

液态施肥机液肥分配器凸轮运动学分析与仿真*

王金武 何剑南 潘振伟 王金峰 郎春玲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 应用 Visual Basic 6.0 软件对液态施肥机全等椭圆齿轮行星系扎穴机构喷肥针尖点的运动学方程进行编程, 获得针尖点位置的 y 分量图像和静轨迹。然后根据喷肥针入土时的施肥要求和分配器工作原理, 确定分配器凸轮各阶段的运动角和分配阀阀芯的运动规律, 并选定阀芯行程为 10 mm。在 VB 中编程获取凸轮的轮廓曲线并进行其压力角和曲率半径验证, 运用 Pro/E 软件对凸轮和分配器进行三维建模和运动学仿真, 得到阀芯在一个运动周期内的位移、速度和加速度图像。通过试验对此装置的每次施肥量进行测定, 结果表明每次施肥量达到要求, 所设计的凸轮符合工作要求。

关键词: 液态施肥机 扎穴机构 凸轮 分配器 设计

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0077-06

Kinematic Analysis and Simulation of Liquid Fertilizer Distributor's Cam for Liquid Fertilizer Applicator

Wang Jinwu He Jiannan Pan Zhenwei Wang Jinfeng Lang Chunling

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

Abstract: Using Visual Basic 6.0 software, the kinematics equations of the spray fertilizer needle tip point of fertilizer applicator's planetary pricking hole mechanism with congruent elliptic gears was programmed. The y -component image and static trajectory of the needle tip point's location was got. Then, according to the fertilizer requirements when spray fertilizer needle buried and distributor's working principle, the movement angle of distributor's cam and the motion law of distributor valve's spool were determined. The spool travel was selected as 10 mm. The cam's profile curve was got in VB and the pressure angle and radius of curvature were verified. The Pro/E software was used for 3-D model and kinematics simulation of the distributor and cam. The displacement image, speed image and acceleration image of spool within a movement cycle were got. Each fertilization volume of this device was measured through the test. The results showed that the each fertilization volume reached the required value and meet the job requirement.

Key words: Liquid fertilizer applicator Pricking hole mechanism Cam Distributor Design

引言

液体肥料是一种既经济又有效的肥料, 在国外已得到了较为广泛的应用, 在美国, 液体化肥占化肥总量的 35% 左右, 英国、德国、比利时、荷兰、墨西哥及俄罗斯等国也都在大量使用各种液体肥料^[1-2]。

深施型液态施肥机能很好地将液态肥施于作物根部附近土壤的一定深度中, 便于作物吸收, 同时减少了液态肥的挥发, 降低了污染^[3-4]。而扎穴机构和分配器是深施型液态施肥机的核心部件, 两者协调工作决定着施肥机工作性能。扎穴机构主要是保证喷肥针能够扎入一定的土壤深度中, 而分配器则

保证喷肥针入土时深施液态肥,出土时停施液态肥^[5]。液态肥从分配器出来后要经过扎穴机构内部的复杂管路才能从喷肥针流出^[6]。而在整个工作过程中起关键作用的是分配器凸轮。针对文献[3]中分配器和扎穴机构不能很好地配合工作,且分配阀阀芯行程过小,以致每次施肥量不足这一问题,本文提出一种更为合理的解决方法,即根据喷肥针尖点的静轨迹来确定凸轮运动角,同时加大阀芯行程,以确保每次更为准确地深施足量液态肥。

1 分配器工作原理

分配器结构如图1所示。液压泵通过2个分配阀分别向扎穴机构的2支交替扎穴的喷肥针提供液态肥。凸轮轴上的2个凸轮通过推动阀芯使2个分配阀交替开启,以确保喷肥针入土时施肥,出土时停止施肥。当凸轮处于推程、远休和回程状态时,分配阀开启;当凸轮处于近休状态时,分配阀关闭^[3]。

