

# 4UX-550型马铃薯收获机悬挂机组液耦合仿真\*

史增录 赵武云 吴建民 牛海华 孙伟

(甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

**【摘要】** 应用 Pro/E 软件建立了 4UX-550 型马铃薯收获机与东方红 200P 型拖拉机悬挂机构参数化模型,进行了拖拉机悬挂机构与马铃薯收获机装配。将装配模型导入 ADAMS 中,建立了液压提升回路系统模型,进行了机械系统与液压系统的耦合仿真。结果表明,液压力驱动悬挂机组提升工况下,上悬挂点垂直方向出现最大力的时间要比机械力驱动滞后 0.080 s,下悬挂点滞后 0.088 s;下降工况下,上悬挂点滞后 0.056 s,下悬挂点滞后 0.060 s。液压力驱动与机械力驱动上、下悬挂点的受力基本相同,液压缸缓冲力的波动范围为 5.09 ~ 15.39 N。

**关键词:** 马铃薯收获机 悬挂机组 液压回路 耦合仿真

中图分类号: S225.7<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0098-05

## Suspension Unit Hydraulic-mechanical Coupling Simulation of 4UX-500 Potato Harvester

Shi Zenglu Zhao Wuyun Wu Jianmin Niu Haihua Sun Wei

(College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

### Abstract

The parametric model of 4UX-550 potato harvester and suspension device of Dongfanghong-200P tractor were established with Pro/E software, and the assembly of suspension device of tractor and potato harvester was accomplished. The assembly model was imported into ADAMS. The hydraulic lifting loop system model was established. Then, the coupling simulation of mechanical system and hydraulic system were advanced. The results showed that when hydraulic pressure driven suspension unit, top hanging point appearing the biggest force evenly delayed 0.080 s than that of the mechanical force driving, and lower hanging point delayed 0.088 s under lifting conditions; top hanging point delayed 0.056 s and lower hanging point delayed 0.060 s under dropping conditions. When top and lower suspension points at the same force under the drive by hydraulic pressure and mechanical, hydraulic cylinder buffer force was in the ranges of 5.09 ~ 15.39 N.

**Key words** Potato harvester, Suspension unit, Hydraulic loop, Coupling simulation

### 引言

长期以来,对悬挂机构的分析采用传统方法,即液压系统和机械动力学系统分开建模,液压系统模型不能反映马铃薯收获机在提升、下降时负载变化对液压系统的影响,使分析结果与实际情况的误差较大。本文利用仿真软件 ADAMS 对 4UX-550 型

马铃薯收获机的液压提升系统和悬挂机构进行耦合仿真分析。

## 1 马铃薯收获机及悬挂机组结构与工作原理

### 1.1 液压系统工作原理

液压系统一般由动力元件、执行元件、控制元件、工作介质和辅助装置等组成。液压提升系统工

收稿日期: 2010-07-30 修回日期: 2010-09-10

\* 甘肃省科技支撑计划资助项目(1011NKCA060)和甘肃省科技厅资助项目(0805XCNA076)

作者简介: 史增录, 硕士生, 主要从事农业工程技术与装备研究, E-mail: shizlfid@qq.com

通讯作者: 赵武云, 教授, 主要从事农业工程技术与装备研究, E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

作原理如图 1 所示。液压提升系统的工作状态取决于操纵阀的开启状态。操纵阀是转阀式控制阀,用旋转操纵杆来控制液压油流动的方向。操纵阀体上有 3 个油道,分别和油箱、齿轮泵、油缸相通<sup>[1]</sup>。

