

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.011

非规则齿轮行星系扎穴机构反求设计与试验^{*}

王金武¹ 周文琪¹ 张春风² 潘振伟¹ 王金峰¹ 唐 汉¹
(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 北京农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对现有扎穴机构存在扎穴穴口大、入出土垂直度差等问题,设计了一种深施型液态施肥机非圆齿轮行星系扎穴机构。为使扎穴机构得到满足农艺要求的人出土垂直度,提出了一种基于 Matlab GUI 开发平台的非圆齿轮行星系扎穴机构反求设计与运动学仿真分析方法。通过微调静轨迹曲线上的少量型值点,得到了一组机构最佳优化参数,应用 Pro/E 软件建立扎穴机构模型,并利用 ADAMS 软件对其进行模拟仿真,得到喷肥针尖点运动轨迹曲线。试验台试验结果表明:穴口宽度为 30.3 mm、穴距为 221.9 mm,该扎穴机构能够满足喷肥针入出土垂直度好、穴口小的设计要求。

关键词: 液态施肥机 扎穴机构 非圆齿轮 反求设计

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0070-06

Reverse Design and Experiment of Non-circular Gear Planetary System Picking Hole Mechanism

Wang Jinwu¹ Zhou Wenqi¹ Zhang Chunfeng² Pan Zhenwei¹ Wang Jinfeng¹ Tang Han¹
(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of big hole and bad verticality of picking hole mechanism, a kind of picking hole mechanism of non-circular gear planetary system for deep liquid fertilizer was designed. To make picking hole mechanism satisfy the agronomic required verticality when it gets into and out of the soil, the reverse design and kinematics simulation analysis of picking hole mechanism of non-circular gear planetary system were presented based on Matlab GUI development platform. Through the fine-tuning of a small amount of date points on static trajectories which were generated in the inverse design and kinematics simulation, a set of optimal parameters were obtained. The picking hole mechanism model was established by applying Pro/E software. And with the ADAMS software, the trajectory curves were got. Finally, this picking hole mechanism was tested on the test-bed, and the results showed that when the hole width was 30.3 mm and the hole distance was 221.9 mm, the proposed picking hole mechanism could meet the design requirement, that means, good verticality and small hole when it gets into and out of the soil.

Key words: Liquid fertilizer applicator Picking hole mechanism Non-circular gear Reverse design

引言

扎穴机构是深施型液态施肥机的关键工作部件,该机构实现喷肥针扎入土壤喷出液态肥的功能,其性能的优劣直接决定了施肥机扎穴喷肥的质量和效率。

目前液态施肥机扎穴机构分为曲柄摇杆式、椭圆齿轮行星系、全椭圆齿轮行星系等。每一种扎穴

收稿日期: 2014-08-12 修回日期: 2014-09-11
^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B04)和国家自然科学基金资助项目(51205056)
作者简介: 王金武,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

机构都有不足:曲柄摇杆式扎穴机构虽然能满足深施液态肥的功能,但其固有运动惯性力和其本身的结构形式使得扎穴次数进一步提高时,振动大大加剧^[1-2];椭圆齿轮行星系扎穴机构虽然经过动力学和运动学优化,但实际扎穴仅为 400 次/min^[3-4],进一步提高扎穴次数振动仍会加剧;全椭圆齿轮行星系扎穴机构,虽然扎穴速度高达 450 次/min,但扎穴效果还是不够理想^[5-6]。

本文根据非圆齿轮行星系扎穴机构反求设计与

运动学分析软件优化得到的参数^[7-9],设计一种非圆齿轮行星系扎穴机构。

1 结构特点及工作原理

如图 1 所示,基于 CAXA 画图软件建立以 O 为原点、水平方向为 x 轴、垂直方向为 y 轴的坐标系。每组非圆齿轮行星系扎穴机构由 7 个非圆齿轮、行星架、2 对摇臂和喷肥针组成,参与带动每套扎穴部件工作的齿轮为 4 个。