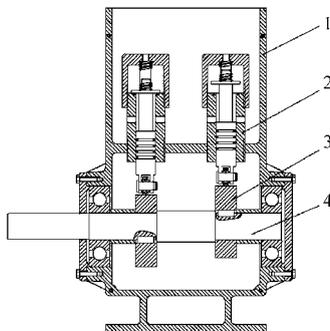


图1 分配器结构图

Fig.1 Structure diagram of distributor

1. 分配器壳体 2. 分配阀 3. 凸轮 4. 凸轮轴

2 凸轮运动角

应用VB语言对文献[6]中的扎穴机构运动学公式进行编程,得到喷肥针尖点位置的 y 分量图像和静轨迹,如图2和图3所示。其中 a 、 k 、 α_0 、 φ_0 、 S 和 H 是已知常量,由用户根据其他VB平台优化后获得的参数^[7-12]。

根据农艺要求,需要在离针尖运动轨迹最低点距离为 H (H 小于喷肥针入土深度)的范围内深施液态肥。由图2观察知,针尖轨迹最低点的 y 坐标为 y_{\min} ,所对应的扎穴机构行星架转角为 φ_{\min} 。距针尖轨迹最低点距离为 H 处的 y 坐标为 y_H ($y_H = y_{\min} + H$),所对应的扎穴机构行星架转角分别为 φ_{H1} 和 φ_{H2} ($\varphi_{H2} < \varphi_{H1} < 0$)。亦即行星架在旋转 $|\varphi_{H1} - \varphi_{H2}|$ 的范围内深施液态肥。

由分配器对扎穴机构的供肥原理知,行星架和分配器凸轮轴的转速比为1,这就要求分配器凸轮

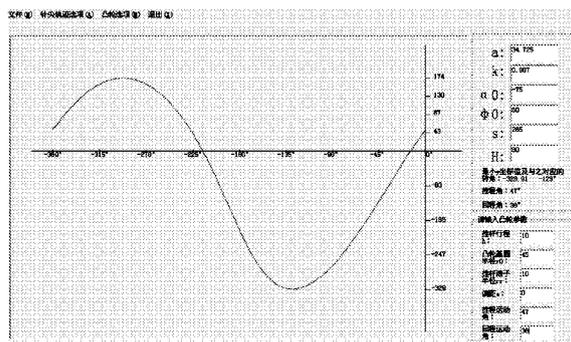


图2 喷肥针尖点位置 y 分量图像界面

Fig.2 y -component image interface of location of spray fertilizer needle's tip point

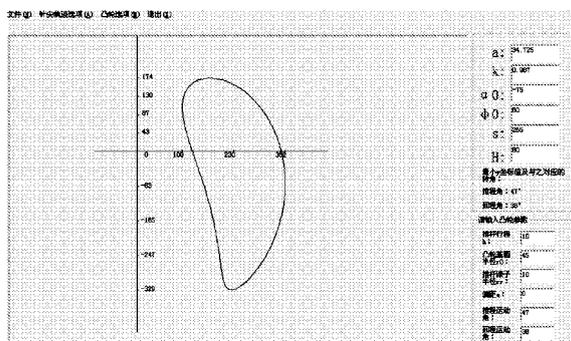


图3 喷肥针尖点的静轨迹界面

Fig.3 Static trajectory interface of tip point of spray fertilizer needle

的推程运动角、远休止角和回程运动角之和为 $|\varphi_{H1} - \varphi_{H2}|$ 。为了使分配器和扎穴机构更为协调的配合工作,使分配器在扎穴机构入土的过程中渐渐开启,出土的过程中渐渐关闭,且保证施肥路段为 H ,这就需要对凸轮廓线进行合理设计。

为满足上述要求,根据图2中行星架转角和喷肥针尖点位置的 y 分量之间的关系设计凸轮廓线,取凸轮廓线的推程运动角为 $|\varphi_{H1} - \varphi_{\min}|$,远休止角为零,回程运动角为 $|\varphi_{\min} - \varphi_{H2}|$ 。