向后扳动操纵杆至提升位置,操纵阀阀芯关闭了回油道,油泵来油经操纵阀弧形油道通过缓冲阀进入油缸,推动活塞向后移动,使农机具提升。

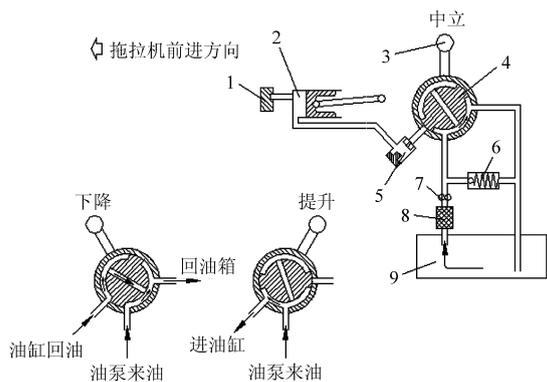


图 1 液压系统工作原理图

Fig. 1 Working principle of hydraulic system

1. 液压输出接头 2. 油缸 3. 操作杆 4. 转阀 5. 缓冲阀
6. 安全阀 7. 齿轮油泵 8. 滤清器 9. 油箱

向前扳动操纵杆至下降位置,操纵阀阀芯上的弧形槽连通油泵来油与回油道,油泵来油直接流回油箱;另一弧形槽通过径向孔连通油缸与回油道,油缸回油经缓冲阀流回油箱,农机具靠自身重力下降。此时油液可自由进出油缸,油缸处于浮动位置。

当操纵杆在中立位置,操纵阀将油缸油液封闭,油泵来油经阀芯的弧形油道和回油道连通,油液直接回油箱,使农具停留在某一位置。当油路发生故障,油液压力增大到安全阀的设定压力时,安全阀打开,使油液经安全阀流回油箱,起到保护液压系统的作用。

### 1.2 悬挂机构工作机理

悬挂机构(图 2)是拖拉机挂接马铃薯收获机的

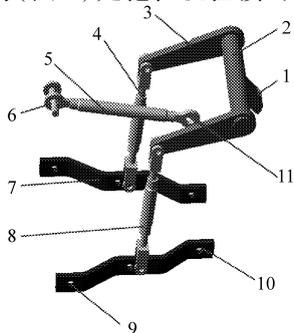


图 2 悬挂机构结构图

Fig. 2 Structure of suspension mechanism

1. 内提升臂 2. 提升轴 3. 外提升臂 4、8. 提升杆 5. 上拉杆
6. 上悬挂点 7. 下拉杆 9. 下悬挂点 10. 下连接点 11. 上连接点

中间机构,液压系统的液压缸作用于内提升臂,通过悬挂机构实现马铃薯收获机的工作、运输和升降等操作。利用悬挂机构将收获机提起,使收获机工作部件距地面高度不小于 300 mm,与拖拉机后轮之间的纵向间距大于 200 mm,路面通过角大于 20°<sup>[2]</sup>。作业时,利用悬挂机构将收获机下降,使其工作部件满足挖掘深度要求。悬挂机构提升过程中,马铃薯收获机工作部件的运动轨迹影响挖掘铲的入土能力,因此对悬挂装置进行仿真目的是分析悬挂机构上、下悬挂点的受力情况,寻找可满足工作要求的悬挂机构最佳工作参数<sup>[3]</sup>。

### 1.3 4UX-550 型马铃薯收获机主要技术参数

4UX-550 型马铃薯收获机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 马铃薯收获机的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of potato harvester

参数	数值
配套动力/kW	13.3 ~ 22.1
机具质量/kg	230
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	1 630×1 530×1 200
幅宽/mm	550
偏心距/mm	13.5
挖掘深度/mm	150 ~ 250

## 2 悬挂机组液耦合仿真模型建立

### 2.1 悬挂机组模型建立

由于 ADAMS 软件的实体建模功能不强,所以用 Pro/E 软件进行 4UX-550 型马铃薯收获机和东方红-200P 型拖拉机悬挂机构三维实体参数化造型,完成拖拉机悬挂机构与马铃薯收获机装配,形成机组装配模型,如图 3 所示。然后将 Pro/E 中的模型保存为抛物线 \*.X\_T 格式文件,将模型输入 ADAMS 中,进行仿真分析<sup>[4]</sup>。

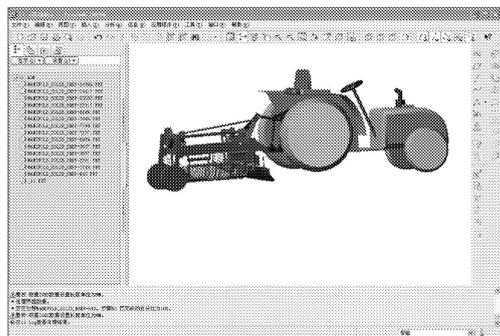


图 3 马铃薯收获机组模型界面

Fig. 3 Combination model of potato harvester

### 2.2 添加约束及机械力驱动模型

为了提高仿真的质量和效率,在进行机液耦合

仿真时,先进行机械模型的仿真分析,再进行机液的耦合仿真<sup>[5]</sup>。机械仿真完成后,只需删除添加在活塞上的作用力,选活塞和液压缸上的两个 Marker 点作为液压缸 Cylinder1 产生力的作用点。实际工作中,机具下降的最低位置由地面控制,故在仿真中用传感器来控制机具下降的最低位置。