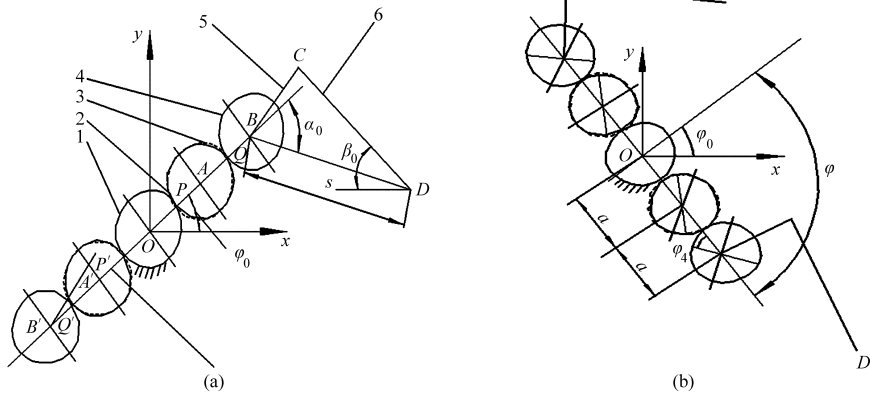


图 1 非圆齿轮行星系扎穴机构结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of pricking hole mechanism with non-circular gears

(a) 初始位置 (b) 行星架转过一定角度

1. 太阳轮 2. 第 1 中间轮 3. 第 2 中间轮 4. 行星轮 5. 摇臂 6. 喷肥针

非圆齿轮初始安装相位相同,中间太阳轮与行星架同轴,两边对称布置,第 1 中间轮和第 2 中间轮同轴且固结在一起,摇臂(喷肥针装配固定在摇臂的一端)固结在行星轮上。工作时,太阳轮固定不动,行星架转动,行星轮绕太阳轮公转并与第 2 中间轮啮合自转,由于非圆齿轮的作用,啮合瞬间的速比不断变化,最终形成喷肥针尖的运动轨迹,保证扎穴要求。

喷肥针尖的运动轨迹与行星架壳体的初始安装角 φ_0 、喷肥针尖初始位置角 α_0 及扎穴部件旋转中心到喷肥针尖的距离 s 等参数有关。此外,初始位置时喷肥针与水平面夹角 β_0 会影响扎穴时的状态^[10-13]。

2 机构运动学模型

2.1 非圆齿轮节曲线计算

采用再现函数方法求得非圆齿轮节曲线,即

$$\begin{cases} \varphi = k_1(x - x_1) \\ \varphi_2 = k_2(f(x) - f(x_1)) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_1, k_2 ——比例系数

x_1 ——转角 φ 的计量起点值

φ ——行星架转角, ($^\circ$)

φ_2 ——第 1 中间轮转角, ($^\circ$)

即传动比为

$$i_{12} = \frac{d\varphi}{d\varphi_2} = \frac{k_1}{k_2 f'(x)} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a - r_1}{r_1} \quad (2)$$

式中 r_1, r_2 ——太阳轮和第 1 中间轮节曲线向径, mm

a ——共轭非圆齿轮副的中心距, mm

由式(1)、(2)得到 2 个相外啮合的太阳轮节曲线与第 1 中间轮节曲线方程式分别为

$$\begin{cases} \varphi = k_1(x - x_1) \\ r_1 = \frac{ak_2 f'(x)}{k_1 + k_2 f'(x)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_2 = k_2(f(x) - f(x_1)) \\ r_2 = a - r_1 = \frac{ak_1}{k_1 + k_2 f'(x)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 机构运动分析

以再现函数 $y = bx - \sin x$ 方法对该机构进行运动分析,其中 $b = 1/k^2$,为了满足非圆齿轮的凸性, $k_2 \leq 0.586$ ^[14-15]。

