

非圆齿轮水稻钵苗抛秧机构运动机理与参数优化*

钱孟波¹ 俞高红² 蒋晨骁¹ 赵 匀²

(1. 浙江农林大学工程学院, 杭州 311300; 2. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 阐述了抛秧机构的工作原理及结构特点。针对抛秧机构相应轨迹与秧苗姿态的要求,提出了非圆齿轮行星系传动机构。建立了该机构的位移、速度和加速度方程,用 Visual Basic 6.0 语言编写了该机构的辅助分析和仿真程序,该软件可显示优化参数、优化目标和主要结构参数,并将优化结果数字化。通过软件分析了主要参数对该机构运动特性的影响,并得出满足抛秧轨迹和姿态要求的最佳机构设计参数。利用优化所得参数建立非圆齿轮有序抛秧机构三维模型并进行虚拟样机试验,其对应的轨迹和姿态满足水稻抛秧作业农艺的要求。

关键词: 水稻钵苗 抛秧机构 工作机理 参数优化

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0064-06

引言

抛秧具有移植速度快、不伤根的优点,被水稻种植专家推荐为增产比率最高的种植农艺,然而无序抛秧作业影响水稻通风、均匀吸收阳光和土壤养分,容易引发病虫害,从而影响抛秧机的推广。因此有序抛秧机构的研发是解决以上问题的关键^[1-2]。

80年代初,日本已生产出有序抛秧机械,并进入市场;由于其结构复杂、加工精度要求高、成本高,工作效率低等诸多原因,未能大面积推广,只占水稻种植面积的0.5%以下^[3]。

国内也开发了多种不同类型的有序抛秧机构,典型的有中国农业大学研制的2ZPY-H530型水稻钵苗行栽机,沈阳农业大学研制的气吸式小型手扶式水稻钵苗有序移栽机,南京农机化研究所设计的顶杆推出式有序抛秧机构,此外黑龙江八一农垦大学、浙江大学、湖南农业大学和广西大学都对钵苗输送排序式抛秧机构进行了研究^[4-8]。这些机构由于工作效率或结构上原因,未能得到广泛推广。

本文在前人研究基础上,围绕水稻钵苗在抛秧作业时的直立度和损伤率问题,提出探出式取苗的水稻钵苗抛秧机构,采用夹取装置夹持土钵,对抛秧机构的结构进行设计与参数优化研究。

1 水稻钵苗有序抛秧机构工作机理分析

一般齿轮轮系传动难以形成凸起的探出式工作轨迹^[9-10],本文打破传统固定秧针取秧方式,提出探出式秧针取秧。采用非圆齿轮传动机构,提出水稻钵苗有序抛秧机构,如图1a所示。采用夹持装置夹取土钵,不伤秧苗,提高秧苗的存活率,设计的抛秧机构继承齿轮传动轮系传动平稳的优点,并达到水稻钵苗有序抛秧机构作业时所需的探出式取苗轨迹的要求。

探出动作通过探出式秧针实现,如图1b所示。秧针由凸轮和弹簧控制,整个运动过程包括近休、推程、远休、回程4个运动过程。①近休:秧针处于初始状态,在该区段秧针绝对运动和牵连运动特性完全相同。②推程:实现秧针的探出过程,拨叉与凸轮相接触,通过凸轮推程轮廓曲线和拨叉端头的几何形状变化实现探出动作。③远休:秧针处于完全探出状态,期间秧针尖点到行星轮旋转中心的长度不变。④回程:凸轮借助拨叉推动弹簧座压缩弹簧,使秧针收回进行抛秧,为下一次取秧作准备。

夹持装置如图1c所示。取秧时,取秧杆在弹簧弹力作用下向下运动,驱动与其固结的连接板向下运动。与连接板铰接的2根成V字安装的秧针对应穿插在推秧爪的2个孔内,当秧针向下运动时秧针外侧受到推秧爪的挤压,两秧针均向内侧摆动,夹

