

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.011

基于 ADAMS 的甜菜收获机自动对行探测机构仿真*

王申莹 胡志超 彭宝良 吴惠昌 顾峰玮 王海鸥

(农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 设计了土下果实收获机械自动对行机构。应用 UG 建立了自动对行机构三维模型,并将其导入机械系统动力学仿真软件 ADAMS 中构建了虚拟样机模型。通过设置模型参数,添加约束和驱动,以甜菜为收获对象,实现了在 ADAMS/View 环境下自动对行的运动仿真。以自动对行机构复位弹簧的刚度、预紧力和作业前进速度为影响因素,以角度传感器获得的角速度为目标函数表征自动对行灵敏度及漏挖率,对影响自动对行的参数进行了虚拟正交试验研究,并进行了田间验证试验。结果表明,复位弹簧刚度的影响不显著,当复位弹簧预紧力为 200 N、作业前进速度为 1.5 m/s 时,漏挖损失率最小。

关键词: 甜菜 收获机 挖掘收获 自动对行 虚拟试验 ADAMS

中图分类号: S24; S225.7+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0062-06

Simulation of Auto-follow Row Detection Mechanism in Beet Harvester Based on ADAMS

Wang Shenying Hu Zhichao Peng Baoliang Wu Huichang Gu Fengwei Wang Haiou

(Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: An auto-follow row mechanism was designed. A three-dimensional model of the auto-follow row mechanism was built under the application of UG, and then imported to the mechanical system dynamics simulation software ADAMS to build a virtual prototype model. Taking beet as harvest object, the simulation of the auto-follow row movement in ADAMS / View environment was conducted by setting the model parameters, adding constraints and drive. Taking the return spring stiffness, reset spring preload and operating forward speed of the auto-follow row mechanism as influencing factors, and taking the angular velocity of the angle sensor as the objective function to characterize auto-follow row sensitivity and drain digging rate, a virtual orthogonal test of parameters was performed, which affected auto-follow row movement. A field verification test was also carried out and the results showed that the effect of the return spring stiffness was not significant. When the return spring preload force was 200 N, the forward operating speed was 1.5 m/s, and the drain dug loss rate was minimum.

Key words: Beet Harvester Digging harvest Auto-follow row Virtual experiments ADAMS

引言

甜菜、甘薯、花生、马铃薯、大蒜和胡萝卜等土下果实是我国农作物的重要组成部分,其生产机械化发展滞后,尤其是收获作业主要依赖人工和半机械

化完成^[1-4]。甜菜埋于地下,收获作业通常包括挖掘、输送、清土等多个环节,技术难度较大。目前甜菜主产区大量采用垄作方式,收获机械需要对行收获,尤其在挖掘作业时,对设备自动对行的作业要求较高^[5-6]。挖掘作业时若挖掘铲前进方向出现偏

收稿日期: 2013-05-02 修回日期: 2013-06-13

* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(200903053)、农业部 948 引进重点资助项目(2011-G10)和中国农业科学院基本科研经费资助项目

作者简介: 王申莹,助理工程师,主要从事农业生产装备工程智能化研究,E-mail: wangshenyong365@163.com

通讯作者: 胡志超,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

差,就会漏挖、少挖,还需要人工再次挖掘,损失大、作业效率低。收获机驾驶员为了对行行走,需不时调整前进方向,不仅驾乘操作人员劳动强度高,且对行作业准确性易受人为因素影响,难以保证收获作业效果和效率。因此,自动对行挖掘收获技术是提高甜菜收获机械自动化水平和作业性能的关键所在。

本文在分析国内外已有研究工作基础上,设计甜菜收获的自动对行机构。应用三维建模软件 UG 和机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 对所设计的自动对行机构进行建模和仿真分析,确定反映对行机构灵敏度的因素,采用正交试验优化各参数,并在甜菜种植地进行验证试验,以期为甜菜收获机械自动对行机构的设计提供理论参考。

