

液态施肥机分配机构空间凸轮设计与试验^{*}

周文琪 王金武 潘振伟 唐 汉 王 奇 多天宇

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为满足液态施肥机转子式转换器空间凸轮机构运转平稳、防止液肥泄漏与施肥量精准的性能要求,建立了空间凸轮数学模型。应用 Visual Basic 6.0 开发空间凸轮优化软件,得到凸轮的平均圆柱半径为 37 mm 以及轮廓曲线图,应用 Pro/E 软件对空间凸轮机构进行三维建模与运动学仿真,验证了该空间凸轮机构设计的合理性。进行试验台试验,当液压泵压力 0.4 MPa、输出轴转速 69.75 r/min 时,所测施肥量基本相同,且喷肥针只在空间凸轮的推程到回程阶段喷肥。结果表明:空间凸轮机构运转平稳,符合设计要求。

关键词: 液态施肥机 转子式转换器 空间凸轮 仿真

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0064-06

Design and Test of Spatial Cam for Liquid Fertilizer Assigned Machinery

Zhou Wenqi Wang Jinwu Pan Zhenwei Tang Han Wang Qi Duo Tianyu

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to satisfy the performance requirements of spatial cam mechanism in rotary converter of liquid fertilizer applicator, such as stable working and precise liquid fertilization, a mathematical model of spatial cam was established. The software for optimizing the spatial cam was developed by using Visual Basic 6.0. The average radius of cylinder was got as 37 mm and curve profile of spatial cam was obtained. Three-dimensional model and kinematics simulation of spatial cam mechanism were established by using Pro/E software, which verified the design reasonability of spatial cam mechanism. Finally, the mechanism was tested on the test-bed. The result showed that when the pump pressure is 0.4 MPa and the output shaft speed is 69.75 r/min, the fertilizer consumptions are almost the same at different measurement time, and the picking hole mechanism only sprays liquid fertilizer on the rise to fall travel process of converter's spatial cam. The results show that the proposed spatial cam mechanism could work smoothly that meets the design requirements of spatial cam.

Key words: Liquid fertilizer Rotary converter Spatial cam Simulation

引言

液态肥是作物生长所需要营养成分以离子形式存在的一种液态肥料。在北美,液态肥消费量约占世界消费总量的 70%,西欧国家液态肥消费总量约占世界消费总量的 25%^[1-2]。

深施型液态施肥机全椭圆齿轮行星系扎穴机构能很好地将液态肥深施土壤中,而深施机构和分配

器是施肥机的关键部件,两者协调工作决定其工作性能。

液态肥从分配器出来经深施机构内部的复杂管路才能由喷肥针深施土壤中。因盘形凸轮绕其固定轴线回转使从动件作往复直线运动,从而完成喷肥针间歇式喷肥,此种喷肥方式的管路系统泄漏量大、水头损失严重、管路布局复杂,导致施肥量严重不足,影响作物后期的生长^[3-5]。

收稿日期: 2015-01-20 修回日期: 2015-02-17
^{*} 国家自然科学基金资助项目(51205056)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B04)
作者简介: 周文琪, 博士生, 主要从事田间机械研究, E-mail: zhouwenqi1989@163.com
通讯作者: 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

液肥转子式转换器能很好地解决上述问题,该机构省去了原深施机构内部复杂的管路系统,将软管直接连接到喷肥针接口处^[6]。整个工作过程中转换器空间凸轮起着至关重要的作用。该空间凸轮相对盘形凸轮使从动件完成周转运动,从而防止了转换器与深施机构连接的软管相互缠绕的问题。此种施肥方式提高了施肥的效率,使充足的施肥量深施到土壤当中。由于空间凸轮控制着喷肥针喷肥的精准性(喷肥针入土喷肥),若凸轮轮廓设计不合理则会造成顶杆提前开闭,导致液肥泄漏与深施肥量不够等问题,严重影响环境与作物的生长。本文基于 VB 平台对空间凸轮进行优化设计。

