

基于视景仿真的联合收获机虚拟试验技术*

杨方飞 阎楚良

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

【摘要】 在对轮式联合收获机作业过程中所受驱动力、行驶阻力以及作业阻力理论分析的基础上,建立轮胎模型、路面模型以及作业过程受力模型,并进行数值仿真,获得整机运动姿态曲线。基于视景仿真驱动平台,建立包括农田、道路、树木、草地等地表环境的逼真虚拟场景,并导入合理简化后的联合收获机整机视景仿真模型,利用Vega API编程接口实现整机在虚拟场景中的运动姿态交互控制,使视景仿真结果更符合实际,为研究联合收获机交互式集成虚拟试验平台打下基础。

关键词: 轮式联合收获机 数值仿真 视景仿真 虚拟试验

中图分类号: S225.31; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0079-05

Virtual Test of Combine Harvester Based on Visual Simulation

Yang Fangfei Yan Chuliang

(State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Driving force, driving resistance and operating resistance of wheeled combine harvester during operating process was analyzed, tire model, road model as well as force model was built, numerical simulation of motion for whole wheeled combine harvester was finished and attitude curve was obtained. Lifelike virtual scene including terrestrial surface environment, such as farm field, roads, trees, grassland, etc. was created. Visual model of wheeled combine harvester after reasonable simplified was imported to visual simulation driving platform, and interacting control of whole machine attitude in visual scene was put forward, which made visual simulation more realistic. This study laid the foundation of building interacting control integrated virtual testing platform for combine harvester.

Key words Wheeled combine harvester, Numerical simulation, Visual simulation, Virtual test

引言

农业装备研发伴随着大量繁杂的试验,以应对产品在复杂使用工况下性能、可靠性等方面的要求。为此,需要建立必要的试验场地,使用大量的试验仪器设备,投入大量的试验费用和人力。随着试验理论和现代试验手段的快速发展,虚拟试验技术为现代农业装备的设计和开发提供了新思路和新平台^[1]。

农业装备关键部件及整机虚拟试验技术,通常采取不同的实现途径:对于关键部件的虚拟试验研究,采用数值仿真途径,对其性能进行虚拟试验;对于整机的虚拟试验研究,结合数值仿真和视景仿真技术,研究交互式集成仿真平台的建立。数值仿真属于传统的系统仿真,其主要目的是借助计算机对实际或设想的系统进行优化设计,其中涉及大量动力学方程的建立和求解,因此,数值计算与分析是系统仿真的核心问题;而视景仿真则以虚拟现实为基

收稿日期: 2010-10-25 修回日期: 2010-11-29

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A17)

作者简介: 杨方飞,研究员,主要从事数字化设计与仿真研究,E-mail: kingyff@163.com

通讯作者: 阎楚良,研究员,博士生导师,主要从事结构可靠性与数字化设计研究,E-mail: yancel@sina.com

础,主要研究的是可视化问题,因此,三维模型的表示和驱动是视景仿真研究的主要问题^[2]。本文在对轮式联合收获机整机数值仿真的基础上,结合视景仿真进行虚拟试验技术研究。

1 轮式联合收获机受力理论分析

1.1 驱动力

轮式联合收获机作业过程受力分析如图 1 所示。通常轮式联合收获机为前轮驱动,后轮为从动轮,对整机而言,驱动转矩 M_k 是内力矩,在驱动转矩作用下,驱动轮与土壤接触处有向后滑动的趋势,在接触面的各个微小部分产生了土壤反作用力,这些反作用力的水平合力即驱动力

$$P_k = \frac{M_k}{r_d} = \eta_\Sigma \frac{M_e i_\Sigma}{r_d} \quad (1)$$

式中 η_Σ ——传动系统效率
 M_e ——发动机转矩
 i_Σ ——传动系统总传动比
 r_d ——驱动轮的动力半径

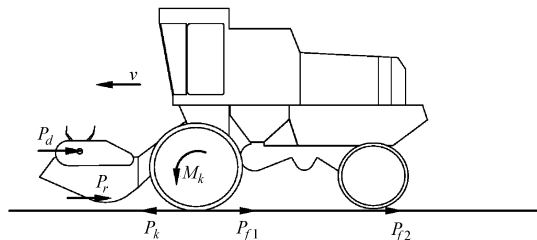


图 1 轮式联合收获机作业过程受力分析

Fig. 1 Scheme of forces during working process of wheeled combine harvester

1.2 行驶阻力

轮式联合收获机在田间作业行走时,行驶阻力包括滚动阻力、空气阻力和加速阻力。土壤的塑性变形、轮胎内部的迟滞损失、轮轴处的滚动摩擦损失等构成了联合收获机作业过程中的滚动阻力。影响滚动阻力的因素很多,主要是土壤的物理机械性质和载荷,通常采用简化的经验公式

$$P_f = P_{f1} + P_{f2} = fG \quad (2)$$

式中 P_f ——联合收获机作业过程中的滚动阻力
 P_{f1} 、 P_{f2} ——前后轮所受滚动阻力
 G ——联合收获机的使用重力
 f ——滚动阻力系数,不同土壤条件下 f 可由试验测得^[3]