1 结构与工作原理

甜菜收获机自动对行系统的探测机构结构如图 1 所示。固定架与收获机连接,挂杆上安装有左、右探测杆,固定架、挂杆与连杆构成平行四连杆机构,弹簧限位板与复位弹簧实现探测杆发生偏移后产生复位力,角度传感器通过传感器安装板与固定架固连,角度传感器半空心轴通过传感器支板和传感器连接轴与挂杆固连。机具作业时,左、右探测杆感知垄上甜菜块根的左、右偏移,带动挂杆、传感器支板和传感器连接轴转动,从而将探测杆左、右位移转换为角度变化传输给角度传感器,角度传感器将角度变化量转换成数字脉冲信号传输至控制器控制液压转向执行机构,实现自动对行。

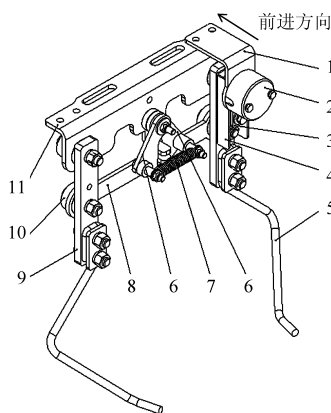


图 1 自动对行机构结构图

Fig. 1 Diagram of auto-follow row mechanism

1. 传感器安装板 2. 传感器保护罩 3. 传感器连接轴 4. 传感器支板
5. 左右探测杆 6. 弹簧限位板 7. 复位弹簧 8. 连杆
9. 挂杆 10. 轴承 11. 固定架

角度传感器采用美国 EPC 公司的三相方波输出光电增量式编码器 VLH11,最高转速 7 500 r/min,启动转矩 $1.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$,响应频率 100 kHz,分辨

率选用 3 600 C/R,且具有角度变化方向指示;为保证角度脉冲采样准确不丢失,角度传感器的脉冲输出均接至微处理器的外部中断输入口,使用边沿触发方式中断进行脉冲计数和方向判别。

2 建模与仿真

用三维软件 UG 建立自动对行探测机构三维模型,为了便于仿真、减少约束,模型中省略了螺栓、螺母和垫圈等紧固件,同时将用于仿真分析的甜菜简化为圆柱体^[7-9]。将建好的模型导出为 Parasolid 格式,并将其导入到 ADAMS 中,完成 UG 和 ADAMS 之间的图形数据转换。

在 ADAMS 中,以 Material Type 定义各零件和甜菜的材料属性。用布尔加 (Unite) 和布尔和 (Merge) 将相对静止的零件融合为一体。各轴承处用旋转副来模拟,弹簧限位板与连杆、固定架和探测杆与甜菜之间的关系用接触模拟。把收获机的前进运动等效为模型的直线运动。自动对行探测机构沿地面的直线运动通过在固定架和地面之间添加移动副来模拟^[10-13]。通过在移动副上添加平动驱动来模拟收获机的前进速度。运用冲击函数 (Impact) 方法定义探测杆和甜菜之间的碰撞力^[14-16],其由两个物体之间的相互切入而产生的弹性力和由相对速度产生的阻尼力组成。Impact 函数的一般表达式为

$$F_{\text{Impact}} = \begin{cases} 0 & (q > q_0) \\ k(q_0 - q)^e - c_{\text{max}}(dq/dt) \cdot \text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & (q \leq q_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 d ——切入深度 e ——碰撞指数
 c_{max} ——最大阻尼系数 k ——刚度
 q_0 ——两个要碰撞物体的初始距离
 q ——两物体碰撞过程中的实际距离
 t ——时间

