

夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验

俞高红^{1,2} 金也^{1,2} 常数数^{1,2} 叶秉良^{1,2} 顾锦波³ 赵雄^{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. 浙江小精农机制造有限公司, 绍兴 312000)

摘要: 针对夹钵式水稻钵苗移栽机构取苗易失败,以及推秧爪推秧不充分影响钵苗直立度等问题,根据水稻钵苗移栽机构的工作要求,提出了一种夹钵式水稻钵苗移栽机构。基于 Visual Basic 6.0 开发了移栽机构辅助分析优化软件,分析了主要参数对移栽轨迹的影响,通过人机交互方式得到了一组满足移栽工作要求的机构参数。根据得到的机构参数,完成移栽机构的结构设计,进行了移栽机构的虚拟仿真分析,验证了移栽机构理论设计的正确性。设计了水稻钵苗移栽试验台并进行了移栽机构取苗试验,移栽机构回转速度设定为 50 r/min 时,平均取苗成功率为 93.06%,当转速为 80 r/min 时,平均取苗成功率为 88.89%,取苗成功率随着转速的提高而降低。研究表明,该机构具有较高的取苗效率和取苗成功率,可应用于水稻钵苗移栽机。

关键词: 水稻钵苗; 夹钵式; 移栽机构; 试验

中图分类号: S223.9; TH132.424 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0100-09

Design and Test of Clipping-plug Type Transplanting Mechanism of Rice Plug-seedling

YU Gaohong^{1,2} JIN Ye^{1,2} CHANG Shushu^{1,2} YE Bingliang^{1,2} GU Jinbo³ ZHAO Xiong^{1,2}

(1. College 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
3. Zhejiang Xiaojing Machinery Manufacturing Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to solve the problem of failure on clipping-seedling type transplanting mechanism of rice plug-seedling during seedling pick-up and not fully push-pull pushing that affect the upright degree of seedling, according to the design requirement of rice plug-seedling transplanting mechanism, a kind of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling was proposed. Firstly, according to the kinematic model of transplanting mechanism, an auxiliary analysis and optimization software of this kind of rice potted-seedling transplanting mechanism was independently developed with Visual Basic 6.0, and the influence of main parameters on the transplanting trajectory was also analyzed by the software. With the method of human-computer interaction based on visualization, a set of structural parameters satisfying the transplanting requirements was carried out. Then, according to the optimized parameters of mechanism, the overall structural design of the transplanting mechanism was completed. The correctness of the theoretical model and design of the transplanting mechanism was verified by the virtual simulation analysis of the transplanting mechanism. Finally, the test-bed for rice plug-seedling transplanting was designed, on which the seedling experiment of the transplanting mechanism was carried out. When the rotational speed of the transplanting mechanism was 50 r/min, the average success rate of seedling pick-up was 93.06%, which was decreased with the increase of rotational speed. When the rotational speed was 80 r/min, the average success rate of seedling pick-up dropped to 88.89%. It was showed that the mechanism had high seedling transplanting efficiency and high seedling success rate, so it can be applied to rice plug-seedling transplanting machine.

Key words: rice plug-seedling; clipping-plug; transplanting mechanism; test

收稿日期: 2018-12-21 修回日期: 2019-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)和国家自然科学基金项目(51575495,51575496)

作者简介: 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

通信作者: 叶秉良(1972—),男,教授,博士生导师,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

0 引言

当前,国内外水稻移栽技术主要分为毯状苗插秧和钵苗移栽^[1]。毯状苗插秧的均匀性与栽植苗直立度均较好,但取苗作业会对水稻苗根部产生撕扯,对苗根伤害较大,不能完整保留根部的生长基质与营养成分,延长了水稻苗的缓苗期^[2];钵苗移栽技术利用塑料钵苗盘培育水稻钵苗,取苗时对苗根几乎无伤害,移栽后钵苗根部的营养土钵也可以较好地保留,栽植的钵苗分蘖早,此外,将钵苗种在温度较高的土表,有利于水稻钵苗的生长^[3]。钵苗移栽又分为抛秧和摆栽,抛秧方式的特点是植苗比较浅,钵苗的损伤轻、返青快与分蘖早,但移栽的水稻苗易倒伏,植苗的直立度也比较差;摆栽方式不仅具备抛秧方式的优点,且移栽的钵苗直立度较好。日本井关农机株式会社研发了一种水稻钵苗摆栽机,通过顶出机构、输送带机构和摆栽机构的配合完成取苗、送苗和植苗作业。该摆栽机移栽质量较高,栽植的钵苗均匀有序,但摆栽机的摆栽臂没有推秧机构,移栽过程中容易出现带苗现象,顶出机构对送秧机构的精度和钵盘育秧质量要求很高,且该摆栽机构由 3 套机构配合完成,结构比较复杂,价格也比较昂贵^[4-5]。本课题组设计了多种夹苗式非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构^[6-11],该类机构由齿轮传动部分和移栽臂组成,通过非圆齿轮传动使移栽臂形成满足水稻钵苗移栽要求的姿态和轨迹,可以依次实现取苗、送苗和植苗 3 个动作,结构简单紧凑,传动平稳、效率高。但该类移栽机构是通过移栽臂上的秧片夹紧钵苗根茎部进行取苗,容易夹伤钵苗茎秆,同时当秧片上粘有泥土时,易导致取苗成功率下降;并且,夹苗式取苗方式存在推秧爪不能完全推土钵的现象,致使钵苗下落初速度不够大,影响钵苗栽植的直立度。