3 凸轮优化设计

分配器采用直动滚子推杆盘形凸轮机构。根据其凸轮的工作条件,确定阀芯在推程和回程阶段均为正弦加速度运动规律,这样既无刚性冲击也无柔性冲击。

采用解析法对凸轮的轮廓曲线进行设计,建立如图4所示的 Oxy 坐标系。设 B_0 为凸轮推程段廓线的起始点,当凸轮转过 δ 角时推杆位移为 s ,此时滚子中心位于 B 点。

3.1 理论廓线

凸轮理论廓线坐标为

$$\begin{cases} x = (S_0 + S) \sin\delta + e \cos\delta \\ y = (S_0 + S) \cos\delta - e \sin\delta \end{cases} \quad (1)$$

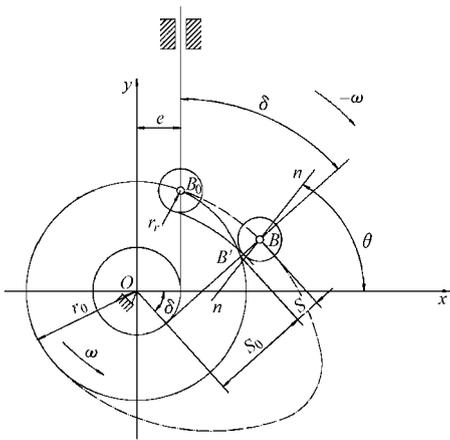


图 4 凸轮廓线分析图

Fig. 4 Analysis diagram of cam's profile curve

其中

$$S_0 = \sqrt{r_0^2 - e^2}$$

$$S = \begin{cases} h[\delta/\delta_{01} - \sin(2\pi\delta/\delta_{01})/(2\pi)] & (\delta \in [0, \delta_{01}], \text{推程}) \\ h[1 - (\delta - \delta_{01})/\delta_{02} + \sin(2\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02})/(2\pi)] & (\delta \in [\delta_{01}, \delta_{01} + \delta_{02}], \text{回程}) \\ 0 & (\delta \in (\delta_{01} + \delta_{02}, 2\pi], \text{近休}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 e ——偏距, mm
 r_0 ——凸轮基圆半径, mm
 δ ——凸轮转过角度, 逆时针为正, rad
 δ_{01} ——推程运动角, rad
 δ_{02} ——回程运动角, rad

3.2 工作廓线

凸轮工作廓线坐标为

$$\begin{cases} x' = x - r_r \cos\theta \\ y' = y - r_r \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \sin\theta = dx/(d\delta \sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2}) \\ \cos\theta = -dy/(d\delta \sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} dx/d\delta = (dS/d\delta) \sin\delta + (S_0 + S) \cos\delta - e \sin\delta \\ dy/d\delta = (dS/d\delta) \cos\delta - (S_0 + S) \sin\delta - e \cos\delta \end{cases} \quad (5)$$

$$dS/d\delta =$$

$$\begin{cases} (h/\delta_{01})[1 - \cos(2\pi\delta/\delta_{01})] & (\delta \in [0, \delta_{01}], \text{推程}) \\ (h/\delta_{02})[\cos(2\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02}) - 1] & (\delta \in [\delta_{01}, \delta_{01} + \delta_{02}], \text{回程}) \\ 0 & (\delta \in (\delta_{01} + \delta_{02}, 2\pi], \text{近休}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 r_r ——推杆滚子半径, mm
 θ ——理论廓线上 B 点处的法线与 x 轴的夹角, rad
 h ——推杆行程, mm

