

# 草方格铺设机器人多体动力学仿真与试验<sup>\*</sup>

刘晋浩<sup>1</sup> 潘海兵<sup>2</sup> 舒庆<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040;

3. 哈尔滨理工大学机械动力学院, 哈尔滨 150080)

**【摘要】** 采用 Pro/E 和 ADAMS 软件相结合的方法, 建立了草方格铺设机器人动力学模型, 同时探讨了二者联合建模仿真的一般步骤。模型添加必要的边界条件后, 对纵向压轮和横向插刀正常动作时的草方格铺设机器人振动状态进行了仿真。通过仿真, 得到了牵引车、纵向铺设机构、横向铺设机构、纵向压轮和横向插刀质心的位移、速度以及加速度曲线。分析了这些曲线出现波动的原因, 为进一步的优化提供了数据。通过试验, 得到实际状态下的试验曲线, 并与仿真曲线进行对照, 证实了草方格铺设机器人仿真模型和仿真结果的合理性和可靠性。

**关键词:** 草方格 机器人 多体动力学 仿真分析

**中图分类号:** TP242.3; TB122

**文献标识码:** A

## Multi-body Dynamic Simulation and Experiments of the Straw-checkerboard Barriers Paving Robot

Liu Jinhao<sup>1</sup> Pan Haibing<sup>2</sup> Shu Qing<sup>3</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3. School of Mechanical & Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

### Abstract

The multi-body dynamic model of the straw-checkerboard barriers paving robot is built through the combination of the Pro/E and ADAMS software. After the model is added with the required boundary conditions, the vibration state of the straw-checkerboard barriers paving robot is simulated when the pressing wheel and insert blade work normally. Through the simulation, the displacement, velocity and acceleration curves of the mass centers to the robot's tractor, longitudinal paving mechanism, horizontal paving mechanism, pressing wheel and insert blade are obtained. Through the analysis of the fluctuation curves, the improvement solution is proposed, which provides data for further optimization of the robot. At last, the experiment curves in the actual state are obtained by the experiment. By the contrast of the experiment and simulation curves, it is confirmed that the simulation results of the straw-checkerboard barriers paving robot are reasonable and reliable.

**Key words** Straw-checkerboard, Robot, Multi-body dynamic, Simulation analysis

### 引言

现代机械的结构越来越复杂, 传统的图解法和多刚体动力学分析方法在解决复杂的机械结构问题时存在计算复杂、结果误差较大等缺陷。现代三维

设计软件和多体动力学分析软件在有限的约束条件下协同高效运用, 能在复杂的机械产品设计中缩短设计时间, 加快结构分析进程, 起到事半功倍的作用, 提高了机械结构运动的可靠性、合理性。同时, 也提高了经济效益<sup>[1]</sup>。

草方格铺设机器人是一种将草快速插入沙中,形成方格形沙障,达到防风固沙目的的机械设备,其结构非常复杂。为了能够掌握草方格铺设机器人的运动状态,为进一步优化提供依据,本文利用三维设计软件 Pro/E 进行建模,多体动力学分析软件 ADAMS 进行仿真,分析机器人的运动状态和结构,试验研究机器人运动状态特性。

### 1 仿真模型建立

草方格铺设机器人主要是由牵引车、纵向铺设机构和横向铺设机构组成(图 1),沙漠车作牵引,纵向铺设机构和横向铺设机构执行铺设草方格的任务<sup>[2~3]</sup>。在仿真建模中,一些物理量如转动惯量、质量、质心位置等可以借助 CAD 软件(如 Pro/E)获得。但是大量的约束,只能靠 ADAMS 软件在建模过程中施加<sup>[4]</sup>。

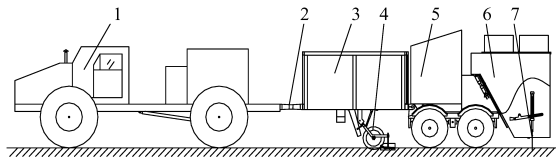


图 1 草方格铺设机器人整体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the straw-checkerboard barriers paving robot