由于联合收获机作业时行驶速度较低,空气阻力值较小,通常忽略不计。假定联合收获机田间作业时为匀速行驶,加速阻力为零。

1.3 作业阻力

对联合收获机整机而言,作业阻力主要包括拨

禾轮作业阻力和割刀切割阻力。

1.3.1 割台拨禾轮所受阻力

联合收获机作业时,拨禾轮在扶禾过程中受到作物茎秆因变形而产生的阻力,可以将作物变形等效为根部固定的悬臂梁,则拨禾轮所受的阻力为

$$F_r = \frac{3nEI\delta}{h^3} \quad (3)$$

式中 n ——一根拨禾板所带动的作物茎秆数

E ——作物茎秆的弹性模量

I ——作物茎秆的惯性矩

δ ——茎秆头部变形量

h ——茎秆高度

根据拨禾轮几何尺寸,可得^[4]

$$n = \frac{5\pi C_d w v_f}{9\omega_r Z} \quad (4)$$

式中 C_d ——每平方米内的平均植株数

w ——联合收获机割幅

v_f ——联合收获机前进速度

ω_r ——拨禾轮转速

Z ——拨禾轮上的拨禾板数

茎秆头部变形量 δ 为

$$\delta = \frac{5\pi v_f}{18\omega_r Z} \quad (5)$$

通过多点弯曲试验方法,可以获得作物茎秆的弹性模量 E 及惯性矩 I 。从实测数据可知^[5],在乳熟和腊熟期,某品种小麦茎秆抗弯刚度(EI)分别为 $0.008 \sim 0.011 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ 和 $0.007 \sim 0.010 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ 。

1.3.2 割刀切割过程所受阻力

一般而言,随着切割速度的增加,切割阻力有所降低,根据试验结果可知^[6],当切割速度为 0.5 m/s 时,单位断面积切割阻力约为 $5.98 \sim 6.66 \text{ N/mm}^2$,而当切割速度达到 2 m/s 时,单位断面积的切割阻力只有 $3.72 \sim 4.12 \text{ N/mm}^2$ 。

2 基于 ADAMS 的联合收获机整机数值仿真

2.1 整机模型

联合收获机是一个复杂的机械系统,包括割台、过桥、脱粒、分离、清选、升运、机架等部件,如果按照真实构造进行建模,工作量非常大。因此根据研究目的,在建模时对联合收获机的机构进行适当的抽象、简化,需要注意的是,为保证仿真结果与实际接近,应保证各部件总质量应与联合收获机实际质量接近。在三维建模平台 Pro/Engineer 中建立各零件的实体模型,装配成各部件后,通过共享接口文件的形式导入 ADAMS 中。经过实际操作对比,选择 Parasolid(.x_t) 接口形式作为 ADAMS 与参数化实

体模型之间的数据传递。

2.2 动力学模型

2.2.1 轮胎模型

建立准确的轮胎数字化模型,是进行整车动力学仿真的关键环节。常用的轮胎模型包括 Delft 轮胎模型、Fiala 轮胎模型、Smithers 轮胎模型、UA 轮胎

模型,其中前 3 种为解析模型,后 1 种为试验模型^[7]。考虑到 UA 模型给定参数较少且参数较容易获得,本文采用 UA 轮胎模型。本文研究对象 4LZ-3 型联合收获机选用的轮胎主要规格尺寸参数及主要特性参数如表 1 所示。根据轮胎的特性参数,可编制 ADAMS/View 中的轮胎特性文件(*.tire)。

表 1 前后轮胎主要规格尺寸及特性参数
Tab.1 Main size and property parameters of front/back tire

	气压 /MPa	断面宽 /mm	外直径 /mm	负载 /kg	垂向刚度 /N·mm	垂向阻尼 /N·s·mm ⁻¹	滚动阻尼 /N·s·mm ⁻¹	纵向滑移刚 度/N·mm	侧偏刚度 /N·mm	外倾刚度 /N·mm
前轮	0.28	410	1 330	2 350	368 000	1 000	0.003	80 000	60 000	30 000
后轮	0.35	285	950	1 450	413 000	1 000	0.003	80 000	60 000	30 000

