

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.019

# 谷物联合收获机测产系统性能试验\*

武佳<sup>1</sup> 李民赞<sup>1</sup> 郑立华<sup>1</sup> 安晓飞<sup>1</sup> 张亚静<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

**【摘要】** 引进 Ag Leader 谷物测产系统,在国产中小型谷物联合收获机平台上开展了测产系统性能试验。谷物测产系统主要由包括流量传感器等在内的多路传感装置、终端显示及控制平台和 GPS 系统构成。首先进行了系统传感器的标定试验,然后进行了田间小麦的收获试验。将试验获得的产量数据进一步进行了处理,通过产量数据点的空间自相关性分析发现,产量值采样点在 20 m 范围内的相互依赖程度较高;半方差分析表明,测产区域的产量分布空间变异明显,呈现空间聚集分布的特点。克里格插值后的产量分布图呈现斑状分布的趋势,也直观反映了聚集分布的特征,可以为精细农业的实施提供必要的理论依据。

**关键词:** 联合收获机 测产系统 精细农业 半方差分析 产量分布图

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0095-05

## Performance Test of Yield Monitor System for Grain Combine Harvester

Wu Jia<sup>1</sup> Li Minzan<sup>1</sup> Zheng Lihua<sup>1</sup> An Xiaofei<sup>1</sup> Zhang Yajing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

Ag Leader grainyield monitor system was introduced. The yield monitor system experiment was carried out on the domestic medium and small combine harvester. The grain yield system was mainly composed of multi-channel sensors including grain flow sensor, terminal display processor and GPS system. First, the calibration experiment of system was executed. And then, the harvesting experiment of winter wheat in the field was performed and the acquired data were processed. With the analysis of spatial autocorrelation method, yield data presented high dependence within 20 m. Semi-variance analysis showed that the variation of the yield data was obvious which presented the property of aggregated distribution. The yield map based on Kriging interpolation showed the trend of patch distribution and the properties of aggregated distribution. The experimental results could provide necessary theoretical evidence for the application of precision agriculture.

**Key words** Combine harvester, Yield monitor system, Precision agriculture, Semi-variance analysis, Yield map

### 引言

谷物产量是精细农业中需要获取的重要信息之

一,它集中反映了农田信息(土壤理化特性、化肥施用情况、灌溉条件、病虫害等)对产量的影响。实时获取产量的分布信息和由此生成的产量分布图是进

收稿日期: 2012-07-06 修回日期: 2012-08-03

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101900)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B04、2011BAD21B01)

作者简介: 武佳,硕士生,主要从事通信技术在农业中应用研究,E-mail: wujia871012@163.com

通讯作者: 李民赞,教授,博士生导师,主要从事精细农业研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

行处方农作的重要依据<sup>[1-3]</sup>。通过对产量分布图的分析,可以较为准确地预测各个农田区域的产量信息,精确到米级,从而为变量施肥、合理灌溉以及农药等的施用提供科学的管理和决策依据。

据统计,目前美国大约有一半的玉米和大豆产区使用带有测产系统的联合收获机进行收获<sup>[4-5]</sup>,逐步实现了产业化。国外主流机型一般割幅较宽,地块距离长,可以保证测产系统在稳定的状态下工作。国内相关研究的进展主要包括设备引进、消化吸收进而实现自主创新。中国农业大学精细农业研究中心先后开展了基于 $\gamma$ 射线式和冲击式产量监测技术的研究,并取得了一定的成果<sup>[6-9]</sup>。但是到目前为止,国内还没有商业化的测产系统。国产主流谷物联合收获机一般割幅小于3 m,且地块较小,给谷物流量传感器精度带来较大的影响。本研究引进 Ag Leader 谷物测产系统,在国产中小型谷物联合收获机平台上开展测产系统性能试验研究,并将之应用到田间谷物测产试验中,进行产量数据的空间变异规律分析,生成产量空间分布图,验证系统的性能。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 系统构成