第 1 中间轮绕太阳轮转动,其转角为

$$\varphi_2 = \varphi - k^2 \sin \varphi \quad (5)$$

同理,第 2 中间轮相对行星架的角位移 φ_3 与行星轮相对行星架的角位移 φ_4 的关系为

$$\varphi_4 = \varphi_3 - k^2 \sin \varphi_3 \quad (6)$$

第1中间轮和第2中间轮同轴,固有 $\varphi_2 = \varphi_3$, 于是

$$\varphi_4 = \varphi - k^2 \sin \varphi - k^2 \sin(\varphi - k^2 \sin \varphi) \quad (7)$$

根据直角坐标系 xOy ,建立位移方程,则行星轮旋转中心 B 相对运动方程为

$$\begin{cases} x_B = 2a \cos(\varphi_0 - \varphi) \\ y_B = 2a \sin(\varphi_0 - \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

喷肥针尖点 D 的相对运动方程为

$$\begin{cases} x_D = 2a \cos(\varphi_0 - \varphi) + s \cos \varphi_D \\ y_D = 2a \sin(\varphi_0 - \varphi) + s \sin \varphi_D \end{cases} \quad (9)$$

当机构的前进速度为 v_m 时,喷肥针尖点 D 的绝对运动方程

$$\begin{cases} x = x_D + v_m \varphi / \dot{\varphi} \\ y = y_D \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\varphi_D = \varphi_0 - \varphi - \alpha_0 + \varphi_4$

式中 φ_D —— BD 的角位移, ($^\circ$)

$\dot{\varphi}$ ——行星架角速度, rad/s

3 反求设计

3.1 可视化仿真软件

以获得符合农艺要求的扎穴轨迹姿态为目标: 扎穴时喷肥针保持竖直姿态; 绝对穴口宽度小于35 mm。基于 Matlab GUI^[16]开发平台,编写了可视化人机交互反求仿真软件^[17-20],如图2a所示,微调静轨迹上的少量型值点,以及机构的其他已知参数,有:初始安装角度、摇臂长度、穴距、转速等。

参数反求步骤:①单击软件控制键框中的“初始位置”按钮,软件会自动根据三次非均匀B样条曲线^[21]拟合出一条封闭的喷肥针静轨迹曲线(其上给出首末重合的12个型值点坐标),如图2c所示,并根据给定的株距、转速等初始条件自动反求出非圆齿轮中心距等机构其他参数(包括非圆齿轮节曲线)。②单击绝对运动、相对运动、绝对穴口、运动学分析等按钮可对机构进行运动模拟、穴口分析、速度与加速度分析,从而对当前参数对应的扎穴性能进行分析,看其是否满足扎穴的高垂直度和

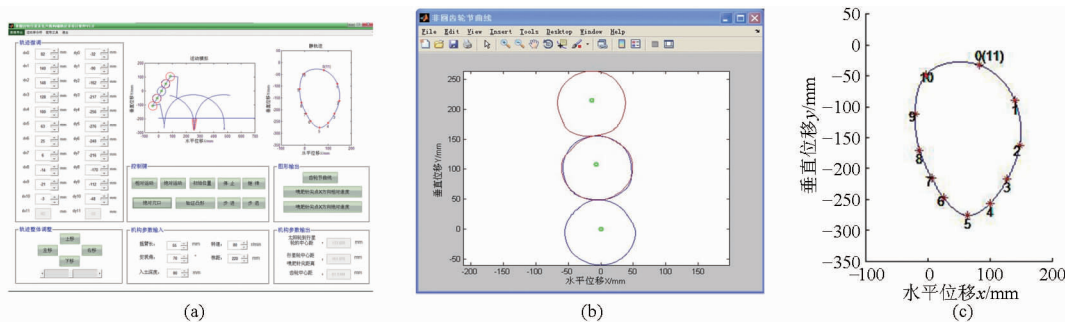


图2 反求设计分析软件

Fig. 2 Reverse design analysis software

(a) 模块实现窗体 (b) 齿轮节曲线 (c) 理论静轨迹

小穴口要求,且保证非圆齿轮节曲线的凸性。③如果不理想,通过微调型值点坐标和调整轨迹整体,重复步骤②直到求得一组理想的机构参数。

3.2 主要型值点对穴口大小影响分析

根据反求设计分析软件,结合最常用的株距尺寸,选取株距 $H = 220$ mm,穴口深度 $h = 80$ mm,转速 $n = 80$ r/min,摇臂安装角 $\beta = 70$ $^\circ$,摇臂长度 $L = 55$ mm,分析12个型值点中5个主要影响穴口大小的垄面线下型值点,如图3所示。