收稿日期: 2013-10-22 修回日期: 2013-11-28

* 国家自然科学基金资助项目(51275478)、浙江省机械设计及理论重中之重开放基金资助项目(ZSTUMD2011A002)和浙江省自然科学基金资助项目(R12E050011、LQ14E050013)

作者简介: 钱孟波,讲师,主要从事机构优化和数字化设计研究,E-mail: qianmengbo@126.com

通讯作者: 俞高红,教授,主要从事农业种植机械设计和机构学优化研究,E-mail: yugh@zstu.edu.cn

紧土钵。当拨叉挤压弹簧复位时,秧针内侧受到推秧爪的挤压作用,两秧针均向外侧摆动,松开土钵,依靠秧针和推秧爪的相对运动,进行抛秧。

以变性卵形齿轮行星系为不等速传动机构,结合秧针具有探出式动作,使秧针尖点运动轨迹呈现具有针形凸起的桃形,该轨迹满足水稻钵苗抛秧机构的农艺要求。

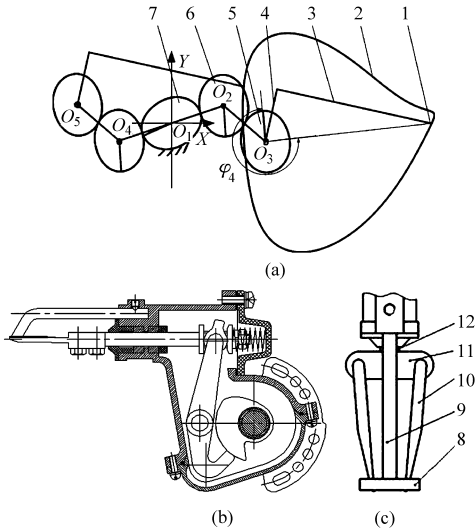


图 1 抛秧机构简图
Fig. 1 Diagram of throwing mechanism
(a) 水稻钵苗有序抛秧机构运动轨迹
(b) 分秧臂 (c) 夹持装置

1. 秧针尖点 2. 牵连运动轨迹 3. 秧针 4. 取苗臂高度 5. 行星轮 6. 中间轮 7. 太阳轮 8. 推秧爪 9. 中间杆 10. 秧针 11. 连接板 12. 取秧杆

2 非圆齿轮行星系传动机构运动学建模

水稻钵苗有序抛秧机构采用全等的变性卵形齿轮传动,其机构简图如图 2 所示。太阳轮固定,行星架带动中间轮和行星轮转动,同时中间轮与太阳轮啮合产生自转,并带动行星轮转动。以太阳轮的旋转中心 O_1 为原点,建立 XO_1Y 坐标系, O_2 、 O_3 为中间轮和行星轮的旋转中心, M 、 N 为中间轮与太阳轮和行星轮的啮合点, O_3E 为分秧臂高度, P 为秧针尖点, φ_2 为初始位置时刻 O_1O_2 与太阳轮长轴的夹

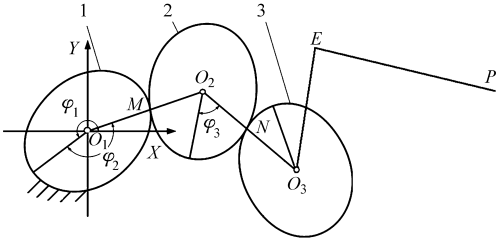


图 2 变性卵形齿轮行星轮系机构简图
Fig. 2 Curve model of degenerate oval gear
1. 太阳轮 2. 中间轮 3. 行星轮