3.3 凸轮压力角

由 $\tan\alpha = (dS/d\delta - e)/[(r_0^2 - e^2)^{1/2} + S]$ 可得到压力角的计算公式

$$\alpha = \arctan |(dS/d\delta - e)/[(r_0^2 - e^2)^{1/2} + S]| \quad (7)$$

3.4 凸轮理论廓线曲率半径

曲率半径计算公式为

$$\rho' = (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2} / |\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}| \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \dot{x} = dx/d\delta \\ \dot{y} = dy/d\delta \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \ddot{x} = (d^2S/d\delta^2) \sin\delta + 2(dS/d\delta) \cos\delta - (S_0 + S) \sin\delta - e \cos\delta \\ \ddot{y} = (d^2S/d\delta^2) \cos\delta - 2(dS/d\delta) \sin\delta - (S_0 + S) \cos\delta + e \sin\delta \end{cases} \quad (10)$$

$$d^2S/d\delta^2 = \begin{cases} (2\pi h/\delta_{01}^2) \sin(2\pi\delta/\delta_{01}) & (\delta \in [0, \delta_{01}], \text{推程}) \\ -(2\pi h/\delta_{02}^2) \sin(2\pi(\delta - \delta_{01})/\delta_{02}) & (\delta \in [\delta_{01}, \delta_{01} + \delta_{02}], \text{回程}) \\ 0 & (\delta \in (\delta_{01} + \delta_{02}, 2\pi], \text{近休}) \end{cases} \quad (11)$$

在 VB 界面中输入一组通过优化获得的参数： $a = 34.725$ mm, $k = 0.987$, $\alpha_0 = -75^\circ$, $\varphi_0 = 60^\circ$, $S = 265$ mm, 并取 $H = 80$ mm, 得到的推程运动角和回程运动角分别为 47° 和 38° 。取 $h = 10$ mm, $r_0 = 45$ mm, $r_r = 10$ mm 和 $e = 0$ mm, 通过 VB 语言对式 (1) ~ (11) 进行编程, 得到凸轮轮廓曲线、压力角曲线和曲率半径曲线如图 5 ~ 7 所示。

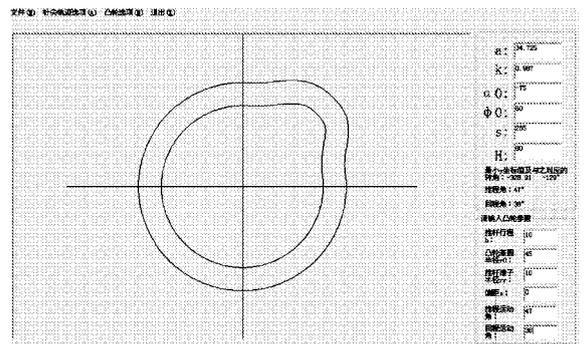


图 5 凸轮轮廓曲线界面

Fig. 5 Profile curve interface of cam

由图 6 知, 凸轮从 0° 转到 47° 时, 阀芯处于推程段, 在该段的最大压力角为 26.07° , 相应的凸轮转角为 23.5° ; 凸轮从 47° 转到 85° 时, 阀芯处于回程段, 在该段的最大压力角为 31.19° , 相应的凸轮转角为 67° 。推程段和回程段的最大压力角均小于许用压力角。由图 7 知, 凸轮的最小曲率半径为 15.87 mm, 大于推杆滚子半径 $r_r = 10$ mm, 满足设计要求。