(1) 型值点3为喷肥针进入垄面时的点,取坐标值(108, -217)、(128, -217)、(148, -217)和(128, 197)、(128, -237)进行分析,从软件中可以看出随着横坐标的增大或纵坐标的减少,穴口逐渐减小。

(2) 型值点4为喷肥针进入垄的第2个点,取坐标值(80, -256)、(100, -256)、(120, -256)和(100, -236)、(100, -266)进行分析,从软件中可

以看出随着横坐标的增大或纵坐标的减少,穴口下部分逐渐减小。

(3) 型值点5为喷肥针尖点的最低点,取坐标值(43, -276)、(63, -276)、(83, -273)和(63, -256)、(63, -296)进行分析,从软件中可以看出随着纵坐标的增大,穴口的下部分逐渐增大。

(4) 型值点6为喷肥针刚出垄时第2个点,取坐标值(5, -248)、(25, -248)、(45, -248)和(25, -228)、(25, -268)进行分析,从软件中可以看出随着横坐标或纵坐标的增大,穴口下部分逐渐增大。

(5) 型值点7为喷肥针退出垄面时的点,取坐标值(-2, -216)、(6, -216)、(10, -216)和(6, -196)、(6, 236)进行分析,从软件中可以看出随着横坐标或纵坐标的增大,穴口下部分逐渐增大。因此综上分析,通过微调型值点,根据软件的图形输出区和机构参数输出区,得到了机构的最优参数: $a =$

61.5 mm, $s = 161$ mm, 穴口宽度 28 mm, 齿轮节曲线图如图 2b 所示。

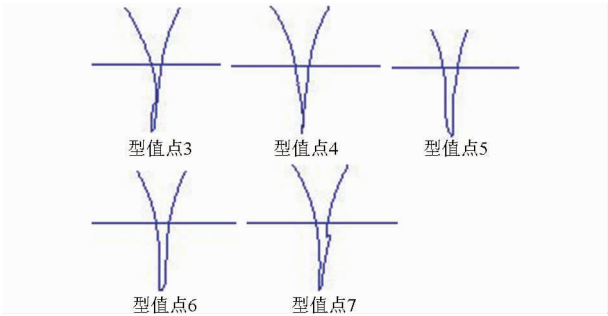


图 3 主要型值点对穴口大小影响示意图
Fig.3 Schematic diagram of effects of main type value points on hole size

3.3 非圆齿轮齿廓的生成

基于 Matlab 的计算和绘图功能开发出非圆齿轮齿廓生成软件,如图 4 所示^[2],将导出的非圆齿轮节曲线的数据点文件,复制到软件程序包文件夹内,并将此数据点文件名称写入该软件代码区 N 点,进行调用,软件将生成对应的齿廓坐标点文件,并通过 Matlab 自身的强大绘图功能,绘制出齿轮齿廓图。

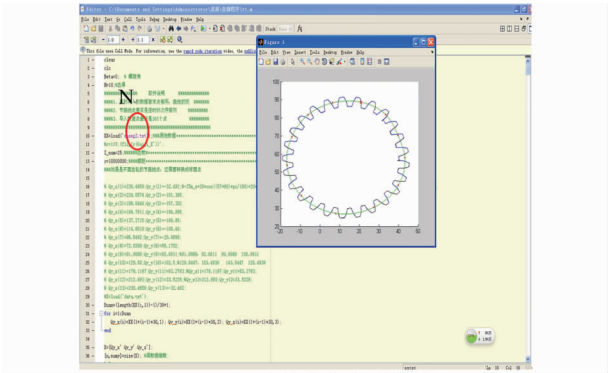


图 4 非圆齿轮齿廓生成软件界面
Fig.4 Software interface of non-circular gear tooth profile generation

