

基于多体动力学的履带车辆 半主动悬挂系统仿真研究

陈兵 顾亮 黄华

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要 悬挂系统是高速履带车辆的重要组成部分, 悬挂系统的性能直接影响车辆的乘坐舒适性和越野机动性. 被动悬挂因结构特征限制了其进一步提高车辆的机动性和舒适性的能力, 半主动悬挂可调节悬挂参数, 保持车辆悬挂性能最优或次优, 对改善车辆振动环境效果明显. 本文用动力学分析软件 RecurDyn, 通过实体建模方法对高速履带车辆整车进行了被动和半主动悬挂对比仿真分析, 研究表明, 半主动控制通过悬挂阻尼力的变化改善车体振动效果明显, 在高速履带车辆上采用可调阻尼式的半主动悬挂控制是可行和有效的.

关键词 履带车辆, 半主动悬挂, 多体动力学仿真

悬挂系统是履带式装甲车辆的重要组成部分, 其功能是弹性连接车身与负重轮, 缓和并衰减因路面不平而引起的冲击振动, 保证车辆平稳行驶. 悬挂系统的优良特性是履带式装甲车辆具有高速机动性、高通过性和乘员舒适性的保证^[1].

为更好发挥履带装甲车辆在战场上的作用, 需要提高其机动性和乘坐舒适性, 国内外研究表明: 履带装甲车辆在采用高性能悬挂系统后, 对提高乘员的乘坐舒适性、改善火炮射击精度、提高火炮行进间射击速度、提高乘员作战效能和延长车载设备的使用寿命等方面有重要作用. 这就使得对履带式装甲车辆悬挂系统的研究变得十分迫切, 国内外军用履带车辆生产、研究单位先后展开了对高性能悬挂系统的研究.

高速履带车辆一直使用被动式悬挂系统, 这种传统悬挂系统具有结构简单、可靠性高和造价低廉等特点. 但被动悬挂通常为车辆乘坐舒适性、转向稳定性等的折衷设计, 一旦设计定型就无法在车辆行驶时调节, 而这种固定的悬挂特性使得车辆在适应路面变化上缺乏灵活性, 驾驶员不得不降低车速以适应变化的路面. 显然, 被动式悬挂已经不适应高机动性和高舒适性的双重要求, 人们为了克服被动悬挂的上述缺陷, 尝试了很多方法, 例如采用非

线性变刚度弹簧或车体高度调节装置, 取得了一定的效果, 但是仍然不能从根本上消除上述缺陷. 西方发达国家从上世纪六七十年代开始了主动、半主动悬挂的研究^[2]. 主动悬挂虽然从理论上可以获得最佳减振效果, 但是要消耗大量的发动机功率, 而且因为结构复杂、体积庞大、可操作性差等缺点而没有在军用高速履带车辆中得到应用. 与主动悬挂相比, 半主动悬挂属于无源智能悬挂, 具有优良的减振特性和低功耗、结构简单、价格低廉和不占用车内空间等特点得到业内人士的广泛关注, 已成为近年来悬挂系统的研究热点^[3]. 本文运用多刚体建模方法, 仿真分析并验证了车辆在采用半主动悬挂后, 可有效提高车辆的乘坐舒适性, 改善人机环境.

1 履带车辆的实体建模

如何建立准确、实用的整车系统动力学模型一直是困扰车辆研究人员的难题. 随着计算机技术的发展, 大规模科学计算成为可能, 基于实体建模的多体动力学碰撞分析方法为深入研究车辆系统动力学问题提供了有效的手段.

本文采用最新的高速履带车辆多体动力学分析软件——RecurDyn 并针对某型履带车辆建立实

体模型,进行动力学分析.该软件是由韩国 Function Bay 公司开发的新一代多体系统动力学仿真软件,其采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法,显著减少了绝对坐标系中约束方程的数量,适合求解大规模多体系统动力学问题.其强大的求解能力,使得大规模、高复杂度、多碰撞等系统的建模求解成为可能,在军用车辆上得到广泛应用,尤其在履带式车辆动力学、车辆运动稳定性、越障能力、人机工程等方面,已为韩国、日本军方解决了大量动力学设计问题.该软件可进行复杂机械系统的动力学、运动学、静力学和特征值分析,并且具有很强的建模能力,由许多专用模块组成.