本研究选用 Ag Leader 谷物测产系统 (Ag Leader Technology, USA) 作为研究对象,系统主要包括 2 个 CAN - Bus 模块、多路信息采集传感器以及终端显示控制平台。CAN - Bus 模块用于多路传感器信号的接入,以实现终端显示控制平台和各个传感器节点之间的通信。传感器部分包括割台高度传感器、地速传感器、升运器转速传感器、水分传感器以及冲击式流量传感器。显示控制平台部分为触摸式显示器,可以实现 CAN 总线数据的接收、解析和实时显示成图等功能,还包含一个 USB 数据导出接口和 GPS 信号接入串口。收获机总体安装结构如图 1 所示。

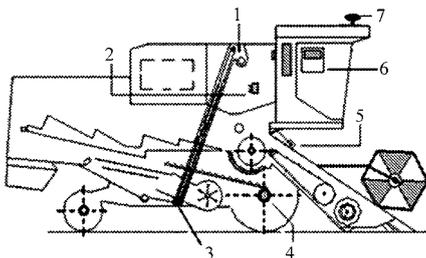


图 1 测产系统总体结构图

Fig. 1 Framework of yield monitor system

1. 流量传感器 2. 水分传感器 3. 升运器转速传感器 4. 地速传感器 5. 割台高度传感器 6. 显示处理器 7. GPS 接收天线

### 1.2 试验用谷物联合收获机

试验选用洛阳中收机械装备有限公司生产的东方红 4LZ - 2.5 型联合收获机,参数如表 1 所示。

表 1 收获机参数

Tab. 1 Parameters of combine harvester

参数	数值
发动机功率/kW	67.5
喂入量/kg·s <sup>-1</sup>	2.5
工作质量/kg	4 300
割幅/mm	2 360
外形尺寸/mm × mm × mm	6 065 × 2 726 × 3 260

### 1.3 测产系统主要传感器

#### 1.3.1 流量传感器

Ag Leader 流量传感器采用冲击式测量原理<sup>[10-12]</sup>。在联合收获机收获作业时,谷物流由净粮升运器带到谷仓入口并被抛向谷仓,击打在传感器上,谷物流具有质量,运动着的谷物流就具有一定的动量,若假定谷物流在与感力板碰撞后的速度近似为零,则根据物理学冲量的定义可知

$$I_i(t) = m_i(t)v_i(t) \quad (1)$$

式中  $I_i(t)$ ——谷物冲量,kg·m/s

$m_i(t)$ ——谷物流质量,kg

$v_i(t)$ ——谷物流速度,m/s

从理论上讲,连续测量谷物碰撞传感器感力板后其动量的变化就可以实现谷物累积质量的实时测量,也就是实现谷物流量的测量。

#### 1.3.2 其他传感器

系统选用的速度传感器类型为霍尔传感器,分别包括地速传感器和升运器转速传感器。地速传感器测量收获机的行进速度,通过计算收获机的行进速度,同时乘以收获机的割幅宽度,可以计算出收获机的实际收割面积。升运器转速传感器记录升运器底部传动轴的转速,从而可以计算出粮食在抛向谷仓时的近似初速度,配合流量传感器计算出谷物流的质量。

割台高度传感器为系统的启动控制选择使能输入端,同时配合升运器转速传感器,使测产系统正常启动,进行数据点采样。这里需要注意的是系统的启动时间不能过早,同时在收获完毕之后也应及时关闭。

水分传感器记录收获谷物(小麦)籽粒的含水率,通过谷物籽粒含水率的计算,将谷物收获量换算成标准产量,即谷物的干质量。此外,还可以判断收获区域的平均谷物含水率,来决定是否适宜进行收获作业。

GPS 选用的美国 Trimble 公司生成的 AG332 型号接收机,采用差分信号。GPS 接收天线安装在收获机谷仓顶端边壁上。图 2 是各个传感器的外观和安装结构示意图。