角, φ_3 为初始位置时刻 O_2O_3 与中间轮长轴的夹角,行星架转角 $\varphi = \omega t$ 。

为了分析方便,将相关分析参数及其说明如表 1 所示。

表 1 分析符号说明
Tab. 1 Specification of analysis symbols

符号	意义	符号	意义
m	模数	φ_1	太阳轮初始安装角
z	齿数	φ_2	中间轮、太阳轮轮心连线与太阳轮长轴夹角
k_1	偏心率	φ_3	两行星轮轮心连线与中间轮长轴的夹角
$\gamma_2(\varphi)$	齿轮 2 相对行星架角位移	φ_4	秧针尖点、行星轮轮心的连线与行星轮长轴的夹角
$\gamma_3(\varphi)$	齿轮 3 相对行星架角位移	$\beta_2(\varphi)$	中间轮各时刻绝对角位移
S	行星轮轮心到秧针尖的距离	$\beta_3(\varphi)$	行星轮各时刻绝对角位移
m_{11}	变性系数	$\omega_2(\varphi)$	中间轮相对行星架角速度
n_1	变性卵形齿轮阶数	$\omega_3(\varphi)$	行星轮相对行星架角速度
$L_{O_1O_2}$	太阳轮与中间轮轮心距离	φ	行星架角位移
$L_{O_2O_3}$	中间轮与行星轮轮心距离		
h	分秧臂高度 O_3E		

2.1 变性卵形齿轮节曲线方程建立

变性卵形齿轮是一种特殊的非圆齿轮^[11],主动轮的节曲线方程 $R(\varphi)$ 为

$$\begin{cases} r_{11} = \frac{P_1}{1 - k_1 \cos(n_1 m_{11} \varphi)} & \left(0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{n_1 m_{11}}\right) \\ r_{12} = \frac{P_1}{1 - k_1 \cos\left(n_1 m_{11} \left(\frac{2\pi}{n_1} - \varphi\right)\right)} & \left(\frac{\pi}{n_1 m_{11}} < \varphi \leq \frac{2\pi}{n_1}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P_1 = a(1 - k_1^2)$
式中 a ——中心距

2.2 抛秧机构位移方程

中间轮旋转中心位移方程为

$$\begin{cases} X_{O_2}(\varphi) = (L_{O_1O_2} + L_{O_2O_3}) \cos\beta_2(\varphi) \\ Y_{O_2}(\varphi) = (L_{O_1O_2} + L_{O_2O_3}) \sin\beta_2(\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

行星旋轮转中心位移方程为

$$\begin{cases} X_{O_3}(\varphi) = X_{O_2}(\varphi) + (L_{O_1O_2} + L_{O_2O_3}) \cos\beta_3(\varphi) \\ Y_{O_3}(\varphi) = Y_{O_2}(\varphi) + (L_{O_1O_2} + L_{O_2O_3}) \sin\beta_3(\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

秧针尖点 P 的位移方程为

$$\begin{cases} X_P(\varphi) = X_{O_3}(\varphi) + S \cos(\gamma_3(\varphi) + \varphi_4) \\ Y_P(\varphi) = Y_{O_3}(\varphi) + S \sin(\gamma_3(\varphi) + \varphi_4) \end{cases} \quad (4)$$

4 抛秧机构运动轨迹与秧苗直立度分析

4.1 偏心率 k_1

k_1 为变性卵形齿轮偏心率,该参数变化对机构轨迹的影响如图 5 所示。偏心率的变化影响轨迹形状,不影响秧苗直立度。

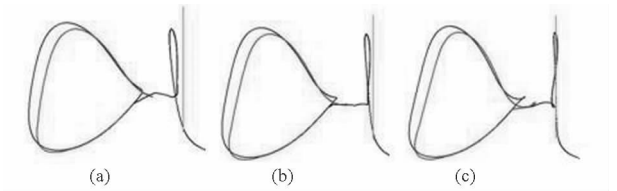


图 5 变性卵形齿轮偏心率 k_1 对轨迹的影响
Fig.5 Effect of different eccentricity value on track
(a) $k_1 = 0.12$ (b) $k_1 = 0.14$ (c) $k_1 = 0.16$