为了改善水稻钵苗取苗的成功率和栽植的直立度,同时减少伤苗,本文提出一种移栽机构——夹钵式水稻钵苗移栽机构。该移栽机构可实现一种新的取苗方式——夹钵式取苗,即通过移栽臂的秧针直接插入穴盘中夹住钵苗的钵土进行取苗,然后送苗至推苗位置,土钵在推秧爪的作用下被推离秧针,实现插秧作业,使钵苗栽植后有较好的直立度。该移栽机构是一种非圆齿轮行星轮系机构,在液态施肥机扎穴机构^[12-13]和蔬菜钵苗取苗^[14-16]中已有类似的应用。本文基于机构运动学模型和 Visual Basic 6.0(VB)软件平台,开发机构参数优化软件^[16-18],通过人机交互的方式寻求满足水稻钵苗移栽要求的工作轨迹和机构参数;然后进行移栽机构的结构设

计,试制移栽机构样机并进行台架试验,通过试验验证移栽机构设计的合理性。

1 夹钵式移栽机构工作原理

夹钵式水稻钵苗移栽机要求移栽机构模拟人手把钵苗从钵苗盘中取出,到达推苗位置后以一定的初速度推出,使钵苗植入水田中,接着移栽机构重复上述动作。通过分析现有的移栽机构的轨迹特点,为了顺利从钵盘中夹取钵苗,要求有一段具有一定长度的“尖嘴型”移栽轨迹,同时移栽臂进入和退出钵盘的轨迹段之间的夹角不能太大,并且进入和退出段的轨迹要尽量平直。

为了实现上述工作要求,本文参考文献[14-15,19],仍采用文献[19]的移栽机构构型,提出一种如图 1a 所示的移栽机构,该移栽机构的工作原理如下(该机构属于对称机构,现以一侧的齿轮传动为例说明工作原理):太阳轮 7 与机架固接,行星架 8 绕回转中心 O 点按顺时针方向转动,第一中间非圆齿轮 3 与太阳轮 7 有齿部分啮合,第二中间椭圆齿轮 4 与行星椭圆齿轮 2 啮合,第一中间非圆齿轮 3 与第二中间椭圆齿轮 4 同轴固连,通过两对非圆齿轮啮合传动,使移栽臂 14 相对行星架 8 做非匀

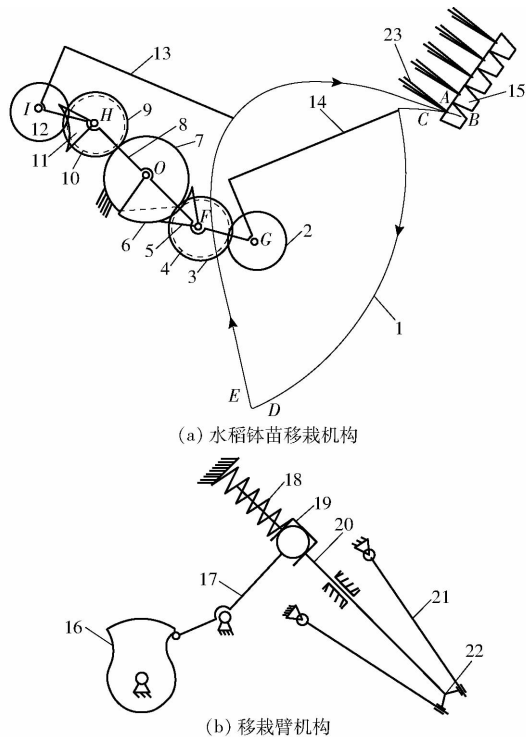


图 1 夹钵式水稻钵苗移栽机构

Fig. 1 Schematics of potted rice seedling transplanting mechanism

1. 移栽轨迹 2、12. 行星椭圆齿轮 3、9. 第一中间非圆齿轮
- 4、10. 第二中间椭圆齿轮 5、11. 凹锁止弧 6. 凸锁止弧 7. 太阳轮 8. 行星架 13、14. 移栽臂 15. 钵盘 16. 凸轮 17. 拨叉
18. 弹簧 19. 弹簧座 20. 推秧杆 21. 秧针 22. 秧爪 23. 钵苗

速间歇转动;*ABC*段为移栽机构的取秧段,移栽臂14进入钵盘15前秧针21完全张开,凸轮16推动拨叉17,秧针21在秧爪22的作用下开始夹紧钵苗23的土钵,当移栽臂尖点到达钵盘底部时(*B*点),秧针21完全夹紧土钵,然后钵苗23随着秧针21一起往钵盘外运动,实现取苗。*CD*段为移栽机构的持秧段,此时第一中间非圆齿轮3与太阳轮7脱开啮合,与第一中间非圆齿轮3固连的凹锁止弧5和与太阳轮7固连的凸锁止弧6相对滑动,移栽臂14与行星架8保持相对静止,夹持钵苗23运动。*DE*段为移栽机构的推秧段,推秧杆20在弹簧18作用下向下推苗,秧针21完全张开,秧爪22迅速推出,钵苗23以一定的初速度植入水田中,实现栽植苗。*EA*段为移栽机构的回程段,秧针21在推完苗后一直保持张开状态,直到下一次取苗开始。移栽臂14一方面随着行星架作匀速转动,同时又相对行星架8作反方向的非匀速间歇转动,在这两种运动的复合下,形成了可以满足移栽工作要求的移栽轨迹*ABCDEA*。