1 转换器工作原理

转换器主要由顶杆支座、链轮主轴套、链轮主轴、链轮内齿圈等部分组成,如图 1 所示。

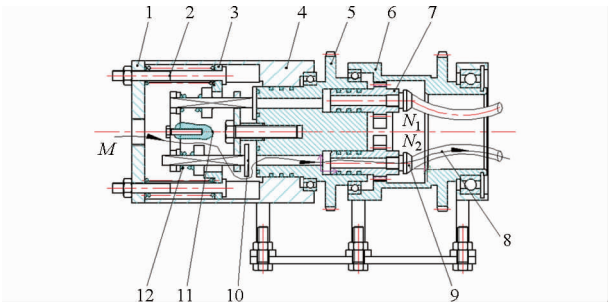


图 1 液肥转子式转换器结构图

Fig. 1 Structure of rotary converter of liquid fertilizer

1. 左端盖 2. 凸轮调节杆 3. 空间凸轮 4. 链轮主轴套 5. 链轮主轴 6. 链轮内齿圈 7. 行星轮轴 8. 输肥软管 9. 软管接头 10. 顶杆 11. 顶杆支座 12. 压力弹簧

工作时,链轮主轴带动顶杆支座,使顶杆与其一起作周向转动。凸轮调节杆将凸轮与左端盖固结在一起。在压力弹簧的作用下,使顶杆在凸轮上作左右往复直线运动,实现主轴内的液肥流口打开和闭合。链轮主轴带动行星轮作周向转动,与行星轮轴相互啮合的链轮内齿圈按其一定的转速比作相同运动,三者(链轮主轴、行星轮、链轮内齿圈)组成了差动轮系系统,使行星轮轴反向自转实现输肥软管防缠绕的功能。

顶杆打开时,液肥从 M 口进入,从 N_1 与 N_2 口流出,图 1 中曲线为液肥流动方向,经软管后由喷肥针施入土壤中^[6]。

2 空间凸轮设计

2.1 空间凸轮运动角的确定

为使转换器与全椭圆齿轮行星系液态肥扎穴机构同步,实现喷肥针入土精准施肥功能,对空间凸轮运动角进行分析。基于 VB 平台编制的凸轮运动

角优化软件可确定空间凸轮运动角。图 2 为喷肥针针尖静轨迹界面,喷肥针针尖静轨迹最低点与地面垂直距离为 H ,对应的喷肥针入土时行星架转角为 φ_{H1} ,喷肥针针尖运动至最低点时行星架的转角为 $\varphi_{\min}$,喷肥针出土时行星架的转角为 φ_{H2} 。

转换器与深施机构的转速比为 1,为实现空间凸轮机构精确控制液态肥喷施功能,应满足空间凸轮的推程运动角、远休止角和回程运动角之和为 $|\varphi_{H1} - \varphi_{H2}|$ 。为保证空间凸轮的结构尺寸要求设定空间凸轮远休止角为零,则推程与回程运动角依次为 $|\varphi_{H1} - \varphi_{\min}|$ 、 $|\varphi_{\min} - \varphi_{H2}|$ 。根据软件的优化结果:空间凸轮的推程运动角应为 47° ,回程运动角应为 38° 。其中 a 、 k 、 α_0 、 φ_0 、 S 和 H 为深施机构的已知常量^[7-13]。

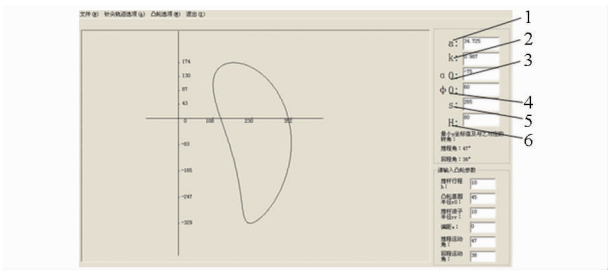


图 2 凸轮运动角优化软件界面

Fig. 2 Cam motion angle optimization software interface

1. 椭圆齿轮长半轴长 2. 椭圆齿轮短长轴之比 3. 行星架中心连线与行星轮旋转中心到喷肥针尖连线的初始夹角 4. 行星架(齿轮箱)的初始角位移 5. 行星轮旋转中心到喷肥针点的距离 6. 穴距