针对高速履带车辆推出了专门模块 Track-HM,该模块是由履带元件,包括负重轮、主动轮、诱导轮、履带板和履带连接器等元件所组成,并通过履带销定义所有元件与元件间的连接关系.地面模块(Ground)支持目前在军用车辆领域使用的路面标准,也可以根据实测路面信息,由用户定义符合实际路况的路面^[4].

按照动力学理论,系统各组成部分受外力和内力相互作用,对车辆悬挂动力学系统其内力是车辆各部件相互约束的作用力;而外力主要由外界环境,主要是地面不平度对车辆的激励而引起的.

1.1.1 RecurDyn 的建模和工作流程

RecurDyn 的建模、仿真工作流程如图 1 所示.

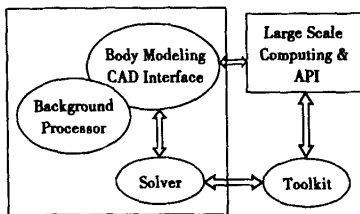


图 1 RecurDyn 工作流程
Fig. 1 Procedure of RecurDyn Software

1.1.1.1 实体建模

RecurDyn 提供了基于 Parasolid 内核的 CAD 实体建模环境,由快捷菜单和(或)鼠标拖拽方式就可建立车辆实体模型.在建完车体模型后,调用高速履带车辆工具包以完成车辆行动部件,例如负重轮、主动轮、诱导轮、履带等的实体建模.并根据所研究车辆部件的实际参数对这些子模块赋初值,即可建立高速履带车辆的实体模型.本文以某型坦克车辆为例,建立了如图 2 所示的实体模型.

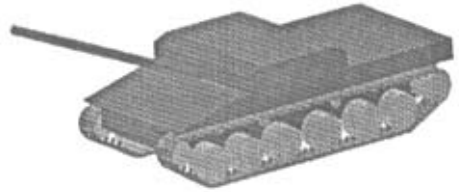


图 2 某型主战坦克实体模型
Fig. 2 Real Body Model of a MBT

1.1.2 结构约束和力约束

在车辆各个组成实体部件赋完初始参数后,就可定义实体之间的各种约束.通常有结构约束(接触约束)、力约束和运动约束,这是整车实体建模过程中最基本也是最复杂的一个环节.要求建模者熟悉所研究对象的结构特征和运动特性.例如,在本中,主动轮、诱导轮、负重轮、托边轮、平衡轴等同车体之间的结构约束均为铰(Joint)约束.在 RecurDyn 中,通过以下两个约束模块,就可方便地建立履带车辆各运动部件之间的约束.

(1) 结构约束模块(Joint Module)按照各构件的运动规律,建立车辆的各个运动部件(负重轮、主动轮、诱导轮、托边轮、平衡轴等)之间的结构约束,例如,诱导轮相对车体的旋转约束、负重轮相对平衡轴的旋转等均可由铰约束实现.在各铰接约束处,通过对约束特性的定义,设置各部件的初始运动状态,除了主动轮的驱动约束外(见后面运动约束),其它均按照实际情况定义为零状态.

(2) 力约束模块(Force Module)用于给研究对象加初始力约束,例如,在平衡轴和车体之间存在结构约束(铰约束)和力约束(扭杆弹簧+减振器),使用“旋转弹簧-减振器-做动器(RSDA)”模型施加力约束,并根据试验值或计算值赋予力约束的初值.

本文所研究的某型坦克车悬挂系统采用“扭杆+液压减振器”式复合式悬挂.悬挂弹性元件为高强度扭杆弹簧,扭转刚度在工作范围内严格线性,在 RSDA 模型中,直接输入悬挂刚度为一常数 $K = 392 \text{ Nm/rad}$.阻尼元件为液压式减振器,其阻尼特性为非线性,阻尼系数既可用试验所测得非线性曲线作为输入;也可通过非线性曲线的多项式拟合后所得阻尼系数多项式表达式,均如图 3 所示.