2 移栽机构参数优化

如图2所示,以不完全非圆齿轮(太阳轮)1的固定中心*O*点为坐标原点,建立坐标系*XOY*。太阳轮1固定不动,行星架6绕*O*点从初始位置顺时针转动。移栽机构的初始位置如图2a,图2b为行星架转过角度 φ_1 时机构的位置状态(以逆时针方向为正方向)。参考文献[19],得到第一中间非圆齿轮的节曲线表达式

$$R_2(\varphi_2) = \frac{m_1(m_2 + \sqrt{1 + m_3 \cos \varphi_2})}{m_4 \sqrt{1 + m_3 \cos \varphi_2}}$$

式中 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 ——待定系数
 φ_2 ——中间非圆齿轮相对行星架*OF*的角位移

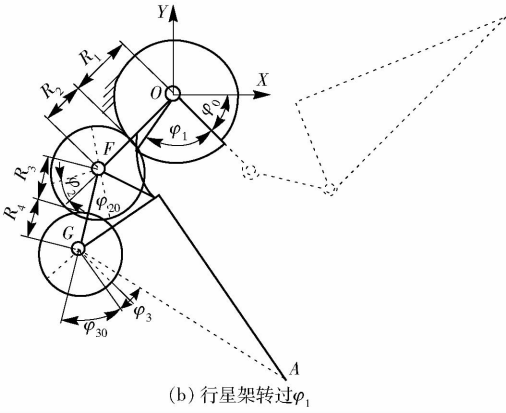
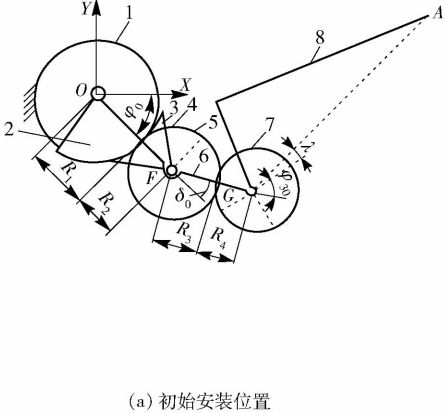


图2 移栽机构示意图

Fig. 2 Schematics of transplanting mechanism

1. 不完全非圆齿轮(太阳轮) 2. 凸锁止弧 3. 凹锁止弧 4. 第一中间非圆齿轮 5. 第二中间椭圆齿轮
6. 行星架 7. 行星椭圆齿轮 8. 移栽臂

秧针尖点*A*的位移方程与速度方程为

$$\begin{cases} x_A = L_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) + 2a \cos(\delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1) + \\ \quad S \cos(\lambda + \delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_{30}) \\ y_A = L_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) + 2a \sin(\delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1) + \\ \quad S \sin(\lambda + \delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_{30}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_A = -L_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) - 2a \dot{\varphi}_1 \sin(\delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1) - \\ \quad S(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3) \sin(\lambda + \delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_{30}) \\ \dot{y}_A = L_1 \dot{\varphi}_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) + 2a \dot{\varphi}_1 \cos(\delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1) + \\ \quad S(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3) \cos(\lambda + \delta_0 + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_{30}) \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 L_1 ——第一级齿轮中心距(*OF*)
 φ_0 ——行星架初始角位移
 φ_3 ——行星椭圆齿轮相对行星架角位移
 φ_{30} ——初始位置时行星椭圆齿轮7相对行星架*OFG*的角位移
 a ——椭圆齿轮长半轴长度
 δ_0 ——行星架*OF*与*FG*的夹角
 S ——行星椭圆齿轮转动中心*G*到秧针尖点*A*的距离
 λ ——初始位置时秧针尖点*A*与行星椭圆齿轮转动中心*G*点之间的连线相对行星椭圆齿轮长轴的夹角

2.1 移栽机构运动学目标与优化变量

为了使移栽机构的秧针能够直接插入钵穴夹取钵苗的土钵进行取苗,并在推苗位置进行推苗,需要保证移栽机构有较好的移栽轨迹和姿态。优化目标具体要求如下:①两移栽臂间不能发生运动干涉。②移栽臂不能与秧箱和未被移栽的钵苗发生干涉。③尖点轨迹在取苗阶段的轨迹尽可能接近直线,使秧针可以直进直出完成取苗作业,保证取出钵苗时

不与钵盘发生干涉。④移栽轨迹进入穴盘的深度约 14 mm, 保证两秧针可以夹紧钵苗的钵土部位。⑤取秧角(秧针夹紧钵苗时与水平线的夹角)要求在 $5^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 之间。⑥秧针插入钵穴进行取苗时, 不能碰到该钵穴钵苗的茎秆, 否则会导致钵苗茎秆的损伤。⑦推秧角(推秧时, 秧针与水平线的夹角)要求在 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 推秧角与取秧角的差值越接近钵苗盘与水平线的夹角, 栽植后水稻苗的直立度就越好, 本文设定钵盘的倾角为 50° 。⑧移栽静轨迹高度大于 260 mm, 避免“搭桥”问题(前一株水稻苗的叶子随着后一株水稻苗的根一起被植入田间)^[20], 移栽静轨迹是移栽机静止, 移栽机构绕中心轴回转时, 秧针尖点形成的轨迹。⑨在移栽动轨迹中, 秧针尖点的回程段轨迹要求先朝上然后再向前, 移栽臂在完成推苗后不会推倒已植好的钵苗, 移栽动轨迹是移栽机构随着移栽机前进时绕着中心轴回转, 秧针尖点形成的轨迹。