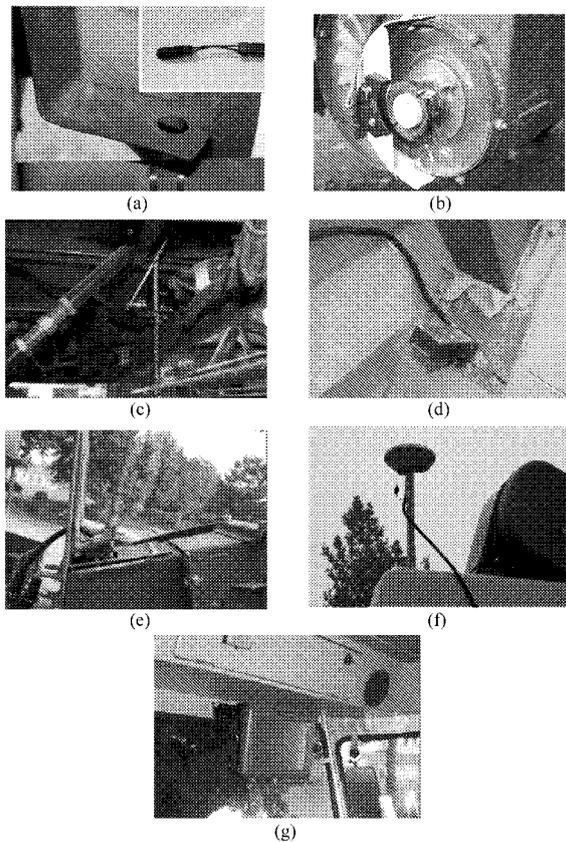


图 2 各传感器和显示器安装示意图

Fig. 2 External installation view of each sensor and displayer

(a) 地速传感器 (b) 升运器转速传感器 (c) 割台高度传感器  
(d) 水分传感器 (e) 流量传感器 (f) GPS 接收天线 (g) 显示器

## 2 田间试验与结果分析

### 2.1 田间试验

试验地点在山东省桓台县新城镇农业示范基地,收获作物为小麦。时间为 2012 年 6 月 13 日下午,当日午后平均气温在 30 ℃ 左右。

在田间收获开始前对各个传感器进行了标定试验,首先进行速度传感器的标定试验。打开显示器的 Calibration 标定界面,默认 50 m 距离进行标定,进行了多次距离标定试验,误差均在 2% 以内。然后进行了流量传感器的标定试验,系统初始显示总计收获质量 2 111 kg,实际质量为 1 851 kg,初始误差为 14.04%,二者之间误差偏大的原因一是由于地块较小收获机割台下降/升起较频繁,二是割幅偏窄,谷物流较小使得原设计的流量传感器刚度系数需要修正。用实际产量值除以初始显示产量值,得到一个标定系数为 0.876 8。将该系数输入测产系统,可将实际预测误差控制在 5% 以内。最后分

别进行了割台高度传感器和水分传感器等的性能试验,满足说明书要求。

### 2.2 产量数据自相关性分析

通常情况下在采样数据高值区附近数据一般也较高,在低值区附近则较低。空间变化并不是完全独立的。自相关系数是分析各采样点之间相关性的较好方法。选用常见的 Moran's I 方法计算产量值空间自相关系数。图 3 是采样点间隔 2.67 m 条件下的自相关系数变化趋势图。