2.2 空间凸轮轮廓设计

2.2.1 平均圆柱半径的确定

为使空间凸轮机构不发生自锁、失真现象并完成预期的运动,平均圆柱半径 R_b 须满足许用压力角和最小曲率半径条件,图 3 为空间凸轮轮廓线展开图,纵坐标表示为顶杆位移,用 s 表示;横坐标表示为凸轮转角,用 φ 表示。

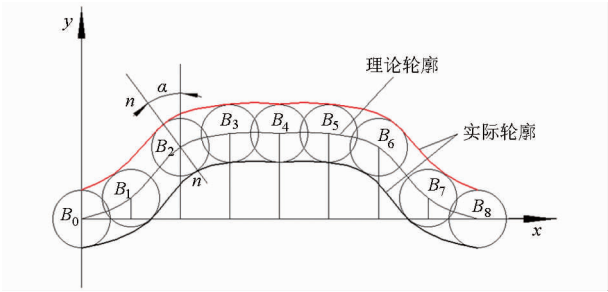


图 3 空间凸轮轮廓线展开图

Fig. 3 Cylindrical cam lineament expansion drawing

(1) 许用压力角条件

通常直动从动件圆柱凸轮机构的推程许用压力角 α_0 为 $25^\circ \sim 35^\circ$,回程许用压力角 α_1 为 $70^\circ \sim 80^\circ$ ^[14]。

图 3 凸轮压力角 α 正切值为

$$\tan\alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{1}{R_b} \frac{ds}{d\varphi} \tag{1}$$

其中 $dy = ds \quad dx = R_b d\varphi \quad \alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$

因此平均圆柱半径 R_b 须满足关系式

$$R_b \geq \frac{\left| \frac{ds}{d\varphi} \right|_{\max}}{\tan\alpha_0} \tag{2}$$

(2) 曲率半径条件

展开的理论轮廓坐标为

$$\begin{cases} x_B = R_b \varphi \\ y_B = s \end{cases} \tag{3}$$

B 点的曲率半径计算公式为

$$R_B = \frac{\left[R_b^2 + \left(\frac{ds}{d\varphi} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{R_b \frac{d^2s}{d^2\varphi}} \tag{4}$$

设凸轮实际轮廓最小允许曲率半径为 $R_{\min}$, 滚子半径为 R_r , 则凸轮理论廓线最小曲率半径应为

$$|R_B|_{\min} \geq R_r + R_{\min} \tag{5}$$

空间凸轮机构采用余弦加速度运动规律, 顶杆位移 s 的计算公式为

$$s = \begin{cases} \frac{h}{2} (1 - \cos(\pi\delta/\delta_{01})) & (0 \leq \delta \leq \delta_{01}) \\ \frac{h}{2} [1 + \cos(\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02})] & (\delta_{01} < \delta \leq \delta_{01} + \delta_{02}) \\ 0 & (\delta_{01} + \delta_{02} < \delta \leq 2\pi) \end{cases} \tag{6}$$

速度的计算公式为

$$\frac{ds}{d\varphi} = \begin{cases} \frac{\pi h}{2\delta_{01}} \sin(\pi\delta/\delta_{01}) & (0 \leq \delta \leq \delta_{01}) \\ -\frac{\pi h}{2\delta_{02}} \sin(\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02}) & (\delta_{01} < \delta \leq \delta_{01} + \delta_{02}) \\ 0 & (\delta_{01} + \delta_{02} < \delta \leq 2\pi) \end{cases} \tag{7}$$

