

基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真*

杜岳峰¹ 朱忠祥¹ 毛恩荣¹ 宋正河¹ 高建民¹ 朱孔贵²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东常林集团, 临沂 276799)

【摘要】 对某小型玉米收获机的整车性能进行了研究。将在 Pro/E 中建立的整机三维模型导入 UG 中进行了布尔和运算,减少约束,简化模型。运用 ADAMS 建立了虚拟样机模型,通过平路上的实车试验验证了所建仿真模型满足虚拟试验要求。利用虚拟样机模型测试了整机的临界侧倾角度和最大爬坡坡度,从而避免了在危险条件下的实车试验。同时利用虚拟样机模型和车辆圆锥指数分析了机器在松软地面上的通过性能。

关键词: 小型玉米收获机 虚拟样机 性能仿真

中图分类号: S225.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)S0-0001-05

Simulation on Small-scale Corn Harvester for Hilly Area Based on ADAMS

Du Yuefeng¹ Zhu Zhongxiang¹ Mao Enrong¹ Song Zhenghe¹ Gao Jianmin¹ Zhu Konggui²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Changlin Group Co., Ltd., Linyi 276799, China)

Abstract

The performance simulation of a small-scale corn harvester for hilly area using ADAMS was presented. The 3-D parametric model of the corn harvester was established with Pro/E. Then, the model was put into UG to conduct Boolean operation to reduce the amount of constrains. Consequently, the model was simplified and workload was cut down. The preprocessed model was import to the ADAMS environment to build the virtual prototype model. A comparison between the simulation and the road test verified that the virtual prototype model met the requirements of virtual experiment. The extreme roll angle and maximum climbing slope were obtained by ADAMS simulation to avoid hazardous vehicle test on sloping area. In addition, the terrain trafficability of the corn harvester on the weak ground was analyzed with cone index.

Key words Small-scale corn harvester, Virtual prototype, Performance simulation

引言

作为玉米三大产区之一的西南丘陵山地^[1],玉米收获机械化严重滞后。目前市场上还没有成熟的适合丘陵山地的小型玉米收获机,玉米收获仍然沿用手工方式,劳动强度大,浪费了大量的人力、物力,同时也严重阻碍了玉米的种植和发展^[2]。因此,研制小型、经济、适用于丘陵山地的玉米收获机械显得尤为必要。本文利用 Pro/E 建立小型玉米收获机三

维模型,运用 ADAMS 建立虚拟样机模型,进行整机的仿真分析,为进一步设计开发适合丘陵山地的小型玉米收获机提供技术支持。

1 小型玉米收获机虚拟样机模型

1.1 建立三维模型

利用 Pro/E 建立了整机的三维模型,该机主要由摘穗机构、秸秆切割输送机构、果穗箱、秸秆收集装置、动力总成及底盘总成等组成,组装好的整机模

收稿日期: 2011-09-01 修回日期: 2011-09-20

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903050-5)