- 1. 沙漠牵引车 2. 牵引装置 3. 纵向铺设机构 4. 纵向压轮
- 5. 横向承载机构 6. 横向铺设机构 7. 横向插刀

#### 1.1 草方格铺设机器人 Pro/E 模型

在 ADAMS 中建模,对于较简单的机械系统实现起来比较容易,但对于复杂机械系统就具有一定的困难。草方格铺设机器人的设计采用 Pro/E 软件进行建模(图 2),在对其进行仿真分析时可以利用这个模型,而不须重新建模。此模型由相当多的部件组成,在 ADAMS 中进行仿真时,部件间添加约束就比较困难,甚至没法完成,而且计算量大,有可能计算不出来,或者模型失真。因此,需要根据运动情况对模型进行简化。

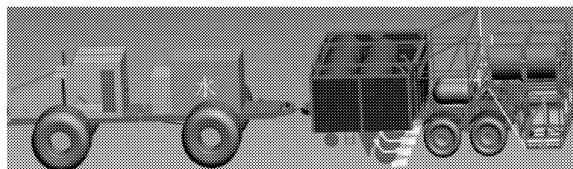


图 2 草方格铺设机器人 Pro/E 模型

Fig.2 Pro/E model of the straw-checkerboard barriers paving robot

#### 1.2 模型简化

根据草方格铺设机器人在工作中各零部件的运动情况,对 Pro/E 模型进行简化。牵引车前部有平

沙排障装置,但只有遇到大障碍物时才用,因此可以把它与牵引车合为一体;纵向铺设机构中的测距棘轮在运动中受力很小,可以将其与纵向铺设机构合为一体;纵向铺设机构中的压草轮和覆沙板简化成一体;横向铺设机构 3 个插刀的结构、尺寸、受力时间完全一样,动力学分析时可简化成作用在中间位置的 1 个插刀,纵向机构压轮可简化成 1 个。模型简化后如图 3 所示。

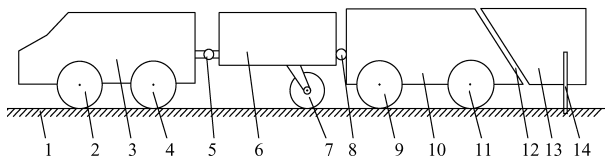


图 3 模型简化图

Fig.3 Simplified model sketch

- 1. 地面 2. 前轮 3. 牵引车 4. 后轮 5. 球铰 6. 纵向铺设机构
- 7. 纵向压轮 8. 旋转铰 9. 后车前轮 10. 横向承载机构
- 11. 后车后轮 12. 滑移铰 13. 横向铺设机构 14. 横向插刀

为了准确地给仿真模型添加约束副,依据简化后的草方格铺设机器人模型须画出模型约束的拓扑结构<sup>[1,5]</sup>,如图 4 所示。图中,方框代表物体,圆代表铰链。其中,1~4 代表牵引车的 4 个车轮,5 代表纵向压轮,6~9 代表工作车的 4 个车轮,10 代表横向插刀,R 代表旋转铰,Q 代表球铰,T 代表滑移铰。

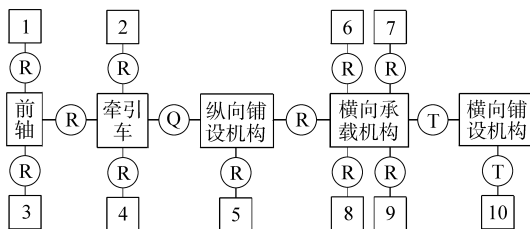


图 4 模型约束拓扑结构框图

Fig.4 Model constraint topological structure diagram

#### 1.3 ADAMS 中的仿真模型

Mechanism/Pro 模块是 Pro/E 与 ADAMS 的接口软件,它采用的是无缝连接方式,只要完成相关的设定,通过它可以将 Pro/E 中的模型导入 ADAMS 中<sup>[6]</sup>。首先将 Pro/E 模型所有零部件的单位统一成 ADAMS 认可的 mm、kg 和 N;其次就是通过接口软件定义刚体,同时可以给刚体命名以便仿真时选取,还须定义必要的关键点,便于仿真时对关键部位进行参数测量,设置好后即可将模型导入 ADAMS 中。模型中的柔体,如 Pro/E 中建立的轮胎没有轮胎特性,在 ADAMS 中不能进行仿真,需将其全部删除重新建立,添加弹性参数。最后,根据前面的模型约束拓扑结构,给模型添加必要的约束副。