为了防止碰撞过程中阻尼力的不连续,采用 step 函数,其形式为 $\text{step}(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$, 计算式为

$$\text{step} = \begin{cases} h_0 & (x \leq x_0) \\ h_0 + a\Delta^2(3 - 2\Delta) & (x_0 < x < x_1) \\ h_1 & (x \geq x_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $a = h_1 - h_0$ $\Delta = (x - x_0)/(x_1 - x_0)$

式中 x ——时间自变量

x_0 ——自变量 x 的初始值

x_1 ——自变量 x 的结束值

h_0 ——step 函数的初始值

h_1 ——step 函数的终值

参照文献[17~18], Impact 函数参数设定如表1所示。

表1 Impact 函数参数设定

Tab.1 Setting of Impact function parameters

参数	数值
碰撞指数	0.1
刚度/ $N \cdot mm^{-1}$	3 866
渗透深度/mm	0.1
阻尼系数/ $N \cdot s \cdot mm^{-1}$	0.50

为使自动对行机构的仿真与实际工作状态尽量相符,在 ADAMS 中给模型的每个旋转副和移动副添加摩擦力,并使整个模型处于同一个重力场中^[19~21]。自动对行机构虚拟样机模型如图2所示。

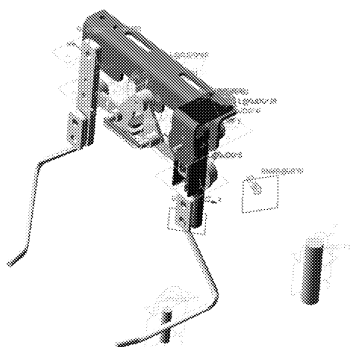


图2 自动对行机构虚拟样机模型

Fig.2 Auto-follow row mechanism virtual proto type

3 虚拟试验

3.1 试验指标

探测机构与挖掘铲之间的安装距离为 L , 在收获机前进 L 的时间内, 挖掘铲要完成对行作业, 所以整个自动对行系统完成自动对行的反应时间为

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (3)$$

式中 T_1 ——探测机构信号提取时间

T_2 ——控制器信号处理时间

T_3 ——液压转向执行时间

为了降低漏挖率, 就需要提高整个自动对行系统的灵敏度, 即减小系统的反应时间 T 。在控制器信号处理时间 T_2 和液压转向执行时间 T_3 相对固定的情况下, 通过减小探测机构信号提取时间 T_1 来减小系统反应时间, 提高系统灵敏度。探测机构动作示意如图3所示。由图可知

$$T_1 = \frac{\gamma}{\omega} = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{H}{R} \quad (4)$$

式中 γ ——角位移

H ——甜菜块根偏移量

R ——探测杆摆动半径

ω ——角度传感器获得的角速度

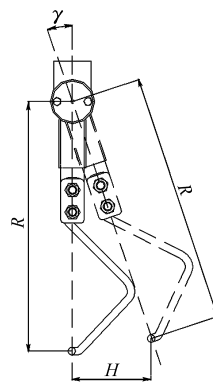


图3 探测机构动作示意图

Fig.3 Diagram of row detection action

由式(4)可知, 甜菜块根偏移量 H 和探测杆摆动半径 R 是定值, 要减小探测机构信号提取时间 T_1 , 可通过增大角速度 ω 来实现。因此虚拟试验采用角度传感器获得的角速度 ω 来评价自动对行系统的灵敏度。