模型以抛物线 \*.X\_T 格式输入 ADAMS 后,由于在数据转换的过程中可能出现特征的分离,因此需要对分离的特征进行布尔操作,使得输入的各个构件是一个完整的零件。布尔操作完成后,对各个零件添加质量信息,再根据实际情况添加约束,最后调整重力的方向进行仿真分析。机组的机械力驱动模型不包括大地共有 8 个移动部件,添加 8 个旋转副,1 个固定副,1 个移动副,1 个点线约束副,1 个单向力,1 个传感器。机组在进行机液耦合仿真时,只将单向力变为液压缸的液压力。机组机械力驱动时添加的约束如图 4 所示。

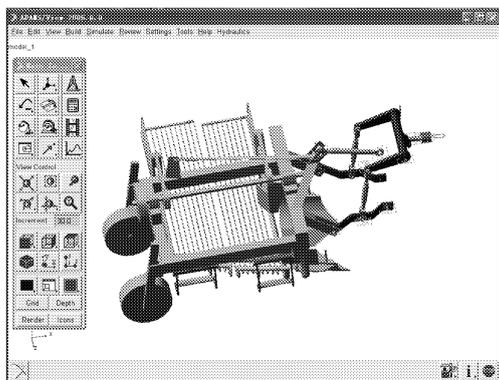


图 4 马铃薯收获机组约束界面

Fig. 4 Constraints of potato harvester

### 2.3 液压系统回路模型建立

在 ADAMS 中导入模型,添加约束后在 ADAMS/Hydraulics 中建立液压系统回路图,通过液压缸将悬挂机构与液压提升系统相连接,选择求解器进行分析。

根据悬挂机组液压系统的工作原理,在 ADAMS/Hydraulics 环境下建立液压回路,创建介质、恒压源、方向控制阀、单作用液压缸和油箱等液压元件,并进行环境参数设置。然后利用 Toolbox 中的 Reorient 调整各个元件的位置。再用 Connect 命令,依次选择液压元件的端口,将选定的液压元件连接到一起,如图 5 所示。

机械系统与液压系统是通过液压系统中的液压缸连接。ADAMS 中的液压缸有参数 I-Marker 点和 J-Marker 点,I-Marker 点和 J-Marker 点在机械系统中对应两个不同构件上的作用点,实现了液压系统与机械系统模型的关联,使得机械系统和液压系

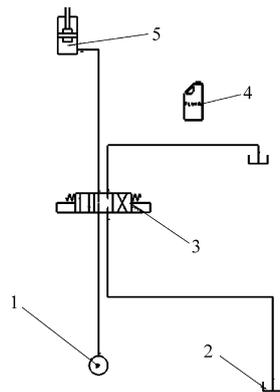


图 5 ADAMS 中液压提升系统回路示意图

Fig. 5 Sketch map of hydraulic lifting system circuit on ADAMS

1. 恒压源 2. 油箱 3. 三位四通方向换向阀 4. 工作介质
5. 单作用油缸

统可以在同一界面下同时进行仿真分析。

### 2.4 悬挂机构与液压提升系统参数及其关联

4UX-550 型马铃薯收获机配套使用东方红-200P 型拖拉机。该机采用 CBN-E306 齿轮泵,压力 16 MPa,排量 6 mL/r。油缸直径 63 mm,行程 800 mm。

根据液压缸的运动方程得液压缸活塞速度  $\bar{X}_1$  为<sup>[6]</sup>

$$\bar{X}_1 = \int_m^1 (A_1 p_2 - A_2 p_1 - B_p \bar{X}_1 - F_c - F_l) dt \quad (1)$$