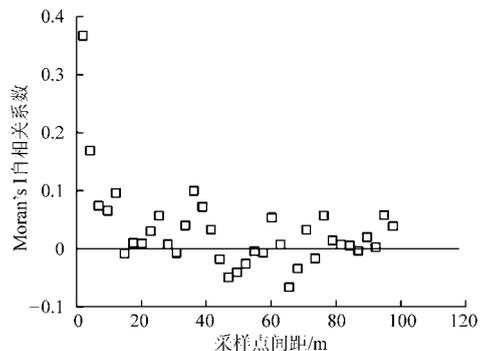


图 3 自相关系数随采样点间距变化

Fig. 3 Autocorrelation coefficient with sampling point interval

通过观察空间自相关系数散点分布图的变化趋势,可以发现采样点间距自 0 m 处上升至 20 m 左右时,自相关系数由 0.369 迅速降为 0。随着采样点间距的增加,自相关系数呈现出了周期性的趋势,在 0 值上下波动并减小。自相关系数直接反映了产量数据点间的依赖程度,或者说相关程度。通过上述分析,可以得出:在 20 m 以内的采样间距内,产量数据点空间相关性程度较高,当大于 20 m 时,相关性明显降低,可以近似认为产量数据点之间是相互独立的。可以认为空间变异程度较高,在人工采样时候应考虑采样间隔对试验模型造成的影响。

同时发现,20 m 是自相关系数的变化周期,这表明 20 m 是产量数据相关性阶梯变化的一个步长。通过田间调查,初步推断这种周期性变化的原因是由于试验麦田的区域性灌溉造成的。收获区域的小麦田被分割成了面积近似相等的矩形区域,方便进行农田节水灌溉,由于每个矩形区域的灌溉程度不同,造成了小麦的生长状况的分布变化,进而影响到了产量的分布。这一结论为改进田间管理模式,降低田间作物生长的空间变异提供了基础数据。

### 2.3 半方差分析

#### 2.3.1 半方差函数

半方差函数是地统计学中研究土壤变异性的关键函数,它通过测定区域化变量分隔等距离样点间的差异来研究变量的空间相关性。半方差分析是基

于以下两个基本假设<sup>[13]</sup>:① 均值稳定,土壤特性参数的数学期望值存在且为常数,与空间点的位置无关,而与测点间距大小有关。② 当测点间距确定后,要素的方差存在且为有限值,其值仅与测点间距有关。

对于观测的数据系列  $Z(x_i)$  (其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ), 样本半方差函数值为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (2)$$

式中  $N(h)$ ——被距离  $h$  分隔的试验数据对  $(x_i, x_i + h)$  的个数

$Z(x_i)$ ——在点  $x_i$  处样本的测量值

$Z(x_i + h)$ ——在点  $(x_i + h)$  处样本的测量值

$h$ ——采样点间距

对于不同类型的半方差点图,有多种经验函数式进行拟合。常用的半方差函数理论模型有线性模型、指数模型、球状模型、高斯模型和双曲线模型。

### 2.3.2 半方差分析

半方差函数图由半方差函数值  $\gamma(h)$  对距离  $h$  的曲线表示。由于产量数据采样点没有距离信息,只包含经纬度信息,首先将经纬度坐标变换至北京54坐标系下的  $XY$  直角坐标。

设定 6.67 m 作为样点间距  $h$  取值的单位长度,共包含 15 个半方差数据点。图 4 为各向同性半方差函数图,拟合模型为指数模型。

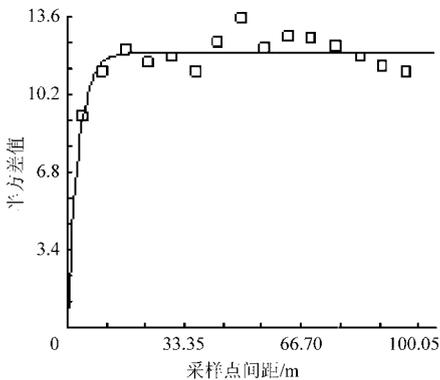


图 4 各向同性产量数据半方差图

Fig. 4 Semi-variance of yield data on isotropic variogram

其中  $C_0$  为  $h$  等于零时的半方差值,称为块金方差。从图中可以看出存在这样的一个距离临界点  $a$ , 当  $\gamma(h)$  在间距  $h$  小于某一个值  $a$  时,随着间距  $h$  的增加而迅速上升,当间距大于  $a$  时,  $\gamma(h)$  值上升至某个常数  $C_1$  并在  $C_1$  上下波动,这里的  $a$  称为变程,  $C_1$  称为基台。