加速度的计算公式为

$$\frac{d^2s}{d^2\varphi} = \begin{cases} \frac{\pi^2 h}{2\delta_{01}^2} \cos(\pi\delta/\delta_{01}) & (0 \leq \delta \leq \delta_{01}) \\ -\frac{\pi^2 h}{2\delta_{02}^2} \cos(\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02}) & (\delta_{01} < \delta \leq \delta_{01} + \delta_{02}) \\ 0 & (\delta_{01} + \delta_{02} < \delta \leq 2\pi) \end{cases} \tag{8}$$

式中 h ——顶杆行程, mm δ ——运动角, rad

δ_{01} ——推程运动角, rad

δ_{02} ——回程运动角, rad

凸轮工作轮廓的最小曲率半径 $\rho_{\min}$ 一般不小于 5 mm, 滚子半径 $R_r = (0.1 \sim 0.5) R_b$ 。应用 VB 6.0 平台

运用 for 循环进行数值迭代^[15~17], 获得最小平均圆柱半径为 19.9 mm, 如图 4 所示, 根据转换器的整体结构大小最终确定空间凸轮的平均圆柱半径为 37 mm。

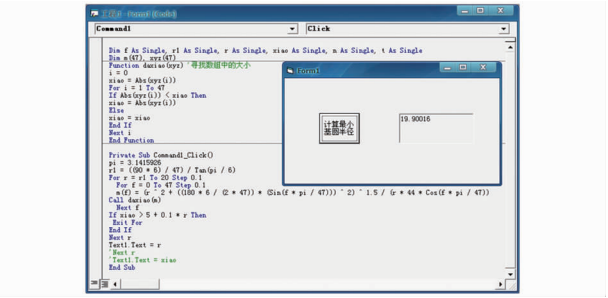


图 4 平均圆柱半径计算程序

Fig.4 Base circle radius program

2.2.2 实际轮廓曲线

如图 3 所示, 以 B_0 点为坐标原点时, 展开的实际轮廓坐标计算公式为

$$\begin{cases} x_k = x_B + R_r \sin\alpha \\ y_k = y_B - R_r \cos\alpha \end{cases} \tag{9}$$

基于 VB 6.0 平台, 根据空间凸轮的数学模型编制空间凸轮轮廓的程序。展开的空间凸轮轮廓曲线如图 5 所示, 点的输出坐标如图 6 所示。



图 5 展开的空间凸轮轮廓曲线

Fig.5 Expansion drawing cam lineament

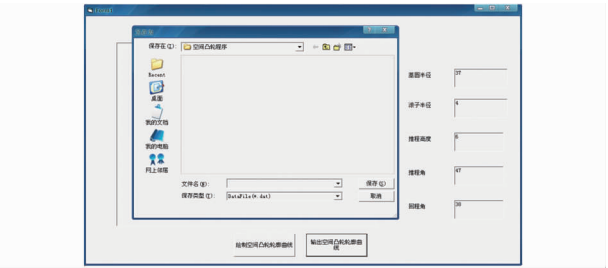


图 6 点坐标的输出

Fig.6 Output coordinates of points

3 空间凸轮仿真与运动分析

将空间凸轮轮廓曲线坐标 txt 文件另存为 ibl 文件, 在 ibl 文件中编写由点成线的语句如下:

open
arclength
begin section
begin curve

将 ibl 文件导入 Pro/E 中,生成空间凸轮的轮廓线并进行拉伸等操作,获得转换器空间凸轮的展开形式。最后运用环形折弯和拉伸等命令创建空间凸轮的三维模型,如图 7 所示。



图 7 空间凸轮三维模型

Fig.7 Three-dimensional model of spatial cam

转换器空间凸轮机构的三维模型如图 8 所示。应用 Pro/E 软件对其进行运动学仿真,设定链轮主轴的转速为 $\frac{\pi}{6}$ rad/s(既顶杆围绕空间凸轮轴线做转速为 $\frac{\pi}{6}$ rad/s 的圆周运动),仿真时间为 12 s,获得顶杆随时间变化速度曲线如图 9 所示,加速度曲线如图 10 所示。