3.2 单因素试验

采用 ADAMS 对自动对行探测机构的复位弹簧刚度、复位弹簧预紧力、机具的前进速度和角速度之间进行虚拟试验研究, 结果如图4所示。

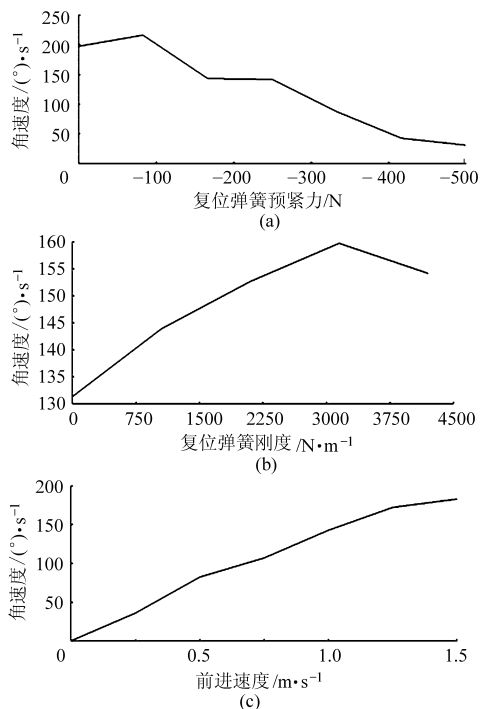


图4 复位弹簧预紧力、刚度和前进速度对角速度的影响

Fig.4 Impact of the reset spring preload, stiffness and forward speed for angular velocity

由图4a可知, 角速度随着复位弹簧预紧力(其中负号表示向弹簧收缩方向的拉力)的增大而呈逐渐减小趋势。这是因为随着复位弹簧预紧力的增

大,两探测杆之间的拉力也增大、摆动阻力增大,导致角速度减小。

由图 4b 可知,角速度随着复位弹簧刚度增大而呈先增大后减小的趋势。这是因为当弹簧刚度在较小的范围增大时,会减少两探测杆往复摆动现象的发生;当在较大的范围内增大时,过大的弹簧刚度就会阻碍探测杆摆动。

由图 4c 可知,角速度随着机具前进速度的增大而逐渐增大。这是因为当前进速度逐渐增大时,在通过探测机构与挖掘铲之间的安装距离 L 所需的时间减小,所以角速度增大。

3.3 虚拟正交试验

3.3.1 试验方案与结果

为了研究复位弹簧刚度、预紧力和机具前进速度对角速度的综合影响并确定自动对行探测机构的最优参数组合,进行了三因素三水平正交试验。考虑到甜菜实际挖掘收获前进速度不能太高,虚拟试验因素和水平设计如表 2 所示。选用 $L_9(3^4)$ 正交表^[22],试验方案和结果如表 3 所示。

表 2 正交试验因素与水平

Tab. 2 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	弹簧刚度	弹簧预紧	前进速度
	$a/N \cdot m^{-1}$	力 b/N	$c/m \cdot s^{-1}$
1	1 000	-350	0.5
2	2 600	-200	1.0
3	4 200	-50	1.5

表 3 试验方案和试验结果

Tab. 3 Test plan and experimental data

试验编号	A	B	C	$\omega/(^\circ) \cdot s^{-1}$
1	1	1	1	45.88
2	1	2	2	125.86
3	1	3	3	172.77
4	2	1	2	69.66
5	2	2	3	188.79
6	2	3	1	110.16
7	3	1	3	130.94
8	3	2	1	88.93
9	3	3	2	113.14

3.3.2 数据处理方法

虚拟试验数据统计分析处理与作图采用 Excel 2010、SPSS 和 Matlab 软件。

3.3.3 试验结果分析

对虚拟正交试验结果进行方差分析,给定显著性水平 0.05,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,因素 B、C 显著,而因素 A 不显著,对指标几乎无影响。

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	Sig.
模型	16 468.785	6	2 744.797	25.939	0.038
A	220.047	2	110.023	1.040	0.490
B	5 234.886	2	2 617.443	24.736	0.039
C	11 013.851	2	5 506.926	52.043	0.019
误差	211.632	2	105.816		
总和	16 680.416	8			

对虚拟正交试验的结果进行极差分析,结果如图 5 所示。由式(3)和式(4)分析可知,角速度 ω 越大,时间 T_1 越小, T 越小,进而灵敏度越高,漏控率越低。A 因素不显著,取适中值 A_2 。综合考虑,得出虚拟正交试验的最佳参数组合是 $C_3B_2A_2$,即复位弹簧预紧力为 -200 N、收获机前进速度为 1.5 m/s,复位弹簧刚度为 2 600 N/m。