图中  $C_0 = 0.64$ ,  $C_1 = 12.06$ ,  $a = 9.3$  m, 半方差样点和函数曲线的拟合度  $R^2 = 0.572$ 。同时变程  $a$  表示产量数据点存在相关性的距离上限,当  $h < a$  时,任意两点间的观测值存在相关性,且随着  $h$  的增

加而减小;当  $h > a$  时,观测点间不具有相关性。

变程  $a$  为 9.3 m, 大于收获机的割幅 2.36 m, 可推知相邻两列有较高的相关性,通过计算某相邻两列上的 15 个采样点产量数据的相关系数达到了 0.62。当两列的距离大于 10 m 时,相关系数则非常小,接近于零。由此可以认为测产区域的产量分布空间变异明显。各向同性半方差函数拟合模型为指数型,一般情况下可以认为产量分布模型为聚集分布。图 5 为各向异性产量数据的半方差函数图,拟合模型为高斯模型。

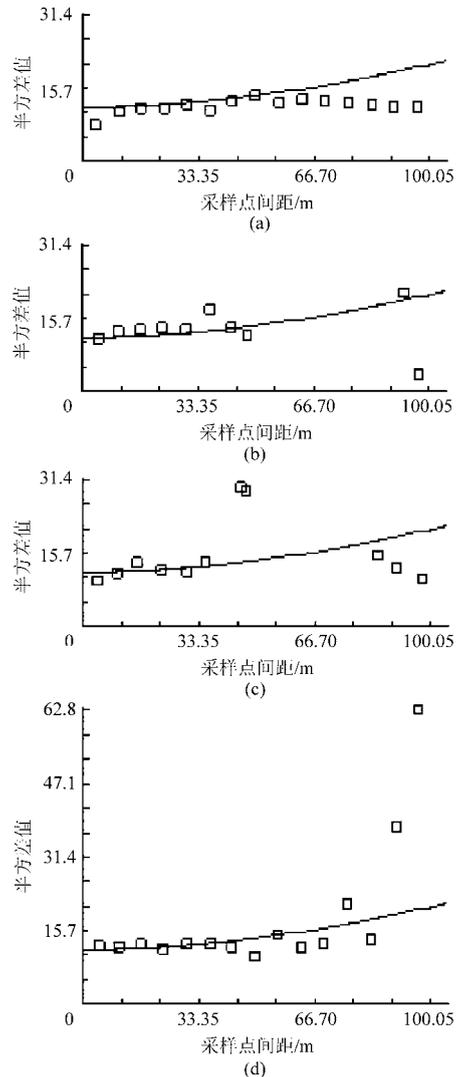


图 5 各向异性产量数据半方差图

Fig. 5 Semi-variance of yield data on anisotropic variogram  
(a) 0°方向 (b) 45°方向 (c) 90°方向 (d) 135°方向

半方差函数相应的参数值为:  $C_0 = 11.48$ ,  $C_1 = 74.25$ ,  $R^2 = 0.178$ 。通过观察半方差样点图, 容易发现变异规律近似成一水平线, 且基台值明显大于零, 表明在各个方向上的分布无明显相关性, 近似为随机分布。