将软件导出的非圆齿轮齿廓点坐标 txt 格式文件另存为 ibl 文件,在 ibl 文件中编写由点成线的代码如下:

```
open
arclength
begin section
begin curve
```

打开 proe5.0 软件,点击“曲线”、“自文件”将改好的 ibl 文件导入到 Pro/E 草绘当中,图 5a 是软件生成的非圆齿轮齿廓最初原型,通过去除噪点,平滑处理后如图 5b 所示。

3.4 机构设计与仿真

为了验证非圆齿轮行星系扎穴机构运动学模型建立与理论分析的正确性,结合最优参数与非圆齿

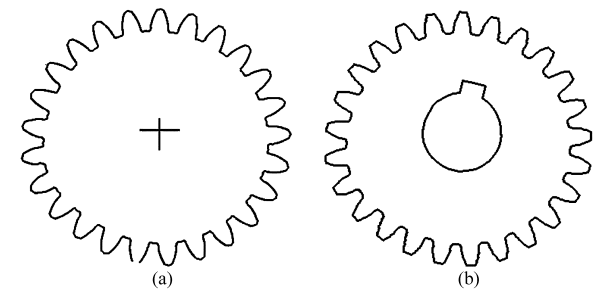


图 5 非圆齿轮齿廓后处理结果
Fig.5 Treatment result of tooth profile processing for non-circular gear
(a) 非圆齿轮齿廓原型 (b) 平滑处理后非圆齿轮齿廓

轮齿廓图,运用 Pro/E 软件对非圆齿行星系扎穴机构进行三维实体建模,并进行虚拟装配,导入 ADAMS 软件中,进行运动学仿真,观察非圆齿轮行星系扎穴机构的相对运动和绝对运动轨迹曲线的形状,并应用 Pro/E 干涉检验,发现设计的扎穴机构运动过程并无干涉,仿真轨迹与反求分析软件得到的轨迹相一致,非圆齿轮啮合良好,如图 6 所示,为后续试验提供了充分的理论依据。

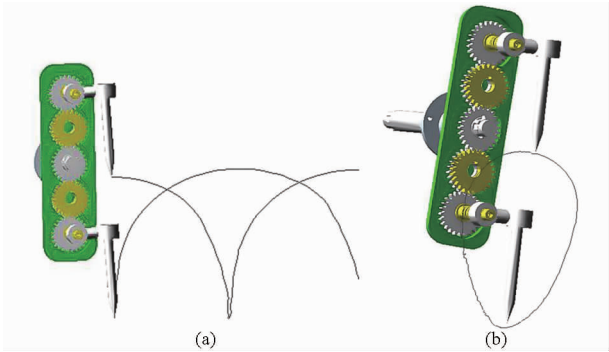


图 6 运动仿真图像
Fig.6 Simulation images of motion
(a) 绝对运动轨迹 (b) 相对运动轨迹

4 台架试验

4.1 试验台设计及方法

为验证非圆齿轮行星系扎穴机构的实际扎穴效果,以实际测量的穴口、穴距大小与反求仿真分析软件得出的结果进行比较。试验地点为东北农业大学工程学院农具实验室,设计了非圆齿轮行星系扎穴机构扎穴试验台,如图 7 所示。

电动机 1 和电动机 2 均由变频柜控制。电动机 1 控制试验台车在土槽导轨上往复运动,电动机 2 通过传动装置控制扎穴机构转动。电动机 1 和电动机 2 同时启动,合成了扎穴机构的绝对运动。