#### 1.4 轮胎和路面的模型

草方格铺设机器人采用的是沙漠轮胎,仿真时

采用 UA 轮胎模型,根据厂家提供的轮胎特性参数,编制 UA 轮胎模型的轮胎特性文件 (\* .tpf)。ADAMS 中路面的模型有很多构建方法,其中三角网格法是用一系列点的坐标来确定路面形状,适于建立三维虚拟路面,具有通用性<sup>[7]</sup>。因此,本文采用三角网格法构建路面。利用 Matlab 软件生成方差为 1、均值为零的白噪声序列,通过设计相应的数字滤波器,输出符合路面谱要求的随机不平度随机序列,将序列数值按照路面文件的格式编制路面文件 (\* .rdf)。最后,根据轮胎特性文件和路面文件为草方格铺设机器人仿真模型添加轮胎和路面,由于路面位于轮胎的下方,路面与轮胎必须对应,否则仿真可能无法完成。

### 1.5 驱动载荷

编写驱动力矩函数,给牵引车主动轮施加转动力矩。为了模拟纵向压轮压草时的受力情况,给纵向压轮的轴上施加 3 个方向的力。为模拟横向插刀插入沙地中而产生的插入阻力和由于机器人运动产生的推沙阻力,给插刀加上一个脉冲作用力,脉冲由 STEP 函数定义<sup>[5]</sup>。

## 2 仿真计算及其结果

在牵引车 4 个主动轮转动力矩驱动下,仿真模型在虚拟环境中运行 2 s,得出虚拟状态下的运行状态(图 5)。ADAMS 程序采用拉格朗日乘子法建立系统运动方程并且对动力学方程求解,方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left( \frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + \boldsymbol{\varphi}_q^T \boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\theta}_q^T \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{Q}$$

式中  $T$ ——系统动能  $Q$ ——广义力列阵  
 $q$ ——系统广义坐标列阵  
 $\boldsymbol{\rho}$ ——对应于完整约束的拉氏乘子列阵  
 $\boldsymbol{\mu}$ ——对应于非完整约束的拉氏乘子列阵

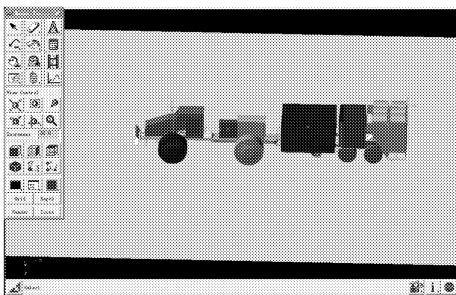


图 5 草方格铺设机器人在 ADAMS 中仿真界面

Fig.5 Simulation interface of the straw-checkerboard barriers paving robot in ADAMS

仿真结束后,启动 ADAMS/PostProcessor 模块得到仿真结果。草方格铺设机器人工作能力影响最大的指标主要是牵引车的纵向(前进方向)和垂向(上下方向)加速度,纵向和横向铺设机构质心的纵

向和垂向加速度,仿真结果如图 6~13 所示。

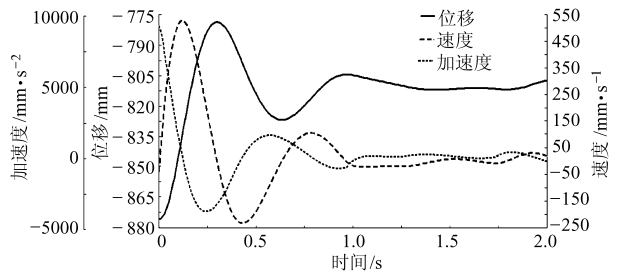


图 6 牵引车质心垂向位移、速度、加速度曲线

Fig.6 Vertical displacement, velocity and acceleration curve of the tractor mass center