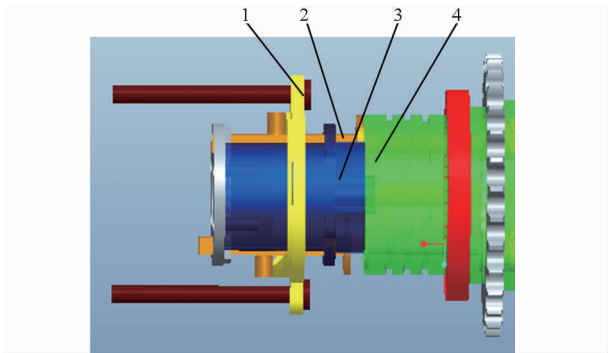


图 8 空间凸轮机构的三维模型

Fig.8 Three-dimensional model of spatial cam institution

1. 空间凸轮 2. 顶杆 3. 顶杆支座 4. 链轮主轴

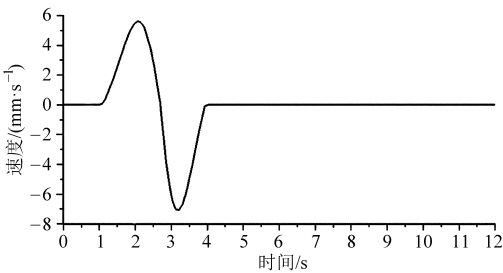


图 9 速度曲线

Fig.9 Velocity curve

从图 9 和图 10 可以看出,1.17 ~ 2.73 s 为顶杆的推程阶段;2.73 ~ 4.00 s 为顶杆的回程阶段。图 9

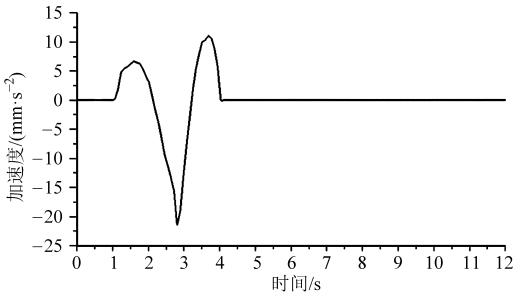


图 10 加速度曲线

Fig.10 Acceleration curve

中,顶杆在推程阶段速度先上升后下降;在回程阶段速度先下降后上升。图 10 中,顶杆在推程阶段加速度先上升后下降再反向上升;在回程阶段加速度先下降后反向上升再下降;在 4 ~ 12 s 速度及加速度均为零。

顶杆运动规律符合余弦加速度规律,说明顶杆在运动过程中无刚性冲击,空间凸轮机构运转平稳可以进行高速作业。

4 试验

4.1 试验条件与方法

为验证空间凸轮机构运转平稳,所设计空间凸轮不发生失真、自锁现象且实现深施机构入出土精准喷肥功能,对该机构进行试验。试验地点为东北农业大学工程学院农具实验室。转换器与深施机构固定在机架上,分别与输出轴通过链传动进行传动并连接输肥软管(转换器右侧到喷肥针软管接口),驱动轮通过链传动带动中间轴,中间轴通过链传动带动输出轴,因此完成转换器与深施机构同步作周向转动。拖拉机动力输出轴通过传动带带动液压泵,液肥经由软管到转换器的左侧,从而完成深施机构喷肥针喷肥功能,如图 11 所示。



图 11 管路系统试验装置

Fig.11 Piping system test device

1. 机架 2. 转换器 3. 液压泵 4. 液肥箱 5. 中间轴 6. 输出轴 7. 深施机构

以转换器工作时系统是否有断流、堵塞现象为指标进行喷肥量稳定性试验。试验时转换器连续工作 4 h,输出轴转速与液压泵压力为 69.75 r/min、0.4 MPa,每间隔 30 min 测一次流量,每次均用量筒取喷肥针口处 10 次喷肥量,试验结果列于表 1 中,