优化变量包括: 第一中间非圆齿轮的节曲线参数 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 ; 椭圆齿轮长半轴长度 a ; 太阳轮有齿部分对应的圆心角 α ; 移栽臂的初始安装角 α_0 ; 移栽机构的行星架 OF 与 FG 的夹角 δ_0 ; 太阳轮的初始安装角 φ_0 ; 移栽臂尖点到行星轮旋转中心的距离 S 。

移栽机构的参数优化是一类多参数多目标耦合的复杂优化问题, 某一个目标的改变都会引起其他目标的变化, 都会对移栽轨迹的形状和移栽臂的姿态造成比较大的影响, 所以本文设定以上目标要求为主要优化目标, 借助专家经验, 通过人机交互方式, 寻求一组“非劣”解, 满足移栽机构取苗和插秧的工作要求。

2.2 关键参数对移栽轨迹的影响

根据建立的移栽机构运动学模型, 并依托 VB 软件平台, 开发夹钵式水稻钵苗移栽机构辅助分析与优化软件, 见图 3。影响移栽臂姿态和移栽轨迹形状的参数较多, 各参数影响的效果不同且相互关联。因此, 分析各个参数对优化目标的影响从而总结出相应的变化规律, 使用控制变量法分析单个参数对移栽机构工作轨迹的影响。人机交互参数优化

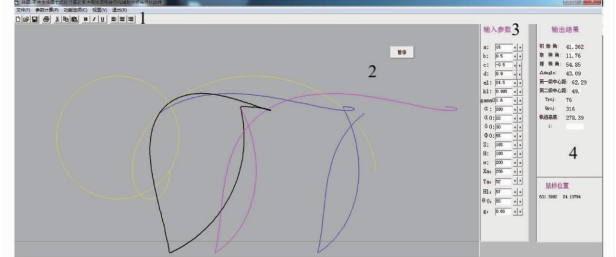


图 3 优化软件主界面

Fig. 3 Optimizing software main interface

软件主界面主要有: 菜单及编辑栏、图形显示区、输入参数区和输出结果区。

由构造的第一中间非圆齿轮节曲线表达式 $R_2(\varphi_2)$, 根据试凑法得出, 当 $m_2 = 0.5$ 、 $m_3 = -0.5$ 时, 第一中间非圆齿轮节曲线比较光滑, 且这两个参数的值上下微变时, 移栽轨迹变化幅度很小, 所以在此不做过多分析。主要考虑系数 m_1 与 m_4 的变化对移栽轨迹的影响规律。如图 4a 所示, 当 m_1 由 15 增大到 16 时, 移栽轨迹在取秧段发生了明显变化, 推秧段几乎一致, 取秧段部分越来越尖; 由 16 增大到 17 时, 取秧段轨迹尖嘴变大。因为夹钵式移栽机构是要插进钵盘中进行取苗, 所以取秧段宽度不宜太大, 防止秧针在穴盘中摆动过大伤到钵苗。如图 4b 所示, 当 m_4 逐渐增大时, 取秧段的环扣越来越大, 但推秧的直立度逐渐变好。 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 的选值具有强耦合性, 需同时优化。

如图 4c 所示, a 不仅影响轨迹的整体大小, 还会影响取秧角和推秧角。当 a 增大时, 取秧角逐渐变小, 推秧角逐渐变大, 这比较符合移栽轨迹的要求, 但是夹钵式的移栽机构需要考虑轨迹在穴盘内一段的形状, 在穴盘内轨迹段与水平面夹角太小将会导致秧针插破钵盘, 并且移栽机构整体结构需要尽可能紧凑。

α 直接决定移栽轨迹中移栽臂持秧段的长度。如图 4d 所示, 当 α 增大时, 移栽轨迹在推秧段保持不变, 在取秧段有了明显变化, 持秧段开始的时间越来越早, 并且取秧段的轨迹与水平面夹角越来越小。考虑到钵苗盘与水平面的角度, 取秧段与水平面夹角太大, 就会出现移栽臂在取苗前撞伤钵苗的问题; 夹角太小, 秧针进入穴盘内的深度就会很小, 取不出钵苗。

如图 4e 所示, α_0 主要影响移栽轨迹的推秧角和取秧段的形状, 当 α_0 由 20° 增大到 22° 时, 移栽轨迹取秧段由环扣逐渐变为尖嘴, 逐渐符合移栽轨迹的要求, 但随着 α_0 由 22° 继续增大到 24° 时, 取秧段的轨迹长度越来越小, 导致取秧深度变浅; 此外, 推秧角越小, 移栽后的钵苗的直立度越差。

如图 4f 所示, δ_0 对移栽轨迹的取秧段和推秧段均有影响。当行星架 OF 与 FG 的夹角增大时, 移栽轨迹整体上移, 取秧角逐渐变小, 但取苗效果变差, 推秧角也逐渐变小并且轨迹后倾。

如图 4g 所示, 在 φ_0 取值不同时, 移栽轨迹的大小和形状保持不变, 只有取秧角和推秧角在变化。当 φ_0 增大时, 取秧角逐渐减小, 但是推秧角也逐渐变小且推秧段轨迹后倾越来越严重, 移栽臂回程中会撞倒已栽植的钵苗。