作者简介: 杜岳峰, 博士生, 主要从事车辆动力学和虚拟现实方面研究, E-mail: duyuefeng3705348@163.com

通讯作者: 朱忠祥, 副教授, 主要从事虚拟现实、车辆电子控制及智能控制方面研究, E-mail: zhuzhongxiang@cau.edu.cn

型如图1所示。整机的实测参数如表1所示。

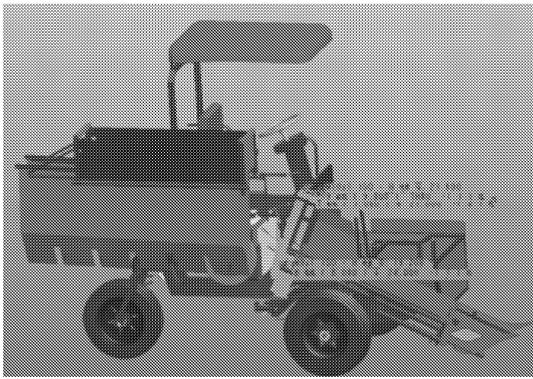


图1 小型玉米收获机三维模型

Fig.1 3-D model of small-scale corn harvester

表1 整机实测参数

Tab.1 Measured parameters of machine

参数	数值
长度/mm	4 530
宽度/mm	1 450
生产效率/hm ² ·h ⁻¹	0.07 ~ 0.2
适用行距/mm	≥350
最小离地间隙/mm	260
配套动力/kW	14.7
收获行数	1
整机质量/kg	1 180
工作速度/km·h ⁻¹	1 ~ 5

1.2 三维模型的导入

ADAMS/View 可以提供多种格式的模型数据交换接口,如 Parasolid、STEP、IGES、SAT、DXF 和 DWG 等^[3]。由于 Parasolid 格式文件导入到 ADAMS 时信息丢失较少,保真度高,因此,将 Pro/E 中建立的整机模型保存为 Parasolid 的中间格式(其扩展名为 .X_T)。由于 ADAMS 建立的虚拟样机模型一般是一种简化的模型,在保证仿真需要的部件与真实情况一致的前提下,可以把次要部件合并为一个整体,减少 ADAMS 中约束的数量,所以先将 Parasolid 格式文件导入 UG 中进行零件的布尔和运算,再导入到 ADAMS/View 中进行虚拟样机模型的建立。

1.3 部件属性设置和约束添加

导入到 ADAMS 的几何模型,为了便于约束添加,避免计算过程中出现错误信息,需对其部件的属性进行重新设置,主要包括:部件初始方位、质量信息、名称、外观等。调整好的机器在全局坐标系中的方位为:水平方向为机器的前进方向,竖直方向与重力方向相反。

1.4 轮胎和路面文件创建

轮胎和路面文件是进行收获机路面仿真的两个

重要部分,ADAMS/View 提供了 5 种轮胎模型: Magic-Formula 轮胎模型、Fiala 轮胎模型、Ftire 轮胎模型、UA 轮胎模型和 User Defined 轮胎模型^[4]。本文采用 Fiala 轮胎模型。Fiala 轮胎模型可用于 2D 或 3D 路面。输入 Fiala 轮胎模型有 2 个来源方式: 轮胎属性文件(.tir)和 ADAMS/Tire 计算的轮胎运动学状态。Fiala 轮胎属性文件最重要几个参数如轮胎的径向刚度为 310 N/mm,滚动阻力臂为 0。修改 mdi_fiala01.tir 轮胎文件参数,其中前轮参数 UNLOADED_RADIUS 为 372.5 mm, WIDTH 为 180 mm,后轮参数 UNLOADED_RADIUS 为 267.5 mm,WIDTH 为 180 mm。

在 MSC. ADAMS 中,道路时域、道路模型是通过属性文件表达的,本文在进行平整路面仿真时采用了 ADAMS 自带的 2D 路面 mdi_2d_flat.rdf,修改其长度为 1 000 m,宽度为 10 m。在进行侧倾仿真和爬坡仿真时采用了 3D_flat.rdf,修改其中的路面节点(node)参数值,使其满足仿真要求。添加完轮胎和路面的整车样机模型如图 2 所示。在 ADAMS 中测量整机的质心位置在 maeker.cm (1 202.08, 1 328.92, -108.40)。