4.2 变性系数 m_{11}

m_{11} 为变性卵形齿轮的变性系数,该参数变化对机构轨迹的影响如图 6 所示。该值的变化影响整体轨迹形状,不影响秧苗直立度。

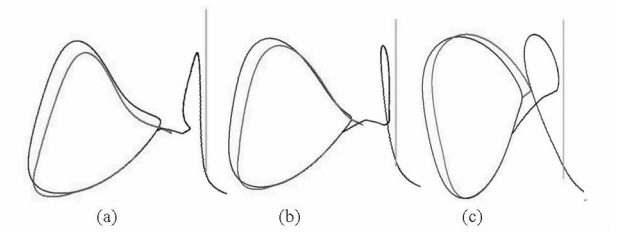


图 6 变性系数 m_{11} 对轨迹的影响
Fig.6 Effect of modified coefficient on track
(a) $m_{11} = 0.8$ (b) $m_{11} = 0.92$ (c) $m_{11} = 1.2$

随着 m_{11} 的增大,左侧轨迹变得瘦长,右侧轨迹向右偏移,轨迹变化比较明显,通过改变该参数,可以获取工作所需的凸起动作。

4.3 行星轮系初始相位角对各目标的影响

4.3.1 初始相位角 φ_1

φ_1 变化对机构轨迹的影响如图 7 所示。该值的变化不影响机构运动轨迹,但影响秧苗的直立度。随着 φ_1 的增大,取秧点的高度越来越高。

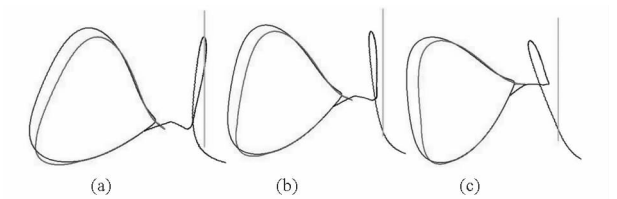


图 7 初始相位角 φ_1 对轨迹的影响
Fig.7 Effect of initial phase angle φ_1 on track
(a) $\varphi_1 = 175^\circ$ (b) $\varphi_1 = 189^\circ$ (c) $\varphi_1 = 205^\circ$

4.3.2 初始相位角 φ_2

φ_2 变化对机构轨迹的影响如图 8 所示。该值的变化影响机构运动轨迹,随着 φ_2 增大,5 个齿轮

排布间距增大, φ_2 增大到一定值,工作所需的凸起动作轨迹消失。

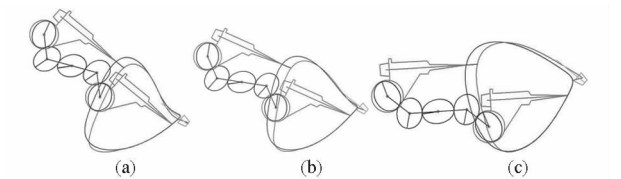


图 8 初始相位角 φ_2 对轨迹的影响
Fig.8 Effect of initial phase angle φ_2 on track
(a) $\varphi_2 = 155^\circ$ (b) $\varphi_2 = 162^\circ$ (c) $\varphi_2 = 175^\circ$

4.3.3 初始相位角 φ_3

φ_3 变化对机构轨迹的影响如图 9 所示。该值的变化影响机构运动轨迹。与 φ_2 不同之处是, φ_3 调整到一定值时难以得到工作所需的凸起动作的轨迹。

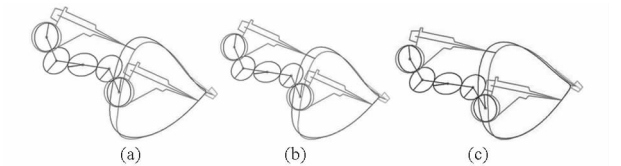


图 9 初始相位角 φ_3 对轨迹的影响
Fig.9 Effect of initial phase angle φ_3 on track
(a) $\varphi_3 = 50^\circ$ (b) $\varphi_3 = 62^\circ$ (c) $\varphi_3 = 68^\circ$