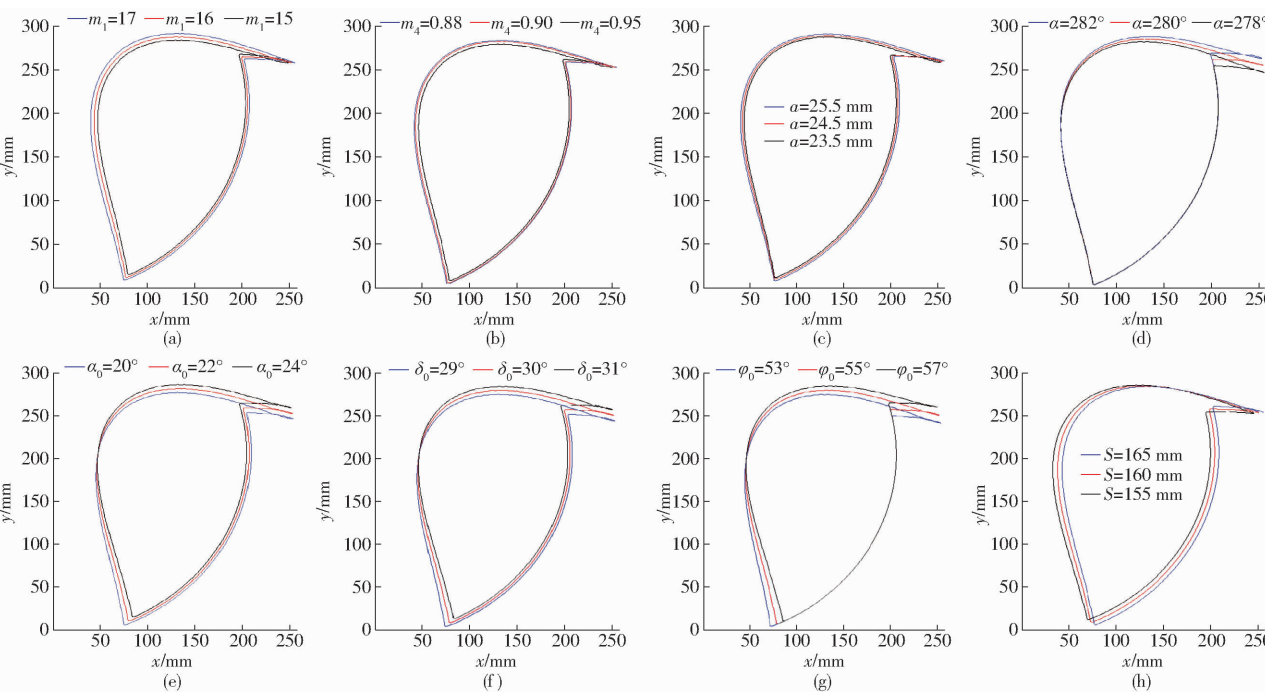


图 4 关键参数对移栽轨迹的影响

Fig. 4 Effect of key parameters on transplant trajectory

如图 4h 所示,当 S 增大时,移栽轨迹整体逐渐变大,在取秧段有较大变化,取秧段轨迹的尖嘴越来越长、越来越尖,使秧针可以达到插入钵盘中取苗的效果。但是 S 值过大将会导致两移栽臂之间互相干涉。

2.3 移栽机构参数优化结果

根据以上各个关键参数对移栽轨迹影响的分析,基于自主编写的优化软件,最终得出一组既符合移栽轨迹形状要求又符合移栽臂姿态要求的机构参数。优化后的参数为 $m_1 = 16$ 、 $m_2 = 0.5$ 、 $m_3 = -0.5$ 、 $m_4 = 0.9$ 、 $a = 24.5 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 280^\circ$ 、 $\alpha_0 = 22^\circ$ 、 $\delta_0 = 30^\circ$ 、 $\phi_0 = 55^\circ$ 、 $S = 165 \text{ mm}$ 。

优化后秧针尖点的移栽静轨迹如图 5 所示,从图中可以看出,取秧段轨迹呈“尖嘴”型,取苗时秧针运动接近直进直出,优化目标结果如表 1 所示。表中倾角 θ 如图 6 所示。

由优化软件可以看出,在整个移栽过程中两移栽臂之间、移栽臂与秧箱间都没发生干涉现象。因

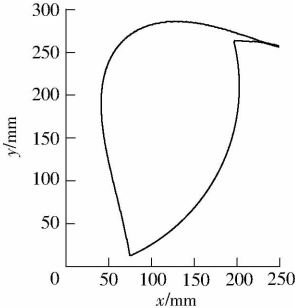


图 5 移栽机构静轨迹

Fig. 5 Relative motion trajectory of transplanting mechanism

表 1 优化目标结果

Tab. 1 Optimized objective results

参数	数值	参数	数值
取秧角/(°)	7.4	秧针进入穴盘深度/mm	14
推秧角/(°)	58	移栽静轨迹高度/mm	278
取秧角和推秧角之差/(°)	50.6	动轨迹回程段倾角 θ /(°)	82.2

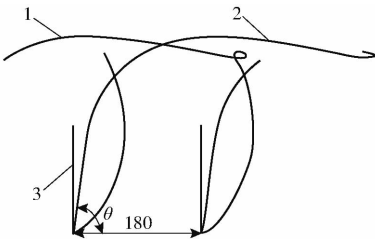


图 6 移栽机构动轨迹

Fig. 6 Absolute motion trajectory of transplanting mechanism

1、2. 移栽动轨迹 3. 水稻钵苗

此,这组机构参数可以满足文中设定的优化目标和约束条件。图 6 所示为一个移栽周期内两个移栽臂尖点的动轨迹,水稻钵苗的株距 H 为 180 mm。在优化软件中减小株距 H ,移栽机构动轨迹的前倾现象会有明显改善,即秧针尖点在回程段轨迹先朝上然后再向前运动,移栽臂在完成推苗后不会推倒已植的钵苗。