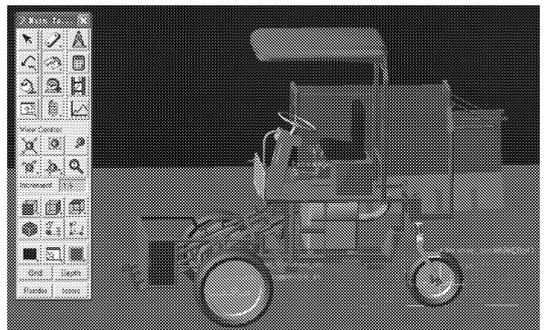


图2 玉米收获机整机样机模型

Fig.2 Virtual prototype model of corn harvester

1.5 驱动力的定义

由于轮胎和路面之间存在阻力,收获机在路面上进行仿真运动需要添加驱动力,本文计算得出整机在 I 挡时的最大驱动力,通过在质心处添加单向力(Force)来实现。驱动力的计算式为

$$F_t = \frac{9\ 550 P_e i \eta}{nr} \quad (1)$$

式中 F_t ——驱动力

P_e ——发动机功率,该机最大功率为 14.7 kW

i ——传动比, I 挡的传动比为 90

η ——传动效率,取为 0.7

n ——发动机转速,本机额定转速 2 200 r/min

r ——驱动轮的半径,本机为 372.5 mm

由以上数据计算可得,整机在 I 挡时的最大驱动力为 9 800 N。

在行驶过程中车辆会受到滚动阻力 F_f 、空气阻力、坡度阻力 F_i 和加速阻力等 4 种阻力的作用。由于农业机械速度较低, 空气阻力和加速阻力可以忽略。

滚动阻力是由车轮和土壤两者变形引起的, 其大小为: $F_f = Gf$, f 为土壤的滚动阻力系数。不同土壤的滚动阻力系数不同, 干燥地面为 0.025 ~ 0.035, 泥泞地面为 0.1 ~ 0.25。

驱动力可由发动机的功率计算得到, 但必须以轮胎与地面间不发生滑转为条件, 这表明行驶的驱动力还受到轮胎与地面的附着条件的限制。附着力的

$$F_\varphi = F_z \varphi$$

式中 φ ——附着系数

综上, 驱动力大小的取值范围为

$$F_f + F_i < F_z \leq F_z \varphi$$

在松软的地面上 φ 的取值为 0.3 ~ 0.4, 在干燥的硬质路面上 φ 的取值为 0.8 ~ 0.9, 所以 F_i 的最大值范围在 3 600 ~ 10 620 N。

2 平整路面上的实车试验与仿真试验

2.1 平整路面的实车试验

实车试验主要测量 I 挡时机器在平整路面的速度。设置测试区长度为 20 m 的平路路面, 每 5 m 作为一个标记点, 测试通过 4 个标记点的时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 , 测试区前方 10 m 为试验准备区。试验时, 设置机器的前进挡位为 I 挡, 松开离合踏板和油门踏板, 使机器保持匀速通过测试区。测得数据如表 2 所示。

表 2 实车试验数据

Tab.2 Road test data

组号	t_1	t_2	t_3	t_4
第 1 组	7.94	15.7	23.75	31.6
第 2 组	7.9	15.85	23.87	31.71
第 3 组	7.94	15.91	23.96	31.97
平均值	7.92	15.82	23.86	31.76

计算 I 挡时速度, 得速度变化曲线如图 3 所示。

2.2 整机在平整路面的仿真试验

在 ADAMS 中进行仿真试验时, 首先计算驱动力, 由于机器匀速前进, $F_f = Gf = 1\ 180 \times 9.8 \times 0.03 = 347$ N, 设置驱动力大小为 347 N, 设置测试时间为 30 s, 步数为 50, 测得整机在水平方向的速度及加速度曲线如图 4 所示。