通过上述分析, 在空间变异规律方面, 各向同性的半方差变异函数更有研究价值, 且变异函数表征

的产量分布规律近似为小范围聚集分布模型。

## 2.4 产量分布图

对试验得到的产量数据点进行统计,得到产量统计分布直方图(图6)。

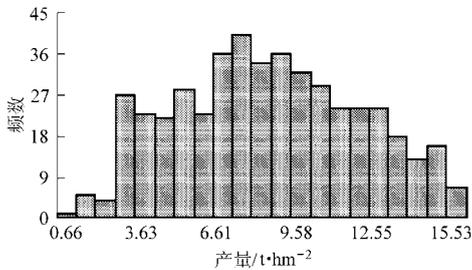


图6 产量分布直方图

Fig.6 Distribution histogram of yield data

经过计算,产量数据点的均值和方差分别为8.15和12.93。根据统计直方图的分布情况和统计结果,可以近似认为产量数据点服从对数正态分布。

但试验得到的采样点的产量数据并不能直观地反映出产量的空间变异规律,需要采样点对空白点区域进行插值,生成产量的二维分布图,才能直观地反映出产量的空间分布规律。

常用的插值方法有克里格插值法、反距离加权插值法和邻点插值法等,本研究选取克里格插值方法进行数据填充,生成的产量分布图如图7所示。

通过该图,可以很清楚地看出沿某一方向上的变异规律不明显,而是呈现出了区域分布的明显趋势。分布图右下方产量明显偏高,经过田间调查,造成这种结果的原因可能是由于人工施肥区域面积上的不均匀和农田土地的平整度不均匀。同时我国农

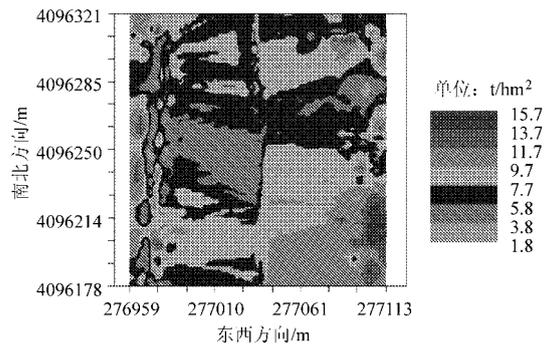


图7 克里格插值后产量分布图

Fig.7 Distribution map of yield data based on Kriging interpolation

业在农田灌溉上普遍采用的是区域性浇灌,这也是造成产量分布差异较大的一个原因。因此,以产量分布图作为精细农业实施的理论依据,开展精准变量施肥、精细灌溉和精准平地有着重要的现实意义。

## 3 结论

(1) 通过测产系统的性能试验分析,认为该系统的工作性能比较稳定,操作简单,测量精度较高,在国内有较高的推广实用价值。同时由于国产机型小型化和多样化,测产系统的优化和配套传感器的研发也有着重要的意义。

(2) 通过对产量数据的半方差分析发现,产量数据的半方差最优拟合模型为指数型,表明产量分布在空间上呈现的是聚集分布,空间变异明显,在单一方向上分布倾向于高斯分布。

(3) 通过对产量分布图的研究发现,产量数据呈现了较大程度的块状集群分布。这和人工作业的粗放式操作和管理有很大的关系。

## 参 考 文 献

- 1 陈树人,胡鹏,胡均万,等. 谷物产量分布图生成系统的开发研究[J]. 农业工程学报,2008,24(8):182~184.  
Chen Shuren, Hu Peng, Hu Junwan, et al. Research and development of one grain yield map generating system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(8): 182~184. (in Chinese)
- 2 张漫,邝继双. 谷物联合收获机测产数据中的误差分析与处理[J]. 农业工程学报,2003,19(3):144~148.  
Zhang Man, Kuang Jishuang. Error analysis and process of yield data collected by yield monitoring system of corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2003,19(3):144~148. (in Chinese)
- 3 陈树人,张漫,李民赞. 基于SMS的冬小麦产量分布图生成技术[J]. 农业机械学报,2005,36(6):68~70.  
Chen Shuren, Zhang Man, Li Minzan. Winter wheat yield mapping technology research based on SMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(6):68~70. (in Chinese)
- 4 Dayton Lambert, Terry Griffin. Lessons learned from the top farmer 2004 yield monitor data analysis sessions[C]. West Lafayette: Purdue University, 2004.
- 5 张漫. 农田谷物产量空间分布信息采集、处理与系统集成技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
- 6 赵武云,杨术明,杨青. 精细农业技术的发展与思考[J]. 农机化研究,2007(4):167~170.  
Zhao Wuyun, Yang Shuming, Yang Qing. The development and thinking of the precision agriculture technology [J]. Journal of Agriculture Mechanization Research,2007(4):167~170. (in Chinese)