3 移栽机构试验

3.1 试验台设计

试验台(图 7)主要包括机架、传动系统、送秧装置和移栽机构。送秧装置包含秧箱、横向送秧机构和纵向送秧机构。机构简图如图 8 所示,动力从主

动椭圆齿轮 1 处输入,通过主动椭圆齿轮 1 与从动椭圆齿轮 2 啮合实现双螺旋轴 3 的非匀速转动,通过滑块 4 嵌入双螺旋轴 3 沟槽实现秧箱 14 的横向往复非匀速移动。摆杆 6 和平行四连杆 7 固连在秧箱上。当滑块 4 移动到左右 2 个极限位置时,与双螺旋轴固连的凸轮 5 撞击摆杆 6,实现平行四连杆 7 的间歇运动,平行四连杆 7 驱动棘轮 8 实现纵向单向间歇运动。棘轮 8 和主动链轮 10 固连在主动链轮轴 9 上,输送链条 11 上安装有钢丝 12,嵌入钵盘 13 背面的沟槽中,主动链轮 10 间歇转动带动输送链条 11 将钵盘 13 向下移动一个钵距,实现纵向换行。

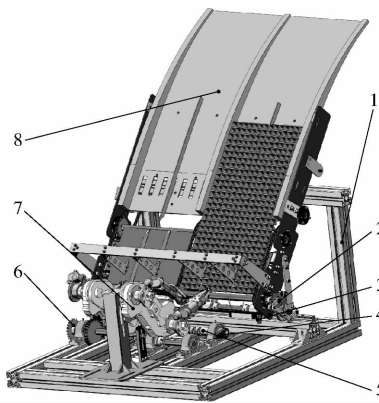


图 7 试验台模型图

Fig. 7 Model chart of test bed

1. 机架 2. 纵向送秧机构 3. 摆杆 4. 凸轮 5. 横向送秧机构
6. 传动系统 7. 移栽机构 8. 秧箱

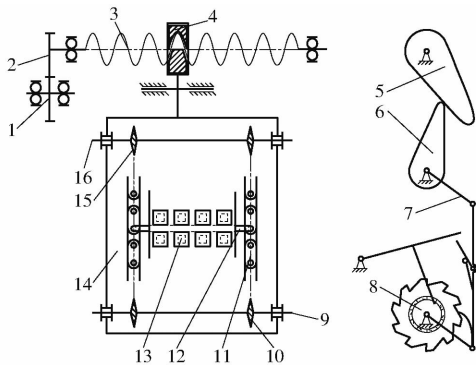


图 8 送秧装置结构简图

Fig. 8 Structural sketch of seedling feeding device

1. 主动椭圆齿轮 2. 从动椭圆齿轮 3. 双螺旋轴 4. 滑块 5. 凸轮 6. 摆杆 7. 平行四连杆 8. 棘轮 9. 主动链轮轴 10. 主动链轮 11. 输送链条 12. 钢丝 13. 钵盘 14. 秧箱 15. 从动链轮 16. 从动链轮轴

纵向送秧机构实现钵苗的纵向间歇输送,每次输送 1 行钵苗,其机构简图如图 9 所示,由双螺旋轴上的凸轮驱动主动摆杆 1 摆动,通过连杆 2 带动从动摇杆 8 摆动,再由棘爪 6 驱动棘轮 10 转过 1 个齿,实现纵向送秧 1 次。

横向送秧利用椭圆齿轮传动和双螺旋轴传动实

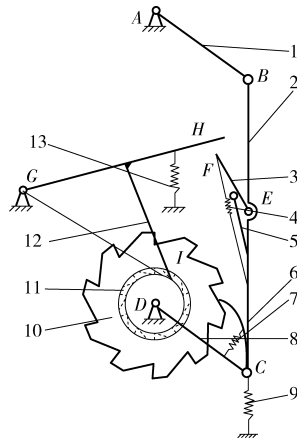


图 9 纵向送秧机构简图

Fig. 9 Schematic of longitudinal rice seedling delivery mechanism

1. 主动摆杆 2. 连杆 3. 解锁杆 4. 解锁杆扭簧 5. 解锁杆挡板 6. 驱动棘爪 7. 驱动棘爪扭簧 8. 从动摇杆 9. 平行四连杆扭簧 10. 驱动棘轮 11. 止动棘轮 12. 止动棘爪 13. 止动棘爪扭簧

现往复非匀速移动,使得移栽机构在取苗时,横向送秧速度较慢,有利于提高取苗的成功率,当移栽机构不取苗时,横向送秧速度较快,保证取苗的效率。

椭圆齿轮传动关系式为

$$\theta_2 = 2\arctan\left(\frac{1+k}{1-k}\tan\frac{\theta_1}{2}\right) \quad (3)$$

