹和姿态,其理论推秧角达到 59.26° ,推秧角与取秧角的角度差为 53.52° ,改善了推秧效果,能够提高秧苗直立度。

(2)通过移栽机构虚拟样机仿真分析、物理样机台架试验,得到机构样机的移栽臂尖点的静轨迹和姿态,并与理论计算所得到的移栽静轨迹和姿态进行比较和分析,验证了非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计方法和结果的正确性,表明移栽机构具有应用于实际机器的可行性。

参 考 文 献

1 陈邦仁. 水稻钵苗移栽机:中国,CN2696293[P]. 2005-05-04.

2 潘显武,孔令有. 高速钵苗水稻插秧机栽插部总成:中国,CN201854564U[P]. 2011-06-08.

3 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):1175-1188.

4 BAE Kang-Yul, YANG Young-Soo. Design of a non-circular planetary-gear-train system to generate an optimal trajectory in a rice transplanter[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(4):361-372.

5 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)

6 宋建农,刘小伟,庄乃生,等. 水稻钵苗行栽机试验[J]. 江苏大学学报,2005,26(3):189-192.

SONG Jiannong, LIU Xiaowei, ZHUANG Naisheng, et al. Experimental study on rice potted-seedling transplanter[J]. Journal of Jiangsu University, 2005,26(3):189-192. (in Chinese)

7 EDATHIPARAMBIL Vareded Thomas. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002,37(4):395-410.

8 陈恒高,田金和,宋来田,等. 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, et al. Study on rice seedling throwing transplanter of manipulator type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1998,29(3):48-52. (in Chinese)

9 吕亚洲. 我国水稻栽插机械发展介绍[J]. 农业机械,2009(3):76-79.

10 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)

11 俞亚新,骆春晓,俞高红,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星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 Gao hong, 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)

virtual prototype [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 47–53. (in Chinese)

12 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 23–30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 23–30. (in Chinese)

13 童俊华, 蒋焕煜, 蒋卓华, 等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 8–16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 8–16. (in Chinese)

14 童俊华, 蒋焕煜, 周鸣川. 基于遗传算法的穴盘苗自动移钵路径优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 45–49, 26.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan. Optimization of seedling transplanting path based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 45–49, 26. (in Chinese)

15 吴俭敏, 颜华, 金鑫, 等. 移栽机送盘装置与定位控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 14–18.
WU Jianmin, YAN Hua, JIN Xin, et al. Research on disk conveying device and positioning control system for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 14–18. (in Chinese)

16 童俊华, 蒋焕煜, 武传宇. 基于贪心算法的温室钵苗稀植移栽路径优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 8–13.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, WU Chuanyu. Optimization of seedlings lower density transplanting path based on greedy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 8–13. (in Chinese)

17 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24–28.
HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24–28. (in Chinese)

18 缪小花, 毛罕平, 韩绿化, 等. 黄瓜穴盘苗拉拔力及钵体抗压性能影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 27–32.
MIAO Xiaohua, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Analysis of influencing factors on force of picking plug seedlings and pressure resistance of plug seedlings [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 27–32. (in Chinese)

19 NGUYEN Kim Doang, NG Teck-Chew, CHEN I-Ming. On algorithms for planning S-curve motion profiles [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(1): 99–106.

20 YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings [J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(4): 493–498.

~~~~~

(上接第 73 页)

12 代丽, 孙良, 赵雄, 等. 基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 35–42.  
DAI Li, SUN Liang, ZHAO Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 35–42. (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 李丽. 水稻钵苗移栽机构的优化设计及试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.

15 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)

16 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 45–52. (in Chinese)

17 吴国环. 非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构的优化设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.

18 王林伟. 非圆齿轮行星系水稻钵苗移栽机构的参数优化与设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.

19 黄小艳. 旋转式水稻钵苗移栽机构的参数优化与设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.

20 李革, 陈孝明, 俞高红, 等. 基于 VB 的旋转式分插机构运动干涉判别方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 44–47.  
LI Ge, CHEN Xiaoming, YU Gaohong, et al. Distinguishing method for motion interference of rotary transplanting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 44–47. (in Chinese)

21 李革, 赵匀, 俞高红. 椭圆齿轮行星系分插机构的机理分析和计算机优化[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 78–81.  
LI Ge, ZHAO Yun, YU Gaohong. Theoretical analysis and parameters optimizing of separating-planting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 78–81. (in Chinese)