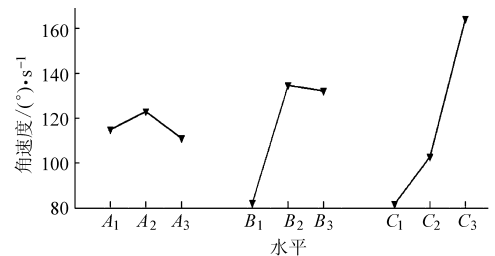


图 5 虚拟正交试验结果

Fig. 5 Result of virtual orthogonal test

4 田间验证试验

为了验证虚拟试验的结果,将自动对行装置装配在农业部南京农业机械化研究所研制的 4LT-A 型甜菜联合收获机上,并于 2012 年 10 月在内蒙古自治区乌兰察布市察哈尔右翼前旗巴音塔拉镇甜菜种植地进行了田间验证试验。

4.1 试验器材及设备

田间验证试验的设备主要有 4LT-A 型甜菜联合收获机和约翰迪尔 1054 型拖拉机。

4LT-A 型甜菜联合收获机的主要技术参数如表 5 所示。

主要器材有:TGT-100 型台秤(量程 100 kg,精度 0.02 kg),皮尺(量程 50 m,精度 1 cm),卷尺(量程 5 m,精度 1 mm),标杆,运动数码秒表。

甜菜试验地行距为 610 mm,垄高为 84 mm,株距为 354 mm,土壤含水率为 28.3%,土壤硬度为 105.4 N/cm²。甜菜果实直径为 110 mm,长度为 195 mm,出土高度为 42 mm,果实偏离行中心线距离为 95 mm。

4.2 试验设计

在收获期垄作甜菜种植地随机取一块 15 m ×

表5 4LT-A型甜菜收获机主要技术参数

Tab.5 Main technical parameters of 4LT-A beet harvester

参数	数值
结构型式	牵引式
配套动力/kW	≥51.5
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	4 850×2 700×3 050
工作行数	2(1行打叶,1行挖掘)
适应行距/mm	50~70(可调)
挖掘器前开口/mm	350
作业速度/m·s ⁻¹	0.46~1.67

90 m的地块,沿行方向取40 m长作为一次试验,按表3试验编号依次作验证试验,所有试验完成后,再按原次序重复2次验证试验。结果取3次试验的平均值,试验结果如表6所示。

表6 试验方案和试验结果

Tab.6 Experimental data

试验 编号	因素			漏挖率/%			
	$a/N \cdot m^{-1}$	b/N	$c/m \cdot s^{-1}$	试验1	试验2	试验3	平均值
1	1 000	-350	0.5	2.77	3.02	2.61	2.80
2	1 000	-200	1.0	2.25	2.17	1.98	2.13
3	1 000	-50	1.5	1.82	1.91	1.68	1.80
4	2 600	-350	1.0	2.60	2.53	2.84	2.66
5	2 600	-200	1.5	1.56	1.62	1.72	1.63
6	2 600	-50	0.5	2.29	2.37	2.56	2.41
7	4 200	-350	1.5	2.17	2.04	2.26	2.16
8	4 200	-200	0.5	2.68	2.47	2.43	2.53
9	4 200	-50	1.0	2.28	2.36	2.54	2.39