利用非圆齿轮行星系扎穴机构反求与设计分析软件,在保证较好的喷肥针入土垂直度,穴口较小的前提下,获得如下参数:机构前进速度为 0.587 m/s,



图 7 非圆齿轮行星系扎穴机构扎穴试验台

Fig. 7 Test-bed of non-circular planetary gear trains pricking hole mechanism

1. 试验台机架 2. 电动机 1 3. 传动装置 4. 扎穴机构 5. 电动机 2 6. 变频柜

行星架转速为 80 r/min,穴口宽度为 28 mm,穴距为 220 mm。因此,本试验选取试验台车前进速度为 0.587 m/s,行星架转速为 80 r/min,由变频电动机频率与两个因素之间的函数关系式得出电动机 1 频率为 11.1 Hz,电动机 2 频率为 2.6 Hz,做 5 组重复试验,测量结果如表 1 所示。

表 1 穴口宽度测量值

Tab.1 Test results of hole width											mm
试验	穴口序号										平均值
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	33	28	30	32	29	32	28	27	32	30	30.1
2	32	29	35	32	32	31	28	32	31	32	31.4
3	33	30	29	25	30	29	37	30	29	30	30.2
4	32	33	30	29	30	28	32	30	28	31	30.3
5	32	29	31	32	33	30	34	32	33	29	31.5

4.2 试验结果与分析

由表 1 可知,5 组重复试验穴口宽度的总平均值为 30.3 mm。而非圆齿轮行星系扎穴机构反求设计与运动学分析软件得到的机构输出参数 28 mm 相比,误差为 2.3 mm。试验过程中土壤环境与理想状态有一定的差距是造成试验结果偏大的主要原

因,因此得到较大穴口,但与全椭圆齿轮行星系扎穴机构最小穴口宽度 55 mm 相比,明显减小许多。

由表 2 可知,5 组重复试验穴距的总平均值为 221.9 mm。而非圆齿轮行星系扎穴机构反求设计与运动学分析软件得到的机构输出参数穴距 220 mm 相比,误差仅为 1.9 mm。试验过程中电动机实际转速与理论转速存在一定的误差是造成结果偏小的主要原因,但在允许误差范围之内。因此进一步验证了非圆齿轮行星系扎穴机构反求设计理论的正确性。

表 2 穴距测量值

Tab.2 Test results of hole distance											mm
试验 序号	穴距序号										平均值
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	223	219	222	220	223	220	221	217	222	220	220.7
2	218	217	219	219	219	221	218	220	220	219	219.0
3	220	221	223	222	224	220	222	224	221	222	221.9
4	221	223	224	224	220	227	225	223	225	228	223.8
5	226	223	227	227	223	227	221	226	220	225	224.3

5 结论

(1) 为保证扎穴机构喷肥针的入出土垂直度,提出了一种基于反求工程的非圆齿轮行星系扎穴机构的反求设计方法,并以施肥机扎穴为例,利用反求软件对设计的非圆齿轮行星系扎穴机构进行了结构参数优化。

(2) 根据得到的机构最优参数 $a = 61.5\text{ mm}$, $s = 161\text{ mm}$,绘制三维模型,并进行运动学仿真。结果表明:机构运动无干涉,相对运动轨迹、绝对运动轨迹与反求设计分析软件得到的运动轨迹相一致。

(3) 为验证反求设计方法的合理性,对非圆齿轮行星系扎穴机构进行样机试验,结果表明:扎穴穴口宽度为 30.3 mm,穴距为 221.9 mm,扎穴穴口小,效果显著。

参 考 文 献

1 王金武,纪文义,冯金龙,等. 液态施肥机的设计与试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):157-159.
Wang Jinwu, Ji Wenyi, Feng Jinlong, et al. Design and experimental investigation of the liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(6):157-159. (in Chinese)

2 Womac A R, Tompkins F D. Probe-type injector for fluid fertilizers[J]. Applied Engineering in Agriculture,1990,6(2):149-154.