5 抛秧机构设计参数确定与虚拟试验

5.1 机构设计参数的确定

根据软件分析各主要参数对该机构运动特性的影响和 水稻钵苗抛秧机构作业时的农艺要求,通过人机交互的方式,结合专家经验,最终优化得到满足抛秧轨迹和姿态要求的最佳机构设计参数。优化结果作为抛秧机构结构设计依据,为抛秧机构的装配图和零件图的设计奠定基础,按照农艺要求,株距 $H = 188\text{ mm}$,优化结果为: $a = 25.55\text{ mm}$, $k_1 = 0.12$, $m_{11} = 0.89$, $S = 155\text{ mm}$; $\varphi_1 = 203^\circ$, $\varphi_2 = 160^\circ$, $\varphi_3 = 60^\circ$, $\varphi_4 = -16.5^\circ$ 。

在优化软件参数栏输入最佳参数,经过模拟仿真,得到抛秧机构相对运动轨迹如图 10 所示。此时的参数为:取秧角 33° ,推秧角与取秧角差值 23° ,齿数 23,模数 2.25,取秧针深入土钵深度为 14 mm,入钵点在秧苗下方 4 mm 处,两分秧臂不发生干涉,满足 3.1 节所述的优化目标。

5.2 基于 VB 软件的秧针尖点运动轨迹试验

为保证秧苗入土时的直立度,抛秧机构秧针尖点的初速度的大小至关重要,优化软件包含秧针尖点 P 的运动轨迹分析模块,抛秧机构一个工作周期内,秧针尖点运动轨迹试验计算结果如图 11 所示,图中 a 点为抛秧点, b 点为取秧点。

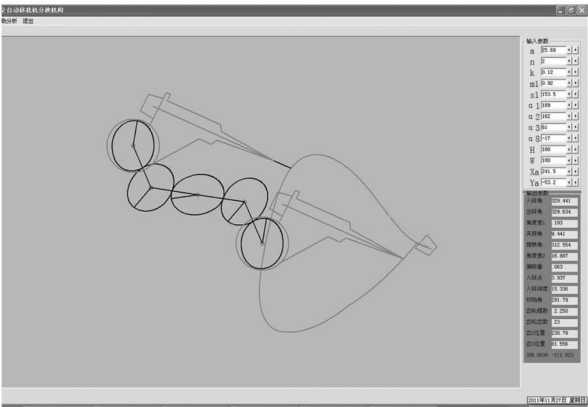


图 10 抛秧机构相对运动模拟分析界面

Fig. 10 Relative motion simulation analysis interface of throwing mechanism

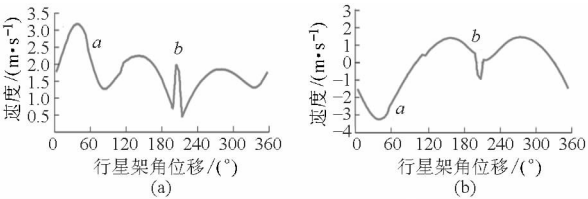


图 11 抛秧机构秧针尖点速度曲线

Fig. 11 Tip speed curve of throwing mechanism

(a) 合速度 (b) Y 向速度

5.3 机构三维建模及虚拟样机试验

根据优化所得参数进行机构的结构设计^[13],完成抛秧机构的装配图和零件图。基于 UG 软件建立水稻钵苗抛秧机构三维模型,并将其导入 ADAMS 软件进行动态仿真试验^[14-15],ADAMS 动态仿真所得秧针尖点运动轨迹如图 12 所示。