由上述分析可知,在影响漏挖率的其他因素假定不变的情况下,角速度 ω 越大,时间 T_1 越小, T 越小,进而灵敏度越高,漏挖率越低。由于在田间试验中传感器角速度不便测量,所以田间验证试验采用漏挖率来评价自动对行系统的灵敏性。漏挖率计算式为

$$\eta_L = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中 η_L ——漏挖率, %

W_1 ——40 m长度内漏挖的甜菜质量, kg

W_2 ——40 m长度内收获的甜菜质量, kg

4.3 数据处理方法

田间验证试验数据统计分析处理与作图采用Excel 2010、SPSS和Matlab软件。

4.4 试验结果分析

对田间验证试验结果进行方差分析,给定显著性水平0.05,结果如表7所示。

表7 方差分析

Tab.7 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	Sig.
模型	1.182	6	0.197	27.823	0.035
A	0.030	2	0.015	2.102	0.322
B	0.323	2	0.161	22.805	0.042
C	0.829	2	0.415	58.589	0.017
误差	0.014	2	0.007		
总和	1.196	8			

由表7可知,因素B、C显著,而因素A不显著,对指标几乎无影响。

对田间试验结果进行极差分析,结果如图6所示。由于角速度越大,灵敏度越高,漏挖率越低,所以漏挖率和灵敏度是负相关,角速度和灵敏度是正相关。A因素不显著,取适中值 A_2 。综合分析比较虚拟样机试验和田间验证试验结果可知:各因素对自动对行机构对行效果的影响趋势是一致的,优化出的最佳参数组合均是 $A_2B_2C_3$ 。

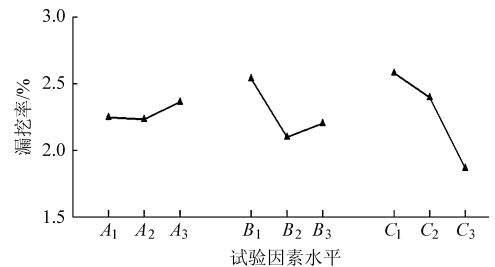


图6 田间正交试验结果

Fig.6 Result of field orthogonal test

5 结论

(1) 用建模软件UG建立了甜菜自动对行探测机构的三维模型,并将其导入机械动力学仿真软件ADAMS中,构建了虚拟样机模型。对虚拟样机模型添加各种约束,采用Impact函数模拟自动对行探测杆和甜菜块根之间的碰撞情况和自动对行过程。

(2) 对自动对行过程进行了虚拟试验,并将试验结果与田间验证试验数据进行了对比分析。结果表明,各因素对自动对行灵敏度的影响趋势一致,得出的最优参数组合均是 $A_2B_2C_3$,即复位弹簧刚度为2 600 N/m、预紧力为-200 N、收获机前进速度为1.5 m/s时,自动对行机构的灵敏性最高。