式中  $p_1$ ——无杆腔压强,MPa

$p_2$ ——有杆腔压强,MPa

$A_1$ ——无杆腔面积,  $m^2$

$A_2$ ——有杆腔面积,  $m^2$

$B_p$ ——液压缸活塞粘性摩擦因数

$F_c$ ——液压缸活塞库仑摩擦力, N

$F_l$ ——液压缸活塞杆上所加的外负载, N

$m$ ——等效到液压缸活塞上的活塞及活塞杆质量, kg

马铃薯收获机液压系统模型与机械系统模型参数关联耦合关系如图 6 所示。液压系统模型计算出的状态参数(液压缸的压力  $p$ ),作为液压缸活塞杆的驱动力公式中的输入量,可以计算出驱动机械系统的液压缸液压力;机械系统模型中液压缸的位移和速度作为输入量,与液压系统模型中计算的无杆腔压力的压力区体积以及流量公式关联起来,实现液压系统仿真与收获机的状态和运动保持精确一致<sup>[7]</sup>。

## 3 仿真分析

### 3.1 悬挂机组机械力驱动仿真分析

液压缸的受力由有杆腔与无杆腔的压力差来平衡,计算公式为

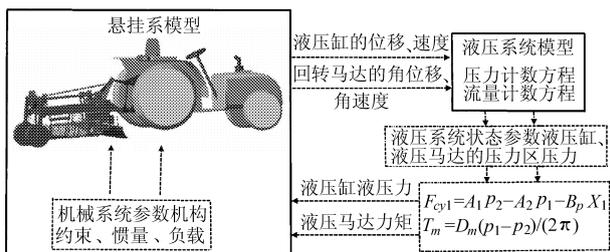


图6 悬挂机构模型与液压提升系统模型的参数关联

Fig.6 Parameters correlation between suspension mechanism model and hydraulic lifting system model

$$F = p_1 A_1 - p_2 A_2 = p_1 \frac{\pi D^2}{4} - p_2 \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \quad (2)$$

式中  $D$ ——活塞直径, m

$d$ ——活塞杆直径, m

根据负载决定压力的原理, 质量为 230 kg 的 4UX-550 型马铃薯收获机作用于液压缸的力  $F$  为 4 100 N, 即无杆腔压强为 14 MPa。施加在活塞上力的控制函数表达式为  $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 0.1, -41\ 000) + \text{STEP}(\text{time}, 0.9, 0, 1, 41\ 000) + \text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 2, 0)$ , 如图 7 所示。悬挂机组上、下悬挂点垂直方向作用力如图 8、9 所示。中央拉杆提升角的变化如图 10 所示。