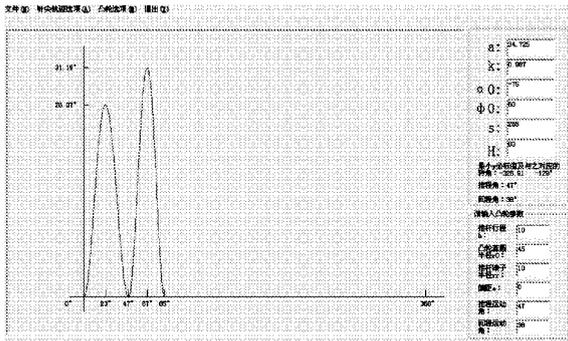


图6 凸轮压力角曲线界面

Fig. 6 Pressure angle curve interface of cam

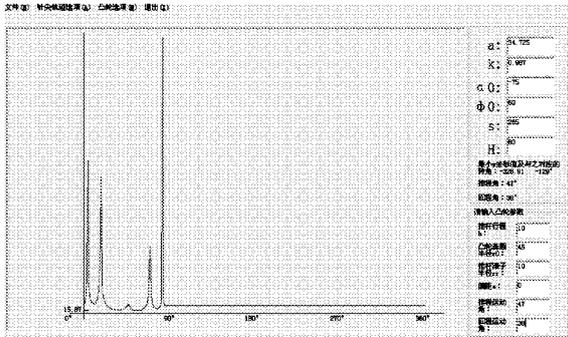


图7 凸轮曲率半径曲线界面

Fig. 7 Curvature radius curve interface of cam

4 凸轮三维建模与仿真

将所编写的凸轮轮廓曲线程序输入 Pro/E 软件中,绘制出凸轮轮廓曲线^[13],再采用拉伸功能,绘制出凸轮的三维模型如图 8 所示。

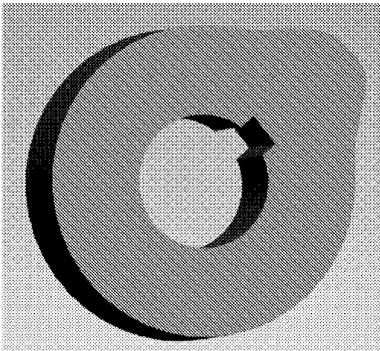


图8 凸轮三维模型

Fig. 8 3-D model of cam

对分配器凸轮机构进行三维建模,获得的三维模型如图 9 所示。应用 Pro/E 机构模块对分配器进行运动学仿真,设置凸轮的转速为 $30(^{\circ})/s$ 、仿真时间为 12 s,获得分配阀阀芯在一个运动周期内的位移曲线、速度曲线和加速度曲线如图 10 所示^[14-15]。

由图 10a 知,在 0 ~ 2.83 s 内,阀芯位移先逐渐增大,然后再慢慢减小;在 2.83 ~ 12.00 s 内,阀芯位移一直保持不变。由图 10b 知,在 0 ~ 1.57 s 内,阀芯先向上运动,速度逐渐增大再慢慢减小;在 1.57 ~ 2.83 s 内,阀芯向下运动,速度先增大后减小;在

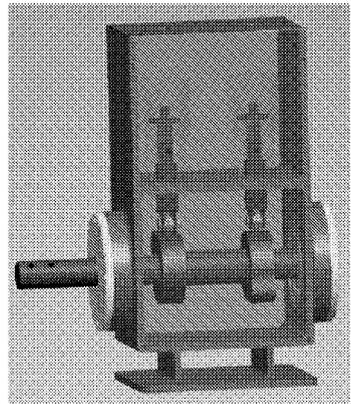
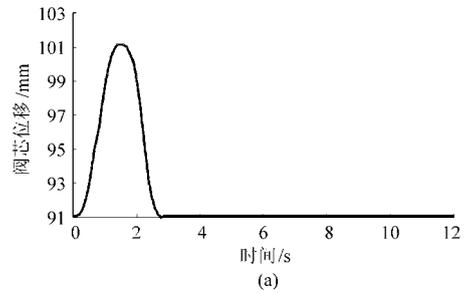
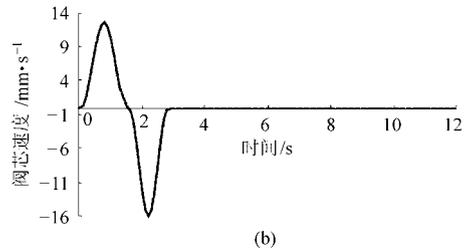