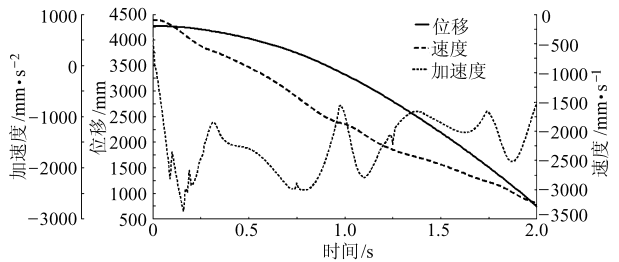


图 7 牵引车质心纵向位移、速度、加速度曲线

Fig.7 Longitudinal displacement, velocity and acceleration curve of the tractor mass center

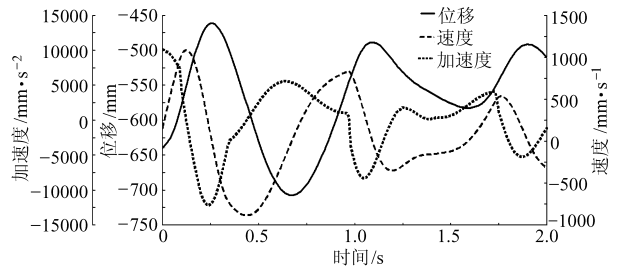


图 8 纵向铺设机构质心垂向位移、速度、加速度曲线

Fig.8 Vertical displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the longitudinal paving mechanism

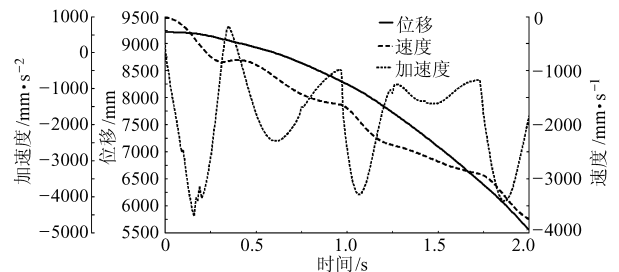


图 9 纵向铺设机构质心纵向位移、速度、加速度曲线

Fig.9 Longitudinal displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the longitudinal paving mechanism

## 3 试验

草方格铺设机器人在内蒙古自治区浑善达克沙地进行了试验,试验参考 GB 4970—1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》。试验场地地势较平坦,草方格铺设机器人各项技术参数正常,行驶速度为

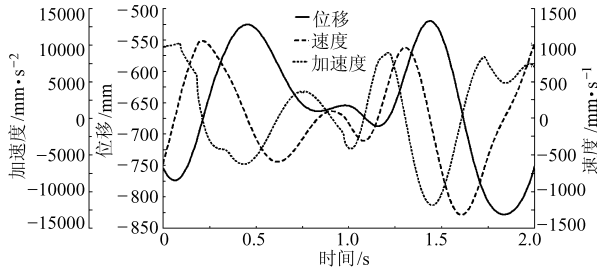


图 10 横向铺设机构质心垂向位移、速度、加速度曲线  
Fig. 10 Vertical displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the horizontal paving mechanism

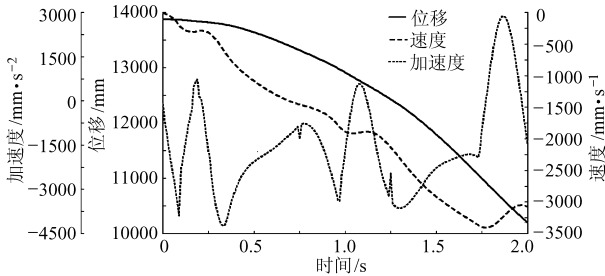


图 11 横向铺设机构质心纵向位移、速度、加速度曲线  
Fig. 11 Longitudinal displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the horizontal paving mechanism