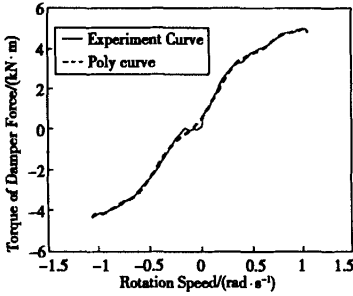


图3 阻尼特性曲线
Fig.3 Damping characteristic curve

曲线拟合的多项式阻尼力矩表达式为

$$POLY(x, a, b_0, \dots, b_n) \quad (1)$$

其中, x 为自变量, a 为偏移系数; $b_i (i=1, \dots, n)$ 为多项式拟合系数.

1.1.3 连履带环

在前两步工作完成后,根据履带板的结构尺寸定义双销履带板的结构和物理参数,并用履带组装模块(Assemble Module)将各部件连接起来,形成完整的履带环,并按实际履带板的数量和间隙对履带环进行微调,完成整车实体模型构建.基于某型坦克车辆结构参数的实体建模如图2所示.整车多体系统共有1036个自由度.

在Assembly模块属性中可以修改履带环的参数,例如,履带环预张力、挂胶履带销扭转刚度系数或阻尼系数以及各接触刚体之间的接触系数,主要包括履带板同主动轮、负重轮、地面等之间的刚度系数和阻尼系数.

1.1.4 刚体碰撞约束

在悬挂行程极限位置,设有弹性限制器,以防止悬挂极限时所产生的刚性撞击对车辆乘坐舒适性的降低.本文所研究的车辆在第一、二、六负重轮处安装有液压限制器,碰撞参数输入为液压限制器的实测参数,在实体建模中的碰撞约束通过Contact模块实现.本文实体模型的碰撞约束是在车体限位器和负重轮平衡肘之间设为“球-圆柱(Sphere-Cylinder)”型碰撞约束.

车辆与地面之间的约束由软件自动完成,但“履带-路面”之间的接触参数需对地面约束进行定义,假设它们之间的接触路面为非沉陷刚性路面;也可以设为软路面,但需要输入软路面的沉陷参数,例如,为研究车辆在沉陷路面的通过性和机动性,则需要根据 Bekker, M. G 的地面力学理论^[5],

设定软路面的“履带-地面”沉陷参数.对一些典型的沉陷路面,例如干燥沙地、瑞典雪地、比利时雪地等,该软件给出了土壤沉陷参数.在本文中,为简化起见,不考虑路面沉陷,认为“履带-路面”之间的相互作用为刚性路面.

1.1.5 运动约束

高速履带车辆是由动力装置通过侧传动机构驱动主动轮旋转,由主动轮齿拨动履带环,驱动车辆运动.在车体和主动轮的结构约束中,给它们之间的铰接施加一个运动约束.根据研究目标所要求的履带车辆运行速度,在主动轮与车体的铰接(Revolute Join)属性中施加初始运动约束(Initial Motion).

本文针对某型坦克车辆,将其运动过程分成三个阶段:(1)静平衡,仿真开始后车辆在重力作用下,缓慢进入静平衡状态;(2)加速,车辆由静止状态开始加速,并加速到指定车速;(3)特定研究路段,车辆进入需要研究的特殊路段,例如,正弦路面、障碍路面或随机越野路面等,实现车辆整车动力学特性研究.

为实现上述运动规律,在主动轮处施加的运动约束表达函数式为

$$STEP(TIME, 5, 0, 12, 34.94) \quad (2)$$

此函数意义为:在前5s内,车速为0,让车辆在重力作用下落到水平路面上,在减振器作用下迅速熄振后处于静止状态.在5~12s内车辆开始加速,由0 km/h加速至40 km/h.速度变化曲线如图4所示.由该图可知,车辆从12s后开始在正弦路面上行驶,速度曲线波动表示车体俯仰角振动剧烈,直线运动速度受俯仰角振动影响显著.