图9 分配器三维模型

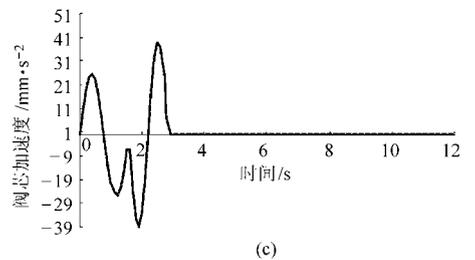
Fig. 9 3-D model of distributor



(a)



(b)



(c)

图10 阀芯位移、速度和加速度变化曲线

Fig. 10 Curve of spool's displacement, speed and acceleration

2.83 ~ 12.00 s 内,阀芯速度为零。图 10c 为阀芯在一个运动周期内的加速度变化规律,其在 0 ~ 1.57 s 和 1.57 ~ 2.83 s 内均呈正弦运动规律变化;在 2.83 ~ 12.00 s 内,加速度为零,该变化规律表明阀芯在推程段和回程段均按照所设计的正弦加速度运动规律运动。

结合图 10b 和图 10c 知,阀芯的速度和加速度均没有突变,说明阀芯在运动过程中既无刚性冲击也无柔性冲击。

5 试验

5.1 试验条件与方法

试验地点为东北农业大学工程学院农具实验

室,将设计的分配器安装在土槽台车上,分配器与扎穴机构之间通过链传动传递动力,并连接输肥管路。土槽台车固定在原位置不动,通过电动机带动凸轮轴和扎穴机构转动。液肥施用装置试验台如图 11 所示。

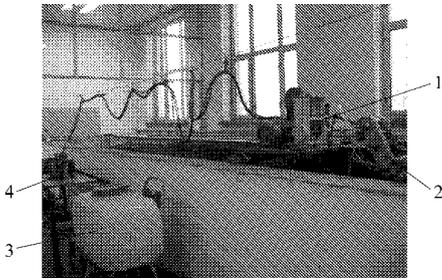


图 11 液肥施用装置试验台

Fig. 11 Test bed of liquid fertilizer application device

1. 分配器 2. 扎穴机构 3. 液肥箱 4. 液泵

试验以自来水代替液态肥,将凸轮轴转速固定在 50 r/min、喷肥针孔直径选为 2.5 mm,考察液泵压力 p 对每次施肥量的影响。选取因子 p 的 5 个水平为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa。各水平下均进行 6 次重复试验,每次试验均用量筒一次性量取喷肥针口处的 10 次施肥量,再取平均值。每次施肥量的计算公式为

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{10} Q_i}{10} \quad (12)$$

式中 Q_i ——喷肥针口处的单次施肥量,mL

Q ——每次施肥量,mL

5.2 结果与分析

通过试验测得液泵不同压力下的每次施肥量,结果如表 1 所示。

文献[3]中所述分配器其阀芯行程为 5 mm,在相同试验条件下每次施肥量平均值与本文试验结果对比如表 2 所示。

表 1 不同液泵压力下施肥量

Tab. 1 Fertilizer volume under different liquid

液泵压力/MPa	pump stresses						mL/次 平均值
	1	2	3	4	5	6	
0.2	10.2	10.3	10.2	10.3	10.4	10.1	10.3
0.3	13.5	13.3	13.2	13.2	13.0	13.4	13.3
0.4	14.6	14.7	14.5	14.6	14.5	14.7	14.6
0.5	17.5	17.5	17.4	17.5	17.3	17.8	17.5
0.6	19.5	20.0	19.7	20.0	19.8	19.6	19.8

表 2 每次施肥量试验结果对比

Tab. 2 Results comparison of each fertilizer

液泵压力/MPa	mL/次	
	阀芯行程/mm	
	10	5
0.2	10.3	9.6
0.3	13.3	11.6
0.4	14.6	14.0
0.5	17.5	16.0
0.6	19.8	18.0