比较图 3 和图 4, 仿真时速度从零逐渐增大, 直到加速度逐渐为零, 速度趋于稳定在 628 mm/s; 实

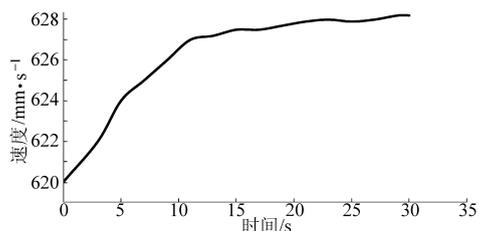


图 3 水平方向的速度变化试验曲线

Fig.3 Velocity in horizontal direction

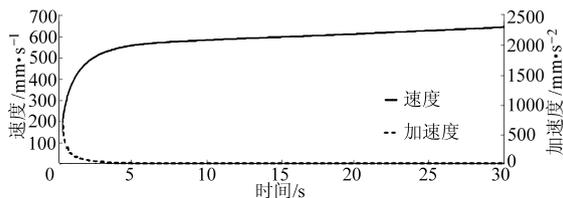


图 4 水平方向的速度和加速度变化仿真曲线

Fig.4 Velocity and acceleration in horizontal direction

车试验时, 在准备区机器速度已经趋于稳定, 机器前进到 20 s 左右时速度基本稳定, 保持在 627 mm/s 左右, 由此可见仿真的速度结果和实车试验结果吻合较好。所建模型满足仿真试验的需要。

3 整机在不同坡度上的侧倾和爬坡仿真试验

3.1 整机在不同坡度上的侧倾试验

机器在 I 挡时最大驱动力 $F_i < 9\ 800$ N, 当施加的单向力小于等于 9 800 N 时, 整机分别在坡度为 5°、15°、17°和 18°的路面上进行侧倾仿真, 设置测试时间为 5 s, 步数为 50, 观察质心位置在垂直方向的变化, 曲线如图 5 和图 6 所示。

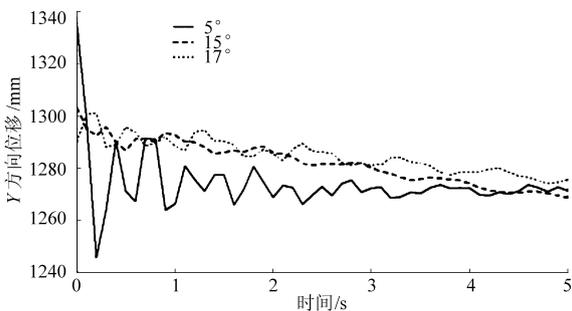


图 5 5°、15°和 17°时整机重心位置在 Y 轴上
随时间的变化曲线

Fig.5 Displacement in Y-direction under 5°, 15° and 17°

比较以上曲线可以看出, 整机在 5°、10°和 17°的路面上进行侧倾作业时, 质心在垂直方向的变化平稳, 说明机器能够正常工作, 当坡度变为 18°时, 在仿真进行到 2.5 s 时质心急速下降, 说明机器发生了侧翻, 已经不能工作。

3.2 整机在不同坡度上的爬坡仿真试验

整机分别在坡度为 5°、15°、20°和 25°的路面上进行爬坡仿真, 设置测试时间为 5 s, 步数为 50, 观察质心位置在垂直方向的变化, 曲线如图 7 所示。