从仿真结果可知,ADAMS 仿真轨迹曲线与 VB 理论分析曲线几乎完全一致,两者秧针静轨迹曲线均呈探出式状态。而且秧针尖点合速度与 Y 方向的速度曲线两者基本一致。VB 环境中,传动机构用齿轮的节曲线代替,秧针用简单的二维线条替代;在 ADAMS 环境中,不仅传动机构有形象的齿轮三维模型,而且各零部件都是根据优化参数设计的三维实体零件。

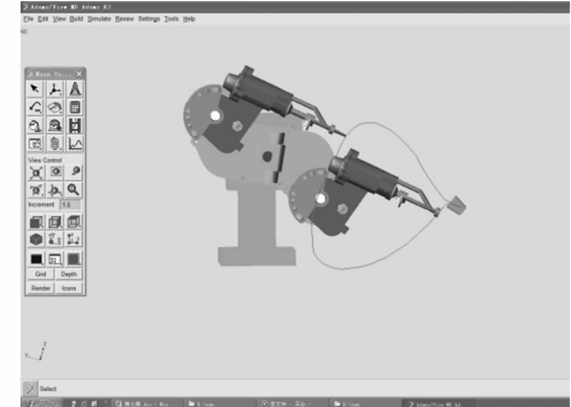


图 12 抛秧机构动力学仿真模型

Fig. 12 Dynamic simulation model of throwing mechanism

(a) 三维仿真轨迹 (b) 秧针尖合速度 (c) 秧针尖点 Y 方向运动速度

图 12 抛秧机构动力学仿真模型

Fig. 12 Dynamic simulation model of throwing mechanism

(a) 三维仿真轨迹 (b) 秧针尖合速度 (c) 秧针尖点 Y 方向运动速度

因此,ADAMS 仿真结果证明:通过变性卵形齿轮外啮合传动,可以得到满足抛秧要求的轨迹。相互印证了理论模型与仿真模型的正确性。

6 结论

- (1) 阐述了水稻钵苗有序抛秧机构组成与工作机理,建立了非圆齿轮传动机构运动学模型。
- (2) 针对水稻钵苗抛机构的工作特点,结合农艺要求,制定了抛秧机构优化目标与设计变量,并将设计目标数字化。
- (3) 开发的优化软件可分析参数变化对抛秧机构运动轨迹及秧苗直立度的影响,最终得到一组满足工作要求的机构设计参数。
- (4) 根据优化所得设计参数建立了机构三维模型,并进行了三维动态仿真试验。与二维 VB 软件运动轨迹进行对照,相互验证了模型设计的正确性。

参 考 文 献

1 吴崇友,卢晏,涂安富,等. 播秧机工作原理与使用经济效果[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 60-63.
Wu Chongyou, Lu Yan, Tu Anfu, et al. Working principle of bowl-seedling transplanter and its economic effect in the application [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(5): 60-63. (in Chinese)

2 何金均,王立臣,宋建农,等. 水稻种植机械化发展现状及制约因素分析[J]. 农机化研究, 2009(2): 1-4.
He Jinjun, Wang Lichen, Song Jiannong, et al. The progress of rice planting mechanization and analysis of its restrictive factors [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(2): 1-4. (in Chinese)

3 包春江,李宝筏. 日本水稻插秧机的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 162-166.
Bao Chunjiang, Li Baofa. Research development of rice transplanter in Japan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 162-166. (in Chinese)

4 王玉兴,罗锡文,唐艳芹,等. 气力有序抛秧机输秧机构动态模拟研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 109-112.
Wang Yuxing, Luo Xiwen, Tang Yanqin, et al. Dynamic simulation of the rice-seedling feeding mechanism of paddy seedling

pneumatic throwing transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 109 – 112. (in Chinese)

5 宋来田, 李延华, 田金和, 等. 齿板式水稻钵秧摆栽机的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 72 – 74.
Song Laitian, Li Yanhua, Tian Jinhe, et al. Study on scattering type tray grown rice seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(2): 72 – 74. (in Chinese)