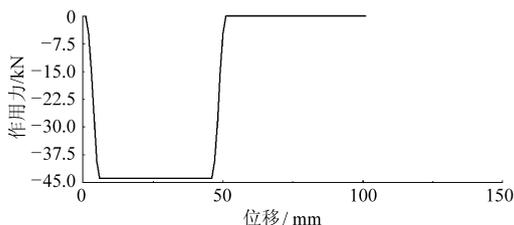


图7 作用于活塞的力控制函数曲线

Fig.7 Control function curve of force acting on the piston

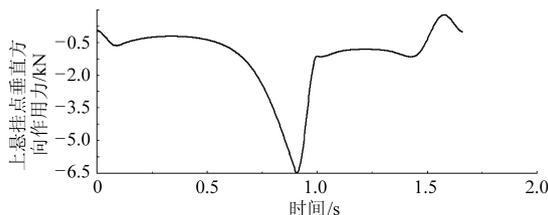


图8 上悬挂点垂直方向作用力变化曲线

Fig.8 Force curve in the vertical direction at top suspension point

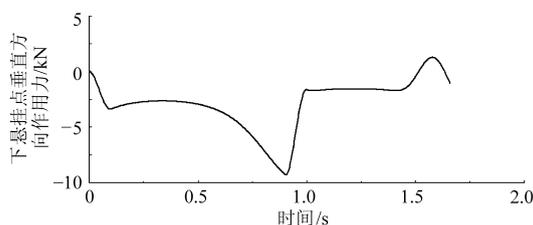


图9 下悬挂点垂直方向作用力变化曲线

Fig.9 Force curve in the vertical direction at lower suspension point

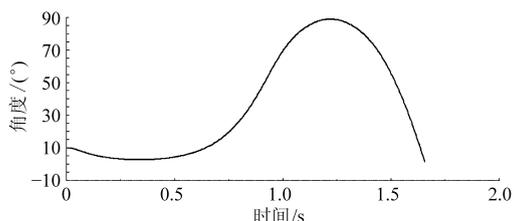


图10 中央拉杆的角度变化曲线

Fig.10 Angle curve of central rod

### 3.2 悬挂机组机液耦合仿真结果

在 ADAMS 环境中, 对马铃薯收获机悬挂机组的机液系统进行耦合仿真, 得到悬挂点的受力变化及液压系统的动态性能曲线<sup>[8]</sup>。三位四通方向控制阀阀芯控制函数为  $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 0.1, 0.5) + \text{STEP}(\text{time}, 0.9, 0, 1.1, -1) + \text{STEP}(\text{time}, 1.9, 0, 2, 0.5)$ , 如图 11 所示。液压缸活塞的速度曲线如图 12 所示。液压泵压力曲线如图 13 所示。液压缸无杆腔的压力曲线如图 14 所示。液压缸无杆腔的缓冲力曲线如图 15 所示。悬挂机组的上、下悬挂点上垂直方向作用力如图 16、17 所示, 在提升时中央拉杆的提升角的变化如图 18 所示。

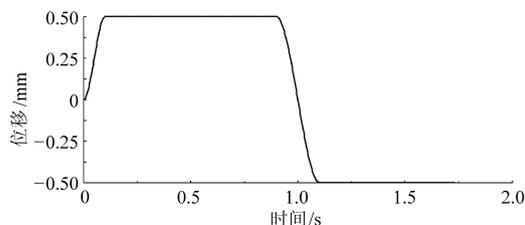


图11 三位四通方向控制阀控制函数曲线

Fig.11 Control function curve of tri-position four-way directional control valve

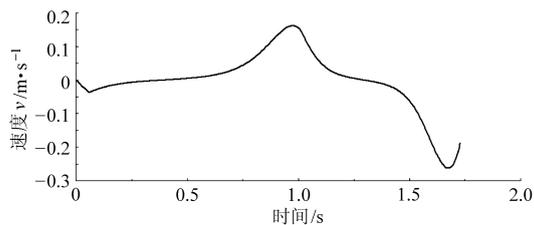


图12 液压缸活塞速度变化曲线

Fig.12 Speed curve of piston in hydraulic cylinder

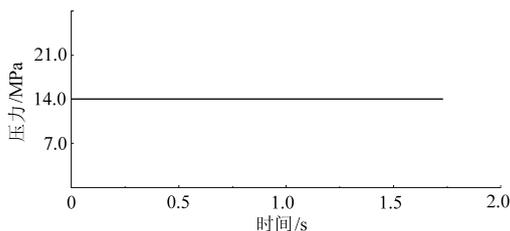


图13 液压泵压力变化曲线

Fig.13 Pressure curve of hydraulic pump

仿真表明, 机械力驱动控制机组情况下, 悬挂机构在提升时上、下悬挂点垂直方向的最大力分别为 6 479. 810 N 和 9 326. 102 N, 对应时间分别为 0. 908 s