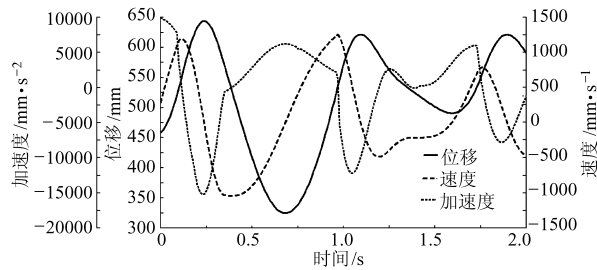


图 12 纵向压轮质心垂向位移、速度、加速度曲线  
Fig. 12 Vertical displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the pressing wheel

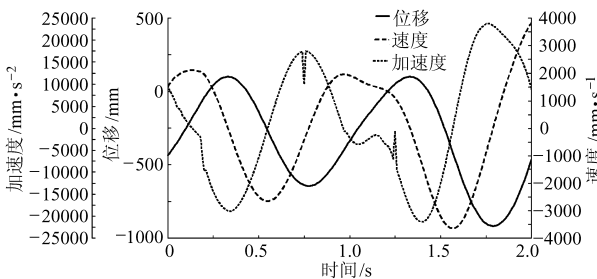


图 13 横向插刀质心垂向位移、速度、加速度曲线  
Fig. 13 Vertical displacement, velocity and acceleration curve of the mass center to the insert blade

30 km/h, 横向和纵向铺设机构正常运行。仪器采用的是丹麦 BK 公司生产的 BK4370 型加速度传感器和 BK4322 型电荷放大器, 日本 TEAC 公司生产的 MR-30C 型七通道磁带记录仪, 美国 GR 公司生产的 GR2515CAT 型结构动态信号分析仪系统和一台便携式计算机。将实测结果与仿真曲线对比如图 14~16 所示。

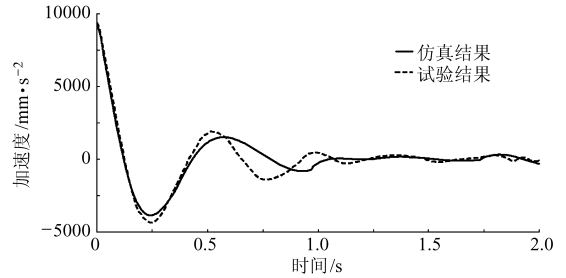


图 14 牵引车质心垂向加速度仿真和试验曲线  
Fig. 14 Simulation and test vertical acceleration curves of the tractor mass center

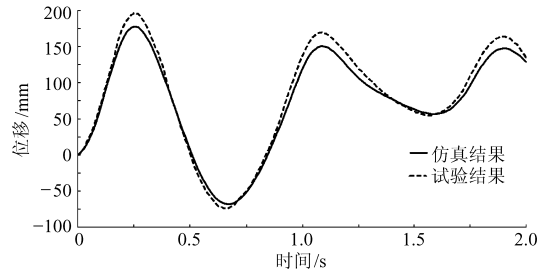


图 15 纵向铺设机构质心垂向位移仿真和试验曲线  
Fig. 15 Simulation and test vertical displacement curves of the mass center to the longitudinal paving mechanism

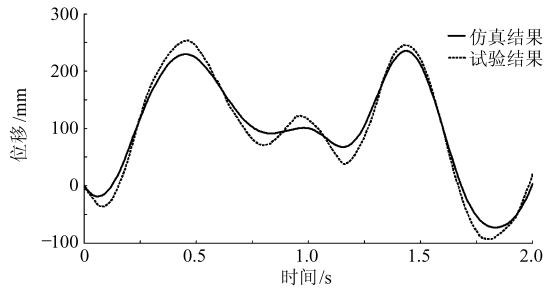


图 16 横向铺设机构质心垂向位移仿真和试验曲线  
Fig. 16 Simulation and test vertical displacement curve of the mass center to the horizontal paving mechanism