2.2.2 路面模型

考虑到描述轮式联合收获机实际田间作业工况,采用 3D 路面模型。3D 路面模型有 3D 等效容积(3D equivalent-volume)路面和 3D 样条(3D spline)道路两种。3D 样条路面更适合建立标准路面,如赛道、高速公路等,对于本研究而言,建立模拟符合实际的联合收获机田间作业环境的路面,选择 3D 等效容积路面更加合适。3D 等效容积路面模型通过指定在路面参考坐标系下每个点的坐标位置,然后再由每三个点按顺序来构成一个个连续的三角形单元,三角形单元的法向必须要保持一致,在路面元素单元中,可以指定路面的摩擦因数。

根据田间路面形状,由三点构成法编写相关路面文档,最终在 ADAMS 中建立的添加轮胎及路面的轮式联合收获机整机系统仿真模型如图 2 所示。

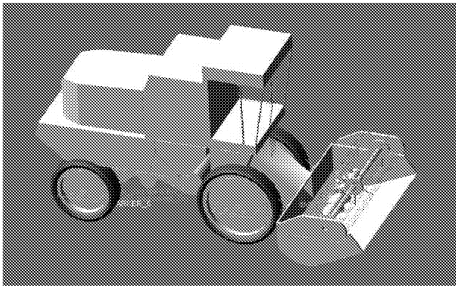


图 2 轮式联合收获机整机系统仿真模型
Fig.2 Numerical simulation model of whole wheeled combine harvester

2.3 仿真结果的接口设计

根据轮式联合收获机作业过程中各部件的相对运动关系,在 ADAMS 中添加必要的约束副,如图 3 所示。

根据轮式联合收获机作业过程中所受的驱动力 P_k 及工作阻力 P_f 、 F_r 、 F_d ,对整机施加相应的载荷,其中,驱动力 P_k 随时间变化,采用 STEP 函数表示,定义一测量值 v_f ,用于测得车辆瞬时前进速度,则拨

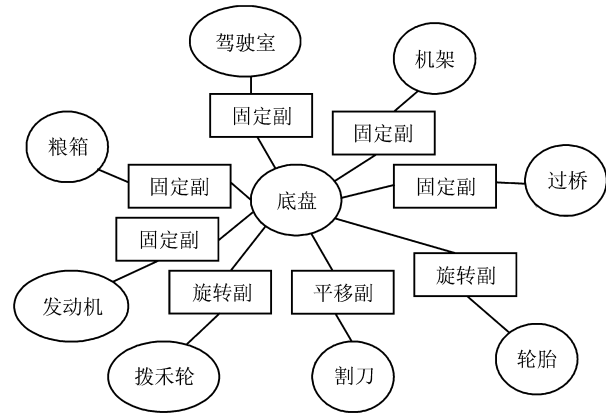


图 3 虚拟样机模型各部件运动关系副示意图
Fig.3 Scheme of movement relationship between components of virtual prototype

禾轮所受阻力 F_r 可由该测量值表示。对整机进行动力学仿真,获得整机位移及运动姿态结果,利用 ADAMS/PostProcessor 后处理模块的功能,将仿真结果曲线导出为文本格式的数据表文件,用于在视景仿真平台 Vega 上对虚拟场景中的模型进行驱动。

3 基于 Vega 的联合收获机虚拟试验系统

3.1 典型作业虚拟场景的设计及建模

联合收获机作业虚拟场景模型是由地形模型、道路模型以及其他地理模型通过合理组织而形成,场景模型中地形建模和模型简化是构建场景的关键^[8]。本文采用仿真建模软件 Creator 分别建立并组织管理场景模型。

3.1.1 地形

首先获取试验地块的地形高程数据,可以是 USGS 的 DEM 数据,也可以是 NIMA 的 DTED 格式或者第三方资源,然后对高程数据进行预处理,转换成 Creator 支持的 DED 格式。Creator 采用标杆来重新构建地形,通常标杆间隔是原始数据格网的间隔,地表是由具有高度值的标杆表示,如图 4 所示。