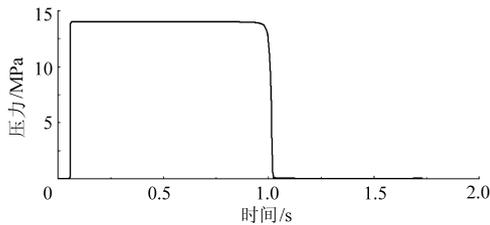


图 14 液压缸无杆腔压力变化曲线

Fig. 14 Pressure curve of rodless cavity in hydraulic cylinder

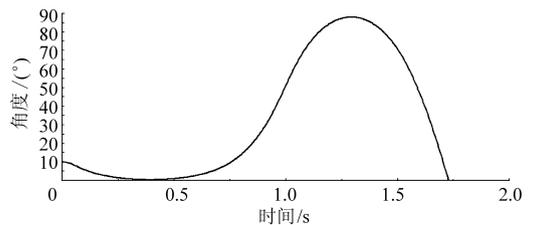


图 18 中央拉杆提升角变化曲线

Fig. 18 Enhancing angle curve of the central rod

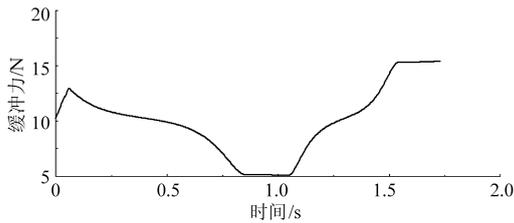


图 15 液压缸无杆腔缓冲力变化曲线

Fig. 15 Buffer force curve of rodless cavity in hydraulic cylinder

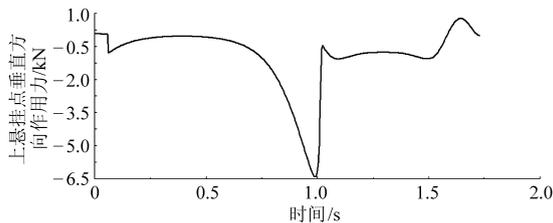


图 16 上悬挂点垂直方向受力变化曲线

Fig. 16 Force curve in the vertical direction at top suspension point

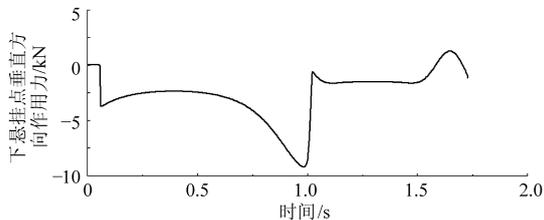


图 17 下悬挂点垂直方向受力变化曲线

Fig. 17 Force curve in the vertical direction at lower suspension point

和 0.904 s; 悬挂机构下降时上、下悬挂点垂直方向的最大力分别为 1 157.049 N 和 1 725.633 N, 对应时间分别为 1.432 s 和 1.416 s。机液耦合控制机组

情况下, 悬挂机构提升时上、下悬挂点垂直方向的最大力分别为 6 422.537 N 和 9 215.737 N, 对应时间分别为 0.992 s 和 0.984 s; 悬挂机构下降时上、下悬挂点垂直方向的最大力分别为 1 069.204 N 和 1 622.719 N, 对应时间分别为 1.492 s 和 1.472 s。机液耦合仿真时, 液压缸缓冲力在提升时最大为 12.92 N, 最小为 5.09 N; 下降时最大为 15.39 N, 最小为 10.07 N。

#### 4 结论

(1) 在 ADAMS 环境下建立了 4UX-550 型马铃薯收获机悬挂机组的机械与液压系统的虚拟样机模型, 并进行了耦合仿真, 直观地显示了耦合仿真时机组的动作情况, 得到液压系统的动态性能曲线。

(2) 液压力驱动时悬挂点在垂直方向出现最大受力的时间要比机械力驱动时滞后。上悬挂点在提升时滞后 0.080 s, 下降时滞后 0.056 s; 下悬挂点在提升时滞后 0.088 s, 下降时滞后 0.060 s。机液耦合仿真技术能够精确地研究液压系统中的滞后问题。

(3) 液压力驱动时悬挂点在垂直方向最大受力比机械力驱动时小。上悬挂点在提升时小 57.28 N, 下降时小 87.85 N; 下悬挂点在提升时小 110.37 N, 下降时小 102.92 N。悬挂机组机械力驱动时能正常工作, 保证液压力驱动时机组是安全的。

(4) 机液耦合时, 悬挂点上的受力与机械力驱动时基本一致的情况下, 液压缸的缓冲力的波动范围为 5.09 ~ 15.39 N, 表明悬挂机组液压系统符合设计要求。

#### 参 考 文 献

- 1 第一拖拉机股份有限公司. 东方红 200P 拖拉机使用保养说明书[M]. 洛阳: 第一拖拉机股份有限公司, 2004: 1~40.
- 2 马国军, 赵武云, 张炜, 等. 4UX-550 型马铃薯收获机悬挂机构仿真研究[J]. 农业机械, 2009(5): 84~86.
- 3 北京农业工程大学. 农业机械学: 上册[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 37~51.
- 4 贾生活, 刘国春, 史增录. 仿真技术 ADAMS 在种子加工机械设计中的应用[J]. 种子世界, 2009(9): 53~54.
- 5 刘静, 潘双夏, 冯培恩. 基于 ADAMS 的挖掘机液压系统仿真技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 109~112.  
Liu Jing, Pan Shuangxia, Feng Peien. Study on simulation technology of excavator hydraulic system based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 109~112. (in Chinese)
- 6 Zhang Wei, Sun Menghui, Wang Yiqun. Research of automatic gauge control model in hydraulic screw-down system of strip mill[C] // Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou, China: 2005: 717~721.