### 4 分析

图 6 显示牵引车启动时, 牵引车质心垂向位移、速度、加速度变动较大, 但很快就趋于平稳。图 7 中牵引车纵向加速度变动较大, 这与横向插刀的推沙阻力有关。从车辆平顺性指标上来看, 牵引车垂向位移、速度、加速度在启动以后都趋于平稳, 说明总体上草方格机器人的平顺性较好, 其总体结构设计基本合理。纵向铺设机构质心垂向加速度和纵向加速度对纵向铺设机构中的草辊更换动作有影响。当加速度大时, 可能导致草辊不能及时下落, 也使草帘漂浮, 压入沙土中有折叠现象。图 8 和图 9 显示纵向铺设机构质心垂向加速度启动时变化较大, 随后逐渐减小, 不会对纵向铺设机构上的部件带来太大振动。图 10 和图 11 显示横向铺设机构质心的垂向加速度在经过最初的振荡以后很快平稳, 不会对其上的剪草机构和草辊产生大的影响, 但对整体结构

的可靠性产生不利影响,应提高横向铺设机构刚度。而其质心的加速度变动较大是由于横向插刀加速运动的结果。图12表示纵向压轮的运动情况,启动时位移变动较大,其随动因素较大。可采取先启动后放下纵向压轮的方法来保证草的压入深度,而速度和加速度变化大对横向压轮的强度和刚度提出了较高要求,启动后再降纵向压轮对减少轮的磨损也有利。图13表明,横向插刀运动速度可以满足插入时间的要求,加速度足够大可满足插入沙地力的需要。

图14~16将仿真曲线和试验测得的结果进行比较,仿真曲线与实测曲线比较接近,图14中牵引车质心垂向加速度仿真和试验结果在2s时都趋于零,图15和图16曲线变化趋势也相同,说明所建的草方格铺设机器人仿真模型与真机比较接近,在进行参数优化时可以用模型代替真机。试验结果与仿真结果存在一定的差异,是因为在实际中有些零部

件存在较大的弹性,建模时在不影响结果的情况下将其简化为刚体。

## 5 结束语

以草方格铺设机器人为研究对象,采用CAD软件Pro/E与多体动力学软件ADAMS相结合的方法,讨论了多体动力学建模与仿真的一般步骤。Pro/E中建立的模型导入ADAMS后,对草方格铺设机器人运动情况进行仿真,得到关键部件的一些参数如位移、速度、加速度,分析出曲线波动原因,对机器人结构合理性进行验证。最后,将实测曲线与仿真曲线进行对照,证实了仿真模型和仿真结果的可靠性。得到的仿真结果为草方格铺设机器人进一步优化改进提供了依据,仿真模型在设计初级阶段对草方格铺设机器人运行状况的预测起到了重要的参考作用。

## 参 考 文 献

- 1 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- 2 舒庆,刘晋浩. 防风固沙草方格铺设机器人总体设计[J]. 农业机械学报,2007,38(6):199~201.
- 3 舒庆,刘晋浩. 防风固沙草方格铺设机器人通过性研究[J]. 农业机械学报,2007,38(7):99~102,120.  
Shu Qing, Liu Jinhao. Research on trafficability of straw-checkerboard sand barriers paving robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(7):99~102,120. (in Chinese)
- 4 尹华兵,范化春,魏来生. 基于虚拟样机技术的某车辆性能仿真研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(10):2289~2293.  
Yin Huabing, Fan Huachun, Wei Laisheng. Research on simulation of a certain vehicle's performances based on virtual prototype technology with ADAMS ATV[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2289~2293. (in Chinese)
- 5 刘晋浩,舒庆. 草方格铺设机器人虚拟样机建模及平顺性分析[J]. 北京林业大学学报,2007,29(4):72~74.  
Liu Jinhao, Shu Qing. Virtual prototype of straw-checkerboard sand barriers paving robot and ride comfort[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(4):72~74. (in Chinese)
- 6 李军,邢俊文,覃文洁,等. ADAMS实例教程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- 7 张云清,项俊,陈立平,等. 整车多体动力学模型的建立、验证及仿真分析[J]. 汽车工程,2006,28(3):287~291.  
Zhang Yunqing, Xiang Jun, Cheng Liping, et al. The setting up, validation and simulation of full vehicle multi-body dynamics model[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(3): 287~291. (in Chinese)
- 8 张立军,李刚. 悬架橡胶件对汽车平顺性影响的多体动力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):16~19.  
Zhang Lijun, Li Gang. Multi-body dynamics analysis for the effectiveness of suspension rubber elements on ride comfort[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):16~19. (in Chinese)