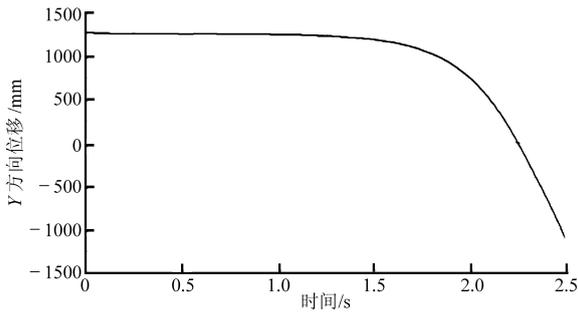


图6 18°时整机重心位置在Y轴上随时间的变化曲线

Fig. 6 Displacement in Y-direction under 18°

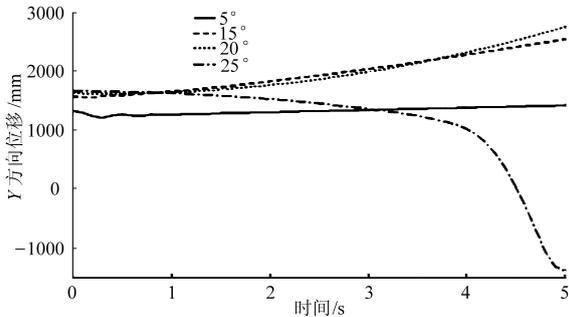


图7 5°、10°、20°和25°时整机重心位置在Y轴上随时间的变化曲线

Fig. 7 Displacement in Y-direction under 5°, 10°, 20° and 25°

比较以上曲线可知,机器在I挡工作,当坡度小于25°时,能够顺利完成爬坡,当大于或等于25°时,质心在竖直方向急剧下降,机器不能正常工作。所以机器的最大爬坡角度小于25°。

4 整机通过性能分析

判定车辆在特定土壤中的通过性所采用的经验方法是美国陆军水道实验站于1945年开始研究建立的圆锥贯入法。通过性的评价原则是根据土壤的圆锥指数与车辆最小额定圆锥指数和仿真后所计算的车辆圆锥指数相比较进行判定^[5]。

4.1 土壤的圆锥指数

由于条件的限制,实际土壤的圆锥指数采用文献[6]中的土壤数据,通过测量仪测量土壤数据18次试验得到

$$C_i = \frac{F_{av}}{S} = \frac{20.5}{4.44822} \times 9.8 = 99.87 \quad (2)$$

式中 C_i ——现场测量的土壤圆锥指数

F_{av} ——平均断面的压力

S ——圆锥底面积

土壤圆锥指数等于现场测量的圆锥指数与重塑系数的乘积,重塑系数一般取值在0.6~0.8,所以土壤圆锥指数为59.9。

4.2 车辆额定圆锥指数和仿真计算的车辆圆锥指数

车辆的圆锥指数是同一车辙内通过50次后陷车所得的最小额定圆锥指数,它与车辆本身的条件无关,它受车辆重力和行走装置等结构参数的影响^[7]。车辆的机动指数

$$M = 0.6 \left(\frac{f_p c_w}{f_n f_g} + f_w - f_h \right) f_e f_i + 20 \quad (3)$$

其中

$$f_p = w / (bdm)$$

式中 f_p ——接地压力系数

w ——车辆所受的重力

b ——轮胎的宽度

d ——轮毂的直径 m ——轮胎数

c_w ——重力系数,查表^[8]得 $c_w = 0.5$

f_n ——轮胎系数,对于单列轮胎,查表得 $f_n = 1.25b/100 = 0.089$

f_g ——花纹系数,查表^[8]得 $f_g = 1.1$

f_w ——轮胎负荷系数,查表^[8]得 $f_w = w / (1000m) = 0.899$

f_h ——地隙系数,查表^[8]得,发动机功率小于45 kW时, h 取200~300 mm,计算得 $f_h = 1.18$

f_e ——发动机系数,查表^[8]得 $f_e = 1.05$

f_i ——传动系数,查表^[8]得 $f_i = 1.05$

轮式车辆的接地压力系数只能按轮胎充气压力的50%算,计算得 $f_p = 2.163$ 。

代入以上数据计算得 $M = 31.734$ 。

当 $M > 20$ 时,车辆的圆锥指数计算式为

$$C_v = 2.5 + 0.456M = 16.97$$

由于行走性能是驱动轮与地面之间的相互作用而表现出来的,因此在仿真过程中需分两种情况进行,一种是较硬的地面,一种是松软的地面。为了便于研究,做如下假设:

(1) 假定轮胎与路面为弹性体(实际并非弹性体,土壤在受压后还会有塑性变形)。

(2) 假定在松软的地面上,主要以土壤的变形为主,在硬质路面上则以轮胎的变形为主。

根据以上假设,松软的地面上主要是土壤的变形,轮胎的刚度较大,而在硬质路面上,主要是轮胎的变形,假定为轮胎的刚度较小,这样就可以通过改变轮胎的刚度来实现不同路面的仿真。修改轮胎属性文件的径向刚度,默认值为310 N/mm,作为在松软地面仿真的轮胎刚度;当轮胎刚度为100 N/mm时,作为在硬质路面仿真的轮胎刚度。不同轮胎刚度时车辆质心位移变化曲线如图8所示。