表2 不同玉米品种参数值

Tab.2 Parameters of different maize varieties

玉米品种	弯曲强度/MPa	弹性模量/Pa	抗倒伏性能
H127R	9.9	1458.7	优
齐单6	7.6	791.0	良
辽508	6.2	818.8	中
天泰33	6.1	978.2	良
吉853	3.4	769.9	差

优逐渐递减至差;同时,当玉米秸秆的弹性模量由大到小递减时,其抗倒伏性能也相应的由强到弱。由此可得出:玉米秸秆的抗倒伏性能与其弯曲强度近似呈正相关关系,与其弹性模量也近似呈正相关关系。

## 5 结论

(1)利用电子万能试验机测定5个不同抗倒伏性能的玉米秸秆抗压强度和弹性模量,得出不同品种玉米秸秆抗压强度和弹性模量存在明显差异。

(2)设计了基于简支梁和悬臂梁模型的玉米秸秆弯曲强度测定仪和弹性模量测定仪,达到了适合野外工作、便于携带等要求,实现了压力与相应参数的同步瞬时显示和峰值显示,实现了测定数据的自动存储,便于数据离线分析和研究。

(3)利用测定仪,对5个不同品种的玉米秸秆进行了测定并与其抗倒伏性能进行关联性分析。试验结果表明,不同玉米品种的弯曲强度和弹性模量与秸秆抗倒伏性能均呈正相关关系。

## 参 考 文 献

- 高梦祥,郭康权,杨中平,等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报,2003,34(4):47~49.  
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(4):47~49. (in Chinese)
- Martin M J, Russell W A. Correlated responses of yield and other agronomic traits to recurrent selection for stalk quality in a maize synthetic[J]. Crop Science,1984,24(4):746~750.
- 袁志华,李云东,陈合顺,等. 玉米茎秆的力学模型及抗倒伏分析[J]. 玉米科学,2002,10(3):74~75.  
Yuan Zhihua, Li Yundong, Chen Heshun, et al. Dynamic model and lodging resistance analysis of maize stem[J]. Journal of Maize Sciences,2002,10(3):74~75. (in Chinese)
- 赵安庆,袁志华. 玉米茎秆抗倒伏的力学机制研究[J]. 生物数学学报,2003,18(3):311~313.  
Zhao Qing'an, Yuan Zhihua. Dynamic studies on maize stem lodger resistance[J]. Journal of Biomathematics, 2003,18(3):311~313. (in Chinese)
- 袁志华,冯宝萍,赵安庆,等. 作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J]. 农业工程学报,2002,18(6):30~31.  
Yuan Zhihua, Feng Baoping, Zhao Anqing, et al. Dynamic analysis and comprehensive evaluation of crop-stem lodging resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2002,18(6):30~31. (in Chinese)
- 勾玲,赵明,黄建军,等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究[J]. 作物学报,2008,34(4):653~661.  
Gou Ling, Zhao Ming, Huang Jianjun, et al. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2008,34(4):653~661. (in Chinese)
- 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):14~18.  
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(7):14~18. (in Chinese)
- 杨洪昌,范源洪,吴正焜,等. 甜高粱抗倒伏性状评价及其倒伏系数初探[J]. 作物杂志,2008(3):54~56.  
Yang Hongchang, Fan Yuanhong, Wu Zhengkun, et al. Preliminary study of evaluation of lodging resistance and coefficient on sweet sorghum[J]. Crops,2008(3):54~56. (in Chinese)
- 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

(上接第102页)

- 伦冠德. 拖拉机液压悬挂装置的建模及仿真分析[J]. 机床与液压,2007,35(6):539~541.  
Lun Guande. Modeling and simulation analysis to the tractor hydraulic hitch system[J]. Machine Tool & Hydraulics,2007,35(6):539~541. (in Chinese)
- 王国强,张进平,马若丁. 虚拟样机技术及其在ADAMS上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002:108~131.
- Li S P, Meng Y M. Research on the working mechanism and virtual design for a brush shape cleaning element of a sugarcane harvester [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002,129(1~3):418~422.
- 中国农机化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1990:50~150.