从不同角度的转换器测试图当中观察喷肥针喷肥性能如图 12 所示。图 13 为喷肥针喷肥区域,看其是否满足农艺要求的入出土精准喷肥(即开始于空间凸轮推程运动角阶段,结束于回程运动角阶段)。

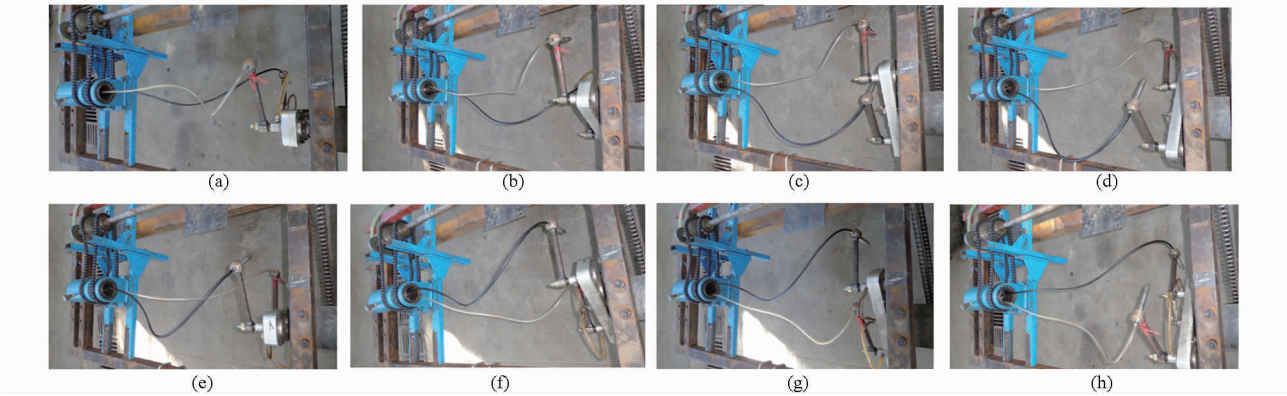


图 12 转换器不同角度测试图

Fig. 12 Different angles test of converter

(a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135° (e) 180° (f) 225° (g) 270° (h) 315°



图 13 深施机构喷肥区

Fig. 13 Spray liquid fertilizer area about picking hole mechanism

(a) 喷肥针入土喷肥 (b) 喷肥针出土喷肥

4.2 试验结果与分析

从表 1 数据中可知,各段时间测量的施肥量基本相同,系统在工作过程中并无堵塞及断流现象,说明该系统能够持久性工作满足作业需求。从图 12 得知,顶杆在空间凸轮轮廓线上完成整周运动时,期间该凸轮机构并无自锁现象。图 13a 为深施机构入土喷肥图,即系统在 47°角度测试图(顶杆在空间凸轮推程阶段起始点);图 13b 为深施机构出土喷肥图,即系统在 38°角度测试图(顶杆在空间凸轮回程阶段终止点)。从图中可知,喷肥针只在空间凸轮推程、远休止、回程阶段喷肥(N 为液态肥),说明空间凸轮轮廓曲线符合设计要求,凸轮机构运转平稳。

5 结论

- (1)运用 VB 6.0 编程软件,优化设计了空间凸轮,得到该凸轮的运动角、轮廓曲线以及平均圆柱半径参数值。
- (2)应用 Pro/E 软件,建立空间凸轮机构三维模型图,并对该机构进行运动学仿真。仿真结果表明:机构运动无干涉,顶杆运动规律符合余弦加速度规律,且在推程及回程运动过程中,无刚性冲击。
- (3)试验结果表明:当液泵压力为 0.4 MPa 时,输出轴转速为 69.75 r/min,此时空间凸轮机构与深施机构同步作周转运动,喷肥针喷射出的每次施肥量均基本相同,且只在空间凸轮推程到回程阶段喷肥,施肥量精准,转换器运转平稳,所设计的空间凸轮满足性能要求。

参 考 文 献

1 冯元琦. 美国高浓度液体肥料[J]. 化肥设计,2001,39(1):59-60.
2 王云霞. 液体肥料的应用现状与发展趋势[J]. 化肥设计,2003,41(4):10-13.