3 王金峰,王金武,葛宜元,等. 深施型液态施肥机扎穴机构优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):52-56.
Wang Jinfeng, Wang Jinwu, Ge Yiyuan, et al. Optimization design on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):52-56. (in Chinese)

4 Chen Y. A liquid manure injection tool adapted to different soil conditions[J]. Transactions of the ASAE,2002,45(6):1729-1736.

5 王金武,刘亚华,王金峰,等. 全椭圆齿轮行星系液态肥深施机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):59-65.
Wang Jinwu, Liu Yahua, Wang Jinfeng, et al. Optimized design and experimental of the liquid fertilizer deep mechanism with

- planetary elliptic gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 59 – 65. (in Chinese)
- 6 王金峰, 王金武, 鞠金艳, 等. 深施型液态施肥机扎穴机构研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 157 – 160.
Wang Jinfeng, Wang Jinwu, Ju Jinyan, et al. Research progress on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5): 157 – 160. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 李革, 李辉, 方明辉, 等. 旋转式分插机构非圆齿轮参数反求法求解[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 47 – 49.
Li Ge, Li Hui, Fang Minghui, et al. Non-circular gear parameters of rotary transplanting mechanism calculated by reverse method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 47 – 49. (in Chinese)
- 9 陈建能, 王英, 任根勇, 等. 非圆齿轮行星轮系引纬机构的反求设计与运动学分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2405 – 2409.
Chen Jianneng, Wang Ying, Ren Genyong, et al. Reverse design and kinematic analysis of non-circular planetary gear trains weft insertion mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2405 – 2409. (in Chinese)
- 10 陈建能, 黄前泽, 王英, 等. 钵苗移栽机椭圆齿轮行星系植苗机构运动学建模与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 6 – 12.
Chen Jianneng, Huang Qianze, Wang Ying, et al. Kinematics modeling and analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for pot seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 6 – 12. (in Chinese)
- 11 Thomas Edathiparambil Vareed. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4): 395 – 410.
- 12 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): 82 – 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): 82 – 84. (in Chinese)
- 13 俞高红, 赵凤芹, 武传宇, 等. 正齿行星轮分插机构的运动特性分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 55 – 57.
Yu Gaohong, Zhao Fengqin, Wu Chuanyu, et al. Analysis of kinematic property of separating-planting mechanism with planetary gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 55 – 57. (in Chinese)
- 14 和丽, 许纪倩, 周娜, 等. 非圆齿轮行星轮系分插机构运动分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 75 – 77.
He Li, Xu Jiqian, Zhou Na, et al. Kinematics analysis of transplanting mechanism with non-circular planetary gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 75 – 77. (in Chinese)
- 15 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 16 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- 17 陈建能, 王英, 赵雄, 等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置的反求设计及仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 79 – 82.
Chen Jianneng, Wang Ying, Zhao Xiong, et al. Reverse design and simulation of walking-type rice based on conjugate cam transplanter's seedling-pushing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 79 – 82. (in Chinese)
- 18 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): 47 – 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): 47 – 49. (in Chinese)
- 19 郝晓焕, 王金武, 郎春玲, 等. 液态施肥机椭圆齿轮扎穴机构优化设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 81 – 83.
Xi Xiaohuan, Wang Jinwu, Lang Chunling, et al. Optimal design and simulation on pricking hole mechanism of liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 81 – 83. (in Chinese)
- 20 张春风. 非圆齿轮行星系扎穴机构的反求设计与仿真[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Zhang Chunfeng. Reverse design and kinematic analysis of non-circular planetary gear trains pricking hole mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 21 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 211 – 262.
- 22 方明辉, 李革, 赵匀, 等. 基于 MATLAB 的非圆齿轮副齿廓算法研究[J]. 农机化研究, 2010(8): 57 – 60.
Fang Minghui, Li Ge, Zhao Yun, et al. Numerical algorithm of tooth profile of non-circular gear pair based on MATLAB[J]. Agricultural Mechanization Research, 2010(8): 57 – 60. (in Chinese)