参 考 文 献

- 2 尚书旗,刘曙光,王方艳,等. 花生生产机械的研究现状与进展分析[J]. 农业机械学报,2005,36(3):143~147.
Shang Shuqi, Liu Shuguang, Wang Fangyan, et al. Current situation and development of peanut production machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3):143~147. (in Chinese)
- 3 Meeks T A, Flanders A. Profitability and resource allocation among cotton and peanuts when considering planting and harvest timelines[J]. Journal of Agricultural and Applied Economics, 2005, 37(1):249~261.
- 4 Kiniry J R. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas[J]. Field Crops Research,2005, 91(2):297~306.
- 5 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 多功能根茎类作物联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):58~61.
Hu Zhichao, Peng Baoliang, Yin Wenqing, et al. Design and experiment on multifunctional root-tuber crops combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8):58~61. (in Chinese)
- 6 杨然兵,尚书旗,王家胜,等. 根茎类作物收获机械自动对行技术的研究[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集. 北京:中国学术期刊电子出版社,2011.
- 7 张杨,区颖刚,牟向伟. 基于 ADAMS 的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(7):88~93.
Zhang Yang, Ou Yinggang, Mou Xiangwei. Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS [J]. Transactions of the CSAE,2009,25(7):88~93. (in Chinese)
- 8 贾晶霞,张东兴,郝新明,等. 马铃薯收获机参数化造型与虚拟样机关键部件仿真[J]. 农业机械学报,2005,36(11):64~67.
Jia Jingxia, Zhang Dongxing, Hao Xinming, et al. Parametric modeling and computer simulation of potato harvester parts [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):64~67. (in Chinese)
- 9 杜岳峰,毛恩荣,宋正河,等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):106~111.
Du Yuefeng, Mao Enrong, Song Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):106~111. (in Chinese)
- 10 贺俊林,胡伟,郭玉富,等. 扶禾杆在不对行导入玉米茎秆中的运动仿真[J]. 农业工程学报,2007,23(6):125~129.
He Junlin, Hu Wei, Guo Yufu, et al. Kinematic simulation of no-row feed-in mechanism with guide-rod for corn harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(6):125~129. (in Chinese)
- 11 杜岳峰,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(12):1~5.
Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12):1~5. (in Chinese)
- 12 林江娇,赵春芳,朱立学. 双螺杆挤压膨化机温升特性的仿真分析与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(16):47~53.
Lin Jiangjiao, Zhao Chunfang, Zhu Lixue. Simulation analysis and experiment of temperature rising characteristics in twin-screw extruder [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16):47~53. (in Chinese)
- 13 陈德民,槐创锋,张克涛,等. 精通 ADAMS 2005/2007 虚拟样机技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- 14 安雪斌,潘尚峰. 多体系统动力学仿真中的接触碰撞模型分析[J]. 计算机仿真,2008,25(10):98~101.
An Xuebin, Pan Shangfeng. Analysis of contact model in multi-body system dynamic simulation [J]. Computer Simulation,2008, 25(10):98~101. (in Chinese)
- 15 汤修映,肖丹,刘岭,等. ADAMS、Pro/E 和 ANSYS 间数据的自动传输技术[J]. 农业机械学报,2011,42(6):193~197.
Tang Xiuying, Xiao Dan, Liu Ling, et al. Data automatic transmission technology based on ADAMS, Pro/E and ANSYS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):193~197. (in Chinese)
- 16 裴未迟,李耀刚,李运红,等. 基于虚拟样机技术:ADAMS 的冲击力模型[J]. 河北理工大学学报,2008,30(4):59~63.
Pei Weichi, Li Yaogang, Li Yunhong, et al. The impact force models based on the virtual prototype:ADAMS [J]. Journal of Hebei Polytechnic University, 2008, 30(4):59~63. (in Chinese)
- 17 郭玉明,袁红梅,阴妍,等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):15~18.
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(7):15~18. (in Chinese)
- 18 吴亚丽,郭玉明. 高压脉冲电场对果蔬生物力学性质的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(11):336~340.
Wu Yali, Guo Yuming. Effect of high pulsed electric field on biomechanical properties of fruits and vegetables [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):336~340. (in Chinese)
- 19 宋占华,田富洋,张世福,等. 空载状态下往复式棉秆切割器动力学仿真与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(16):17~22.
Song Zhanhua, Tian Fuyang, Zhang Shifu, et al. Simulation and experiment of reciprocating cutter dynamics of cotton stalk under no-load [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16):17~22. (in Chinese)
- 20 褚志刚,蒋忠翰,吴优,等. 基于虚拟样机的倒立摆惯性参数实验台改进设计[J]. 农业工程学报,2011,27(5):141~146.
Chu Zhigang, Jiang Zhonghan, Wu You, et al. Improvement of inverted pendulum test bench for inertial parameters measurement based on virtual prototype [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(5):141~146. (in Chinese)
- 21 丛宏斌,李汝萃,俞高红,等. 爪式松土机仿真分析与优化设计[J]. 农业工程学报,2009,25(1):81~84.
Cong Hongbin, Li Ruxin, Yu Gaohong, et al. Simulation analysis and optimization design of claw scarifier [J]. Transactions of the CSAE,2009,25(1):81~84. (in Chinese)
- 22 王岩,随思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2012.