从表 2 可知,当试验条件相同时,在各液泵压力下阀芯行程为 10 mm 比阀芯行程为 5 mm 的每次施肥量均有所提高。

6 结论

(1)设计的凸轮推程运动角为 47°,回程运动角为 38°,阀芯行程为 10 mm,压力角和曲率半径均满足设计要求。

(2)将凸轮轮廓曲线的程序输入 Pro/E 软件中,绘制出凸轮和分配器的三维模型,并进行运动学仿真。仿真结果表明:机构运动无干涉,且阀芯在运动过程中既无刚性冲击也无柔性冲击。

(3)通过试验测定知,阀芯行程为 10 mm 时每次施肥量比阀芯行程为 5 mm 时每次施肥量高。且当液泵压力为 0.6 MPa 时每次施肥量达 19.8 mL/次,接近所要求的 20 mL/次。

参 考 文 献

- 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)
- 汪家铭. 液体肥料的应用[J]. 四川化工,2000(1):31~33.
- 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)
- 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)
- 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(4):52~55.
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(4):52~55. (in Chinese)

- 6 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)
- 7 Womac A R, Tompkins F D. Probe-type injector for fluid fertilizers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1990,6(2): 149~154.
- 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 陈建能,赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. 农业机械学报,2003,34(5):46~49.
Chen Jianneng, Zhao Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(5):46~49. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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):73~74.
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):73~74. (in Chinese)
- 13 贾颖莲,何世松. Pro/E Wildfire 3.0 在凸轮机构优化设计与运动仿真中的应用[J]. 煤矿机械,2009,30(12):212~215.
Jia Yinglian, He Shisong. Optimum design and motion simulation of cam mechanism using Pro/E Wildfire 3.0[J]. Coal Mine Machinery, 2009,30(12): 212~215. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 高玉新,高元学. 基于 Pro/E 的凸轮机构设计和运动仿真[J]. 机械,2005,32(10):44~45.
Gao Yuxin, Gao Yuanxue. Design of cam mechanism and the motion simulation based on Pro/E[J]. Machinery, 2005,32(10): 44~45. (in Chinese)
- 16 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):60~65,59.
Wang Jinwu, Liu Yahua, Wang Jinfeng, et al. Optimization design and experiment of liquid-fertilizer applying deep-fertilization mechanism for planetary elliptic gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):60~65,59. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 88 页)

- 15 李南,滕飞. 基于 LabVIEW 的电机转速控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2006,14(6):796~797.  
Li Nan, Teng Fei. System design electro-motor rotational speed control based on LabVIEW[J]. Computer Measurement and Control, 2006, 14(6): 796~797. (in Chinese)
- 16 熊诗波,黄长艺,严普强. 机械工程测试技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2006:240~242.
- 17 蒙秉嵩. 远程测力器传感器的选择和设计[J]. 中国科技信息,2010,13(5):26~29.  
Meng Bingsong. Selection and design of the remote force measurement sensor[J]. China Science and Technology Information, 2010, 13(5): 26~29. (in Chinese)
- 18 杨青,王喆,陆钢庆. 基于 LabVIEW 的综合测试柜在创新实验中的应用[J]. 机械设计,2006,23(8):23~24.  
Yang Qing, Wang Zhe, Lu Gangqing. Application in the innovatory experiment of synthetic test cabinet based on LabVIEW [J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(8): 23~24. (in Chinese)
- 19 张毅刚. 虚拟仪器技术介绍[J]. 国外电子测量技术,2006,25(6):1~4.  
Zhang Yigang. Virtual instrument technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(6): 1~4. (in Chinese)
- 20 刘焯,庄庆德. 虚拟仪器在农业方面的应用现状[J]. 国外电子测量技术,2006,25(8):6~9.  
Liu Ye, Zhuang Qingde. Application actuality of virtual instrumentin agricultural [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(8): 6~9. (in Chinese)
- 21 于艳,龚丽农,尚书旗. 农机土槽试验动力学参数测试系统的研制[J]. 农业工程学报,2011,27(5):323~328.  
Yu Yan, Gong Linong, Shang Shuqi. Development of soil bin test dynamic parameters measurement system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 323~328. (in Chinese)