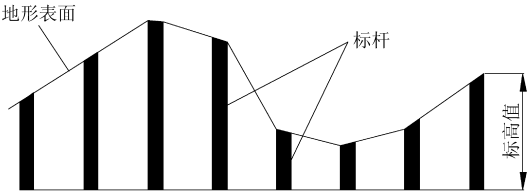


图 4 Creator 地形构建图

Fig. 4 Construction of terrain in Creator

在构建地形时需要根据处理速度、支持的边界匹配类型、三角形带化能力、多边形数量限制等要素选择地形转换算法。Creator 提供 Polymesh、Delaunay、TCT 和 CAT 4 种换算算法,本文采用的 Delaunay 算法能够较好地控制地形生成过程中的多边形的数量。Delaunay 算法采用网格节点的二维阵列表示,认为网格单元的数值是网格中心点的高程或网格单元的平均高程值,当计算点不是网格中心时,使用周围 4 个中心点的高程值,采用距离加权平均法进行计算,计算公式为

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(A - \frac{a_i}{e_i} \right) \left(\frac{b_i}{e_i} - B \right) + \left(C - \frac{c_i}{e_i} \right) \left(\frac{d_i}{e_i} - D \right) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{b_i}{e_i} - B \right)^2 + \left(\frac{d_i}{e_i} - D \right)^2 \right]} \quad (6)$$

3.1.2 地表特征

广义上来讲,地形模型数据库中除地形多边形以外的所有多边形都属于地形特征,包括道路桥梁、地表建筑、自然景观、河流湖泊等,添加这些地形特征可以大大提高地形模型的真实性和完整性。具体方法是将 DFAD、DLG 或其他矢量格式的原始地形特征数据转化为 Creator 专用的 DFD 格式,利用该格式可以迅速的将二维平面矢量数据转换成三维立体模型。

3.1.3 纹理

将包含真实表面细节的纹理应用到生成的场景模型多边形上,可以使场景模型数据库在实时系统中呈现更逼真的视觉效果,同时大大提高系统实时运行速度。纹理可通过处理照片图像生成,对于地形纹理,则需要经过将地形特征坐标对应、几何修整及色彩校正后形成精确的数字栅格地形纹理才能应用。

经过试验地块的三维地形模型建立,地表特征的建立以及加载纹理数据后,得到包含农田、道路、树木、草地等地表环境的逼真虚拟场景,如图 5 所示。

3.2 参数化模型的接口设计

对于在系统仿真阶段建立的轮式联合收获机三维实体模型还不能直接为 Creator 所用,因此需要考虑联合收获机参数化模型的接口。本文以 STL 格



图 5 虚拟田间试验场景

Fig. 5 Virtual scene of field testing

式文件为桥梁,将 Pro/Engineer 中的联合收获机模型导入 Creator,生成在虚拟场景中的视景模型。

Creator 的数据库文件使用 OpenFlight 场景描述格式,该格式是一种树状层次的数据结构,在用 Pro/Engineer 导出 STL 文件时,如果将装配好的组件整体导出,则由 Creator 导入后,在数据库中只生成单一对象节点,使得联合收获机的视景模型只能作为一个整体运动,实时仿真过程中不能控制模型的部分机构运动。然而联合收获机有割台、过桥、车轮等工作部件,实时仿真中必须能够控制工作部件的运动,在模型的数据库文件中应使其和主机体分属不同的节点,因此,导出 STL 文件时不是将组件整体导出,而是分别导出机体(包含驾驶室)、割台、过桥和车轮等。另外,用 Pro/Engineer 建立的联合收获机模型内部结构复杂,如果不经简化直接导入到 Creator 中,生成的视景模型渲染所需时间过长,实时性较差,采用去除隐藏元件、合并三角形 2 种方式简化仿真模型。在 Creator 中导入的联合收获机模型如图 6 所示。

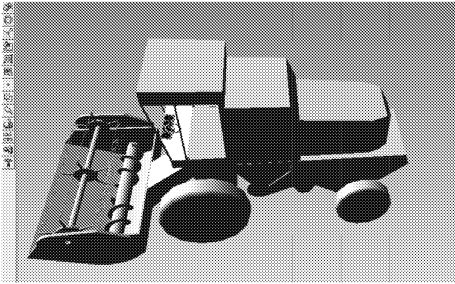


图 6 联合收获机整机视景仿真模型

Fig. 6 Visual simulation model of whole machine

3.3 利用 Vega API 函数定义和设置运动路径

将前面生成的虚拟田间试验场景及整机视景仿真模型汇入仿真驱动平台 Vega 进行田间虚拟试验。为了真实反映轮式联合收获机田间作业过程,虚拟田间试验中,联合收获机的运动姿态按作业过程受力状态在 ADAMS 仿真计算结果中给定。前文提到,联合收获机运动姿态仿真计算结果曲线以文本的形式保存,包括 x 、 y 、 z 、 h (平转角)、 p (俯仰角)、 r (侧滚角)。通过 Vega API 编程将运动姿态数值定义为路径控制点姿态参数。