6 李建平, 赵匀, 臧少锋, 等. 有序抛秧振动输送机构的模态分析与试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 115 – 117.
Li Jianping, Zhao Yun, Zang Shaofeng, et al. Modal analysis and experiment research of the vibration transportation mechanism of ordered rice seedling thrower [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 115 – 117. (in Chinese)

7 杨坚, 阳潮声, 陈兆耀, 等. 2ZB-8 电磁振动式小型水稻钵苗移栽机的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 84 – 87.
Yang Jian, Yang Chaosheng, Chen Zhaoyao, et al. Study on 2ZB-8 electromagnetic vibration minitype rice seedling transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 84 – 87. (in Chinese)

8 陈恒高, 田金和, 宋来田. 机械手式水稻抛秧机的研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 48 – 52.
Chen Henggao, Tian Jinhe, Song Laitian. Study on rice seedling throwing transplanter of manipulator type [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 48 – 52. (in Chinese)

9 俞高红, 钱孟波, 赵匀, 等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系分插机构运动机理分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 81 – 84.
Yu Gaohong, Qian Mengbo, Zhao Yun, et al. Analysis of kinematic principle of transplanting mechanism with eccentric gears and non-circular gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 81 – 84. (in Chinese)

10 应义斌, 赵匀. 偏心齿轮行星系水稻分插机构的分析研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(2): 130 – 134.
Ying Yibin, Zhao Yun. Analysis and study of transplanting mechanism with planetary eccentric gears [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(2): 130 – 134. (in Chinese)

11 张瑞, 吴序堂, 聂钢, 等. 高阶变性椭圆齿轮的研究与设计[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 726 – 729.
Zhang Rui, Wu Xutang, Nie Gang, et al. Study and design on high-order deformed elliptic gears[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2005, 39(7): 726 – 729. (in Chinese)

12 俞高红, 孙良, 赵匀. 混合齿行星系分插机构的人机交互参数优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 47 – 50.
Yu Gaohong, Sun Liang, Zhao Yun. Parameters optimization based on human-computer conversation of transplanting mechanism with planetary spur gears and elliptical gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 47 – 50. (in Chinese)

13 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 188 – 242.

14 俞高红, 谢仁华, 赵匀, 等. 椭圆齿轮传动后插旋转式分插机构运动分析与实验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 45 – 48.
Yu Gaohong, Xie Renhua, Zhao Yun, et al. Kinematic analysis and experiment of backward rotary transplanting mechanism with elliptical gears transmission [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 45 – 48. (in Chinese)

15 陈建能, 赵匀, 俞高红, 等. 椭圆齿轮行星系分插机构推秧装置的动力学模型的建立及验证[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 71 – 76.
Chen Jianneng, Zhao Yun, Yu Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 71 – 76. (in Chinese)

Work Principle and Parameter Optimization of Rice-seedling Transplanter with Non-circular Gears

Qian Mengbo¹ Yu Gaohong² Jiang Chenxiao¹ Zhao Yun²

(1. School of Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

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

Abstract: The working principle and structure of rice-seedling transplanter were introduced in this paper. According to the requirements of corresponding trajectory and posture of the transplanter, the transmission mechanism with non-circular gears planetary was proposed. The equations of displacement, velocity and acceleration of the mechanism were established. Also a computer-aided analytical and simulative program of the mechanism was compiled based on Visual Basic 6.0. The optimized parameters, optimized objections and main structure parameters were displayed in that software. Meanwhile, the optimized results were digitized. The influences of some important parameters on the kinematic characteristics of the mechanism were analyzed by the software. A group of preferable mechanical parameters were obtained subsequently, whose corresponding trajectory and posture could meet the demands of rice transplanting. The 3D model of the mechanism was established on the basis of the optimizing parameters, and then the virtual prototype test was done. Both of corresponding trajectory and posture met the agronomic requirements.

Key words: Rice-seedling Ordered transplanter Work principle Parameter optimization