- Wang Yunxia. Present application situation of liquid fertilizer and its development tendency[J]. Chemical Fertilizer Design, 2003, 41(4): 10 – 13. (in Chinese)
- 3 王金武, 王金峰. 深施型液态施肥关键部件的设计与仿真[C]//中国农业工程学会 2009 年学术年会论文集, 2009.
Wang Jinwu, Wang Jinfeng. Design and simulation of key parts of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[C]//Proceedings of China Agricultural Engineering Association 2009 Annual Conference, 2009. (in Chinese)
- 4 刘亚华, 王金武, 王金峰, 等. 基于 Pro/E 及 ADAMS 液态施肥机扎穴机构的设计与仿真[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(2): 134 – 137.
Liu Yahua, Wang Jinwu, Wang Jinfeng, et al. Design and dynamic simulation of liquid fertilizer applicator pricking hole mechanism based on Pro/E and ADAMS[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(2): 134 – 137. (in Chinese)
- 5 何剑南, 王金武, 王金峰. 全等椭圆齿轮行星系扎穴机构的机理分析与设计[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
He Jiannan, Wang Jinwu, Wang Jinfeng. Mechanism analysis and design of planetary pricking hole mechanism with congruent elliptic gears[C]//Proceedings of China Agricultural Engineering Association 2011 Annual Conference, 2011. (in Chinese)
- 6 王金武, 潘振伟, 杨欣伦, 等. 深施型液态施肥机液肥转子式转换器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 110 – 115, 65.
Wang Jinwu, Pan Zhenwei, Yang Xinlun, et al. Design and experiment of rotary converter of liquid fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 45(10): 110 – 115, 65. (in Chinese)
- 7 王金武, 何剑南, 潘振伟, 等. 液态施肥机液肥分配器凸轮运动学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 77 – 82.
Wang Jinwu, He Jiannan, Pan Zhenwei, et al. Kinematic analysis and simulation of liquid fertilizer distributor's cam for liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 77 – 82. (in Chinese)
- 8 Chen Y. A liquid manure injection tool adapted to different soil conditions[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1729 – 1736.
- 9 Ying Yibin, Zhao Yun. Research in dynamic simulation of separating-planting mechanism of rice transplanter[J]. AMA-Agricultural Mechanization in Asia, 1997, 28(3): 15 – 19.
- 10 Morris D K, Ess D R, Hawkins S E, et al. Development of a site-specific application system for liquid animal manures[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999, 15(6): 633 – 638.
- 11 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)
- 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 赵匀, 高林弟, 陈建能, 等. 变形偏心非圆齿轮行星系分插机构设计和参数优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 74 – 77.
Zhao Yun, Gao Lindi, Chen Jianneng, et al. Design and parameters optimization of deformed eccentric non-circular gears transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 74 – 77. (in Chinese)
- 14 孙恒, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 151 – 168.
- 15 Hua Qiu, Chang Junlin, Zi Yeli, et al. A universal optimal approach to cam curve design and its applications[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(6): 669 – 692.
- 16 肖乾, 周新建. 凸轮机构的计算机辅助设计与运动仿真分析[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(4): 103 – 104.
Xiao Qian, Zhou Xinjian. The CAD and kinematics simulation of cam mechanism[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(4): 103 – 104. (in Chinese)
- 17 潘振伟. 液肥肥路转换器及输肥系统设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Pan Zhenwei. Design and experimental study of liquid fertilizer pipeline converter and transporting liquid fertilizer system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)