式中 θ_1 ——主动椭圆齿轮角位移

θ_2 ——从动椭圆齿轮角位移

k ——椭圆齿轮偏心率

夹钵式移栽机构运行时,秧针需要插入钵盘进行取苗,秧针从插入钵盘到拔出钵苗的过程中,秧箱仍在横向移动,存在横向偏移。由于双螺旋轴的螺距 $P = 20\text{ mm}$,所以随着双螺旋轴的转动,秧箱的横向偏移量为

$$l = \frac{20}{2\pi}\Delta\theta_2 \quad (4)$$

式中 $\Delta\theta_2$ ——秧针开始插入钵苗盘到秧针完全退出钵苗盘的过程中,从动椭圆齿轮转过的角度

夹钵式水稻钵苗移栽机构移栽臂从秧针开始插入钵苗盘到秧针完全退出钵苗盘的过程中,移栽机构转过了 59° ,主动椭圆齿轮与移栽机构之间存在传动比 $i = 2$ 的齿轮传动,主动椭圆齿轮应转过 118° 。因此,为了使横向偏移量最小,当 $\theta_1 = 120^\circ$ 时,移栽机构秧针开始插入钵苗盘,而当 $\theta_1 = 240^\circ$ 时,移栽机构秧针完全退出钵苗盘。

$$l = \frac{10}{\pi}\left(\pi + 2\arctan\left(\frac{1+k}{1-k}\tan\frac{240^\circ}{2}\right) - 2\arctan\left(\frac{1+k}{1-k}\tan\frac{120^\circ}{2}\right)\right) \quad (5)$$

椭圆齿轮偏心率 k 越大,横向送秧速度变化越剧烈,但是送秧时会产生较大的振动,不利于取苗。偏心率 k 对横向送秧偏移量 l 的影响如图 10 所示。

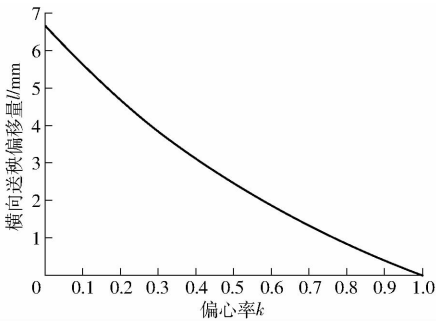


图 10 偏心率 k 对横向送秧偏移量 l 的影响
Fig. 10 Effect of eccentricity k on transverse seedling displacement l

综合考虑横向送秧偏移量、变速效果和机构振动的影响,选择偏心率 k 为 0.3 的椭圆齿轮传动实

现秧箱横向的非匀速移动,此时取秧时横向移动产生的偏移量 $l=3.838\text{ mm}$,而采用圆柱齿轮传动时,横向移动产生的偏移量为 6.667 mm 。

3.2 移栽机构静轨迹分析

将移栽机构安装在试验台架上进行空转试验,拍摄移栽机构工作视频,利用 Photoshop 软件分析绘制移栽机构静轨迹如图 11b 所示,图 11a 为移栽机构仿真分析静轨迹,图 11c 为移栽机构理论计算静轨迹,移栽机构物理样机的测试静轨迹与仿真静轨迹基本保持一致,而理论计算静轨迹的底部有一个尖点,是在不完全非圆齿轮(太阳轮)与第一中间非圆齿轮刚开始啮合时产生,这个啮合时刻会产生传动冲击,为了减少冲击,在机构设计时在太阳轮与第一中间非圆齿轮之间加装了缓冲装置,使轨迹下端尖点变为圆弧,其余部分轨迹与测试静轨迹均一致。



图 11 移栽机构静轨迹对比
Fig. 11 Comparison of relative movement trajectories of transplanting mechanism

3.3 移栽机构取苗试验

为了检验移栽机构在实际工作中的移栽工作性能,将装配好的移栽机构安装在水稻钵苗试验台(图 12)上,开展机构的取苗与推苗试验,试验采用 14×29 穴的钵盘。

通过多次试验发现,移栽臂从开始取苗到夹紧钵苗的过程中,进入钵穴的深度为 14 mm ,取苗角约为 7° ,推苗角约为 58° ,推苗角与取苗角的差值为 51° 。图 13 所示为移栽机构在推苗时刻的位置与移栽臂的姿态。

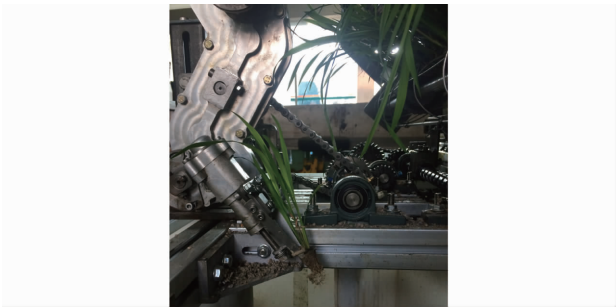


图 13 推苗位置
Fig. 13 Seedling position



图 12 夹钵式水稻钵苗移栽试验台
Fig. 12 Rice bowl seedling transplanting test stand with bowl type

开展移栽机构取苗试验,共进行了两组试验。使移栽机构的转速分别为 $50、60、70、80\text{ r/min}$,采用摄像机拍摄移栽机构运转过程,记录钵盘空穴与取苗失败数,分析机构取苗成功率。

第 1 组试验用的钵苗长势茂盛,但是空穴数量较多,钵苗土质为泥土,第 1 组取苗试验结果见表 2。第 2 组试验用的钵苗生长整齐一致,空穴数量较小,钵苗土质为基质,第 2 组取苗试验结果见表 3。