4 系统实现

图 7 所示为实现的交互式漫游的 2 种不同观察方式:图 7a 整个场景不动,只是联合收获机在场景中运动,这种方式可使用户对整个试验过程有一个全面的认识。图 7b 的方式与真实情况一致,从驾驶员的角度观察周围场景的变化,体验联合收获机在田间道路行走及作业过程中机器的变化,获得主观感受,在系统实现的过程中,根据联合收获机的运动姿态变化(如侧倾、偏移)改变观察视点,使周围场景随之变化。

为了使观察者更深入地分析联合收获机的通过性能,还设计了交互式控制,通过手动控制,可完成试验过程的单步执行,这样就可对每个时刻的联合收获机状态进行观察,并可利用鼠标对该时刻进行缩放、旋转等变换,从各个角度进行分析。

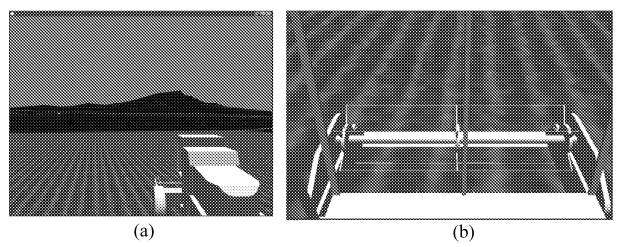


图 7 视景仿真运行截图
Fig. 7 Screenshots of visual simulation
(a) 总体观察 (b) 以驾驶员角度观察

5 结束语

通过准确建立联合收割轮胎模型、路面模型以及作业过程中的受力模型,对轮式联合收获机整机进行数值仿真,获得运动姿态曲线后,结合视景仿真平台,通过 API 编程对联合收获机运动姿态进行控制,使得视景仿真结果更符合实际,为研究联合收获机交互式集成虚拟试验平台打下基础。

参 考 文 献

- 1 阎楚良,杨方飞,张书明. 数字化设计技术及其在农业机械设计中的应用[J]. 农业机械学报,2004,35(6):211~214.
Yan Chuliang, Yang Fangfei, Zhang Shuming. Digitized design technology and its application in agricultural machinery design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(6):211~214. (in Chinese)
- 2 李佳,闫清东,王一拙. 基于 ADAMS 和 Vega 的地面机动武器仿真系统的研究[J]. 计算机仿真, 2006,23(2):236~240.
Li Jia, Yan Qingdong, Wang Yizhuo. Simulation system of ground mobile weapons based on ADAMS and Vega[J]. Computer Simulation, 2006,23(2):236~240. (in Chinese)
- 3 林慕义,张福生. 车辆底盘构造与设计[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- 4 Baruah D C, Panesar B S. Energy requirement model for a combine harvester, part I: development of component models[J]. Biosystems Engineering, 2005,90(1):9~25.
- 5 胡婷. 小麦茎秆抗倒伏的力学原理探讨[D]. 北京:中国农业大学,2007.
Hu Ting. On the mechanical principle of lodging resistance of wheat stalk[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 6 张兰星,何月娥. 谷物收获机械理论与计算[M]. 长春:吉林人民出版社,1980.
- 7 郭卫东. 虚拟样机技术与 ADAMS 应用实例教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- 8 王乘,周均清,刘利军. Creator 可视化仿真建模技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.
- 9 藏宇,朱忠祥,宋正河,等. 农业装备虚拟试验系统平台的建立[J]. 农业机械学报,2010,41(9):70~74,127.
Zang Yu, Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, et al. Establishment of virtual experiment system platform for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):70~74,127. (in Chinese)
- 10 Yan Chuliang, Li Jie, Zhang Shuming, et al. Digital design of a combine harvester using virtual prototype[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China,2007,2(2):159~163.
- 11 李杰,阎楚良,杨方飞. 基于虚拟样机技术的联合收割机切割机构的仿真[J]. 农业机械学报,2006,37(10):74~76.
Li Jie, Yan Chuliang, Yang Fangfei. Research on cutter's simulation of combine harvester based on virtual prototyping technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):74~76. (in Chinese)