米秸秆在各个方向所受到的接触力与倾角为 $40^\circ$ 相比时较小,玉米秸秆在各个方向上的位移也比倾角为 $40^\circ$ 时变化波动小。所以本文所述的小型玉米收获机摘穗辊轴线与地面夹角为 $30^\circ$ 时对玉米植株的收获性能更好。

线和摘穗辊运动学仿真曲线,得出玉米收获机分禾器在设计上存在的问题并进行了改进设计,摘穗辊的最佳工作参数:转速 $n$ 为 $800 \sim 1\,000$  r/min、倾角为 $30^\circ$ 。仿真分析结果为小型玉米收获机的改进设计提供了理论依据,同时为玉米收获机提供了一种低能高效的试验方法。

#### 4 结束语

通过分析分禾器与玉米秸秆相互作用的仿真曲

#### 参 考 文 献

- 1 杨维宇.我国玉米收获机发展现状及建议[J].农业科技与装备,2011(2):132~134.  
Yang Weiyu. Present development in China's maize harvesters and proposals[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(2):132~134. (in Chinese)
- 2 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M].北京:国防工业出版社,2008.
- 3 陈军. MSC. ADAMS 技术与工程分析实例[M].北京:中国水利水电出版社,2008:157~205.
- 4 蒲明辉,吴江.基于 ADAMS 的甘蔗柔性体模型建模研究[J].系统仿真学报,2009,21(7):1 930~1 932.  
Pu Minghui, Wu Jiang. Study on flexible sugarcane modeling based on ADAMS software [J]. Journal of System Simulation, 2009,21(7):1 930~1 932. (in Chinese)
- 5 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):114~118.  
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):114~118. (in Chinese)
- 6 张彦河.玉米秸秆破碎力学特性的研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2003,15(4):43~45.  
Zhang Yanhe. A study of mechanics characteristics on breaking up corn straw[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2003,15(4):43~45. (in Chinese)
- 7 张道林,刁培松,张士新,等.基于 ADAMS 玉米收获机关键机构的三维动态仿真[J].农业装备与车辆工程,2007(10):35~37.  
Zhang Daolin, Diao Peisong, Zhang Shixin, et al. 3D solid animated simulation of main movement organ of corn harvest machine cutter based on ADAMS[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2007(10):35~37. (in Chinese)

(上接第 99 页)

- 7 王琦.谷物联合收获机测产系统智能监视器研究[D].北京:中国农业大学,2005.  
Wang Qi. Research on an intelligent monitor for yield mapping system of grain combine harvester [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 8 高华江.基于 CAN 总线的产量监控系统研究开发[D].北京:中国农业大学,2006.  
Gao Huajiang. Development of yield monitor system with CAN-bus [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 9 Wu Guan, An Xiaofei, Li Minzan, et al. Development of an impact-based yield monitor with CAN-bus[J]. Sensor Letters, 2011, 9(3):974~980.
- 10 李民赞,张文革,李相平,等.谷物实时测产技术研究[C]//中国数字农业与农村信息化学术研究研讨会论文集,北京,2005.
- 11 周俊,刘成良.平行梁冲量式谷物质量流量传感器弹性元件设计[J].农业工程学报,2007,23(4):110~114.  
Zhou Jun, Liu Chengliang. Load cell design for parallel beam impact-based grain mass sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(4):110~114. (in Chinese)
- 12 王薄,李民赞,张成龙,等.冲击式谷物流量传感器设计与性能试验[J].农业机械学报,2009,40(增刊):52~56.  
Wang Bo, Li Minzan, Zhang Chenglong, et al. Development of grain flow sensor for yield monitor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):52~56. (in Chinese)
- 13 薛正平,杨星卫,段项锁,等.土壤养分空间变异及合理取样数研究[J].农业工程学报,2002,18(4):6~9.  
Xue Zhengping, Yang Xingwei, Duan Xiangsuo, et al. Spatial variability of soil nutrient and reasonable sampling number [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(4):6~9. (in Chinese)