当移栽机构转速为 50 r/min 时,共进行了 5 组试验,实际取苗总数为 677,失败总数为 47,平均取

表 2 第 1 组钵苗移栽试验结果

Tab.2 Test results of plug-seedlings transplanting in the first group

转速/ (r·min ⁻¹)	取苗 数	空穴 数	实际 取苗数	失败 数	空穴 率/%	成功 率/%
50	70	19	51	3	27.14	94.12
50	336	47	289	27	13.99	90.66
60	70	11	59	5	15.71	91.53
60	336	57	279	25	16.96	91.04
70	70	11	59	7	15.71	88.14
70	336	24	312	32	7.14	89.74
80	70	15	55	7	21.43	87.27
80	336	67	269	29	19.94	89.22

表 3 第 2 组钵苗移栽试验结果

Tab.3 Test results of plug-seedlings transplanting in the second group

转速/ (r·min ⁻¹)	取苗 数	空穴 数	实际 取苗数	失败 数	空穴 率/%	成功 率/%
50	70	9	61	2	12.86	96.72
50	196	22	174	7	11.22	95.98
50	112	10	102	8	8.93	92.16
60	336	38	298	15	11.31	94.97
70	70	18	52	4	25.71	92.31

苗成功率为 93.06%，成功率随着转速的提高而降低，当转速为 80 r/min 时，共进行了 2 组试验，平均取苗成功率为 88.89%。

由于第 2 组钵土为基质，与钵盘间的吸附力较小，当移栽机构转速增大到 70 r/min 后，纵向送秧换行时容易引起钵土震落，因此第 2 组试验 70 r/min 时的空穴率较其他转速有显著提高。第 2 组试验钵盘空穴数量较少，但是相邻钵苗根系盘在一起，取苗时容易将相邻穴内的钵苗一起带出，导致试验时空

穴数量比实际偏高。

移栽机构的台架试验表明，移栽臂能够精确实现取苗和推苗动作，对于生长较好的钵苗，可以得到良好的试验效果。但在速度较快的情况下，取苗成功率降低，这与育苗的质量、机构的加工精度、移栽臂上两秧针尖点张开时的距离、夹紧钵苗时的闭合程度及试验台的运行误差都有较大关系。通过后期的改善，增大两秧针尖点张开时的距离，增加秧针插入土钵的角度使得秧针更好的夹紧钵苗；改进秧针形状使得刚进入钵盘时夹紧钵苗的速度较低，而当秧针尖点到达钵盘底部时，夹紧速度存在一个突变，“突然”的夹紧使得移栽臂更好的夹紧钵苗。

4 结论

- (1)根据水稻钵苗移栽要求，提出了一种新型旋转式移栽机构——夹钵式水稻钵苗移栽机构，分析了该移栽机构的工作原理。
- (2)开发了移栽机构辅助分析与优化软件，分析了各个关键参数对移栽轨迹的影响，获得了一组适合水稻钵苗移栽要求的机构参数， $m_1 = 16, m_2 = 0.5, m_3 = -0.5, m_4 = 0.9, a = 24.5\text{ mm}, \alpha = 280^\circ, \alpha_0 = 22^\circ, \delta_0 = 30^\circ, \varphi_0 = 55^\circ, S = 165\text{ mm}$ 。
- (3)对移栽机构进行虚拟仿真分析，设计了水稻钵苗移栽试验台并进行了台架试验，仿真分析得到的静轨迹与试验测试、理论计算得到的静轨迹进行了对比，验证了参数优化结果的正确性；进行了移栽机构的取苗试验，移栽机构转速为 50 r/min 时，平均取苗成功率为 93.06%，当转速为 80 r/min 时，平均取苗成功率为 88.89%，取苗成功率随着转速的提高而降低，表明该机构具有较高的取苗效率和取苗成功率，可应用于水稻钵苗移栽机上。

参 考 文 献

[1] MACLEAN J L. Rice almanac: source book for the most important economic activity on earth[M]. Int. Rice Res. Inst.,2002.

[2] 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(11): 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(11):9-15. (in Chinese)

[3] 杜立恒. 高速水稻移栽机新型送秧装置的设计与试验[D]. 杭州:浙江理工大学,2015.

[4] 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?flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)

[5] 张永松. 基于夹钵式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,2018.

[6] 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 experiment of variablespeed picking hole mecnanism for oval and circular gear planetary system[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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.007. (in Chinese)

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 王金武, 周文琪, 李鑫, 等. 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):136–142.
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, LI Xin, et al. Design and experiment of variable speed picking hole mechanism for oval and circular gear planetary system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):136–142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180515&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.015. (in Chinese)
- [13] 王金武, 周文琪, 白海超, 等. 液肥深施肥差动式双向供肥分配装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6):105–111.
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, BAI Haichao, et al. Design and experiment of differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply for deep-fertilizer liquid fertilizer application[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):105–111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180612&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.012. (in Chinese)
- [14] 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 for vegetable transplanter for pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8):21–29. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 叶秉良, 刘安, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2):57–62.
YE Bingliang, LIU An, YU Gaohong, et al. Parameters optimization with human-computer interaction method and experiment of vegetable seedling pick-up mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):57–62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.012. (in Chinese)
- [17] 武传宇, 赵匀, 陈建能. 水稻插秧机分插机构人机交互可视化优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1):46–49.
WU Chuanyu, ZHAO Yun, CHEN Jianneng. Optimization design of rice transplanter separating-planting mechanism with visualization human-computer interaction method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):46–49. (in Chinese)
- [18] THOMAS E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4):395–410.
- [19] 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, 67.
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, 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.009. (in Chinese)
- [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)