从图中可以看出,当轮胎刚度为310 N/mm时,质心的Y坐标稳定在1323 mm,当轮胎刚度为

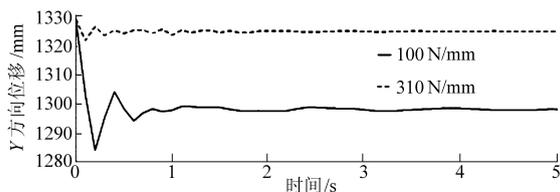


图8 不同轮胎刚度时Y方向的位移曲线

Fig.8 Displacement in Y-direction with different tire stiffness

100 N/mm时,质心坐标稳定在1 298 mm,所以下陷量 $h = 25$ mm。

仿真计算所得车辆圆锥指数取在软土情况下的仿真数据。在理想情况下,可由车轮的接地压力表示仿真后的圆锥系数 V_{ci} ,其计算过程为

$$V_{ci} = G / (3S_1) \quad (4)$$

其中

$$S_1 = ab$$

$$a = [r^2 + (r - h)^2]^{1/2}$$

式中 G ——整机重量 S_1 ——接触面积

a ——矩形长度 r ——驱动轮半径

h ——下陷量,从仿真图中可以看出,位移量波动不大,取平均值为25 mm

根据公式计算得: $a = 240$ mm, $S_1 = 43\ 200$ mm²,考虑到轮胎质量20 kg,则 $V_{ci} = 13.6$ 。

由以上计算可知,根据仿真数据计算 $V_{ci} = 13.6$ 与车辆的额定圆锥指数 $C_v = 16.97$ 相差不大,考虑到仿真时所做的假设和测量车辆本身的结构误差,误差在可以接受的范围内。比较以上数据,不论是仿真计算的车辆圆锥指数还是车辆的额定圆锥指数都小于土壤圆锥指数59.9,所以车辆的通过性良好。

5 结束语

通过平整路面的实车试验,验证了所建立虚拟样机模型的正确性。利用虚拟样机模型进行了不同路面上的整车性能仿真分析,仿真预测出机器的临界侧倾角度为18°,最大爬坡角度为25°,避免了危险工作环境下的实车试验。同时,通过仿真和计算得出机器的通过性能良好,为玉米收获机的开发提供了一种高效的试验方法。

参 考 文 献

- 杨红旗,路凤银,郝仰坤,等. 中国玉米产业现状与发展问题探讨[J]. 中国农学通报,2011,27(6):368~373.
Yang Hongqi, Lu Fengyin, Hao Yangkun, et al. Situation analysis and development strategy of maize industry in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2011,27(6):368~373. (in Chinese)
- 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,2011,200(2):132~134.
- 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- 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.
- 蒋永林,吴珂,郭占军. 基于WES法的越野汽车松软地面通过性预测[J]. 轻型汽车技术,1999(4):20~22.
- 黄宁. 基于虚拟样机技术的小型甘蔗收获机行走系统的运动仿真分析[D]. 南宁:广西大学,2005.
Huang Ning. Kinematics simulation analysis in the stepped system of small-scale sugarcane harvester based on virtual prototyping technique[D]. Nanning:Guangxi University,2005. (in Chinese)
- 仇高贺. 小型甘蔗收割机底盘的虚拟设计及仿真研究[D]. 南宁:广西大学,2006.
Qiu Gaohe. Design and simulate the chassis system for samall-scale sugarcane harvester[D]. Nanning:Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- 机械电子工业部洛阳拖拉机所. 拖拉机设计手册[M]. 洛阳:机械电子工业部洛阳拖拉机研究所,1992.