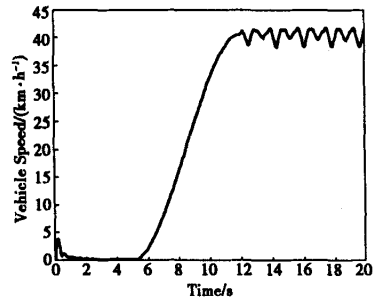


图4 车辆行驶速度曲线
Fig.4 Speed Curve Vehicle

1.1.6 构造路面

模型中的路面谱为实测标准正弦路面谱,其波长为 $L = 10\text{m}$,总幅值为 $H = 0.25\text{m}$,路面动附着系数为 0.75 ,静附着系数为 0.85 ,路面总长度为 140m ,其中有效长度为 100m .为提高求解车辆静平衡的速度,初始路段设置为水平路面,车辆行驶一段时间,达到所要求的车速后,进入正弦路面.

2 履带车辆半主动悬挂理论

2.1 半主动悬挂理论研究

半主动悬挂同主动悬挂相比具有能耗小、结构简单、造价低、可靠性高、减振性能好等优点而得以在军用车辆中应用.图5所示为车辆单轮模型半主动悬挂原理图.

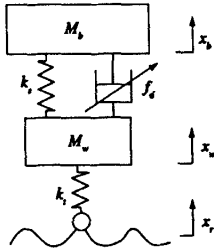


图5 半主动悬挂系统单轮模型 Fig.5 Single Wheel Model of Semi-active Suspension

调节悬挂系统的阻尼系数实现车辆悬挂系统振动模态同外界激励的最优或次优匹配,由图5可得到其运动方程为

Mb*xb'' = kb*(xw - xb) + fd
Mw*xw'' = kb*(xw - xb) - kd*(xw - xr) - fd

其中,可控减振器阻尼系数 Cv ∈ [Cmin, Cmax],为逼近理想天棚阻尼控制规律,可调阻尼力 fd 变化规律为

fd = { Cmax*(xb - xw) 当 xb*(xb - xw) >= 0
Cmin*(xb - xw) 当 xb*(xb - xw) < 0

林野[2]、顾亮[6]等人对履带车辆半主动悬挂系统及可控液压减振器进行了深入研究,得出:在一定的路面和车况时,整车悬挂系统存在最佳阻尼,通过调节可控阻尼元件的阻尼系数(液压减振器的开口),改变整车振动模态的,实现车辆减振振动.

对标准正弦路面,当车辆以恒定行驶时,整车

悬挂系统存在最佳匹配阻尼,在最佳阻尼下,整车悬挂系统的隔振效果最好.

2.2 车辆悬挂系统性能指标的确定[7,8]

悬挂系统影响车辆乘坐舒适性和操纵稳定性,履带车辆质量大且行驶时履带会自动“铺设路面”,故履带车辆操纵稳定性较好.对履带车辆悬挂系统主要研究其对车辆越野机动性和乘坐舒适性的影响,主要包括以下3个方面:(1)垂向线性振动;(2)俯仰角振动;(3)悬挂动行程,由悬挂击穿概率来间接验证.

3 仿真结果分析

对被动悬挂和经过优化的半主动悬挂在 RecurDyn 环境下分别建模仿真,对比车体质心处的垂向振动加速度值和相应的功率谱以及悬挂限制器的撞击概率.

在时域内,从图6可知,安装半主动悬挂系统的车体质心处垂向振动加速度峰值比安装被动悬挂时在相同位置所出现的峰值低很多.在频域内,对比两种悬挂形式的功率谱密度峰值下降程度,由图7可知,车体质心处的功率谱密度有显著下降,尤其是在车辆垂向线性振动固有频率时,功率谱峰值下降明显.由图8可知,采用半主动悬挂后,悬挂装置发生击穿的概率明显降低,在后期基本没有发生.悬挂击穿次数的减少也提高了车辆乘坐舒适性.

由上述仿真结果可知,该型履带装甲车辆采用半主动悬挂后有效的降低了车辆振动,提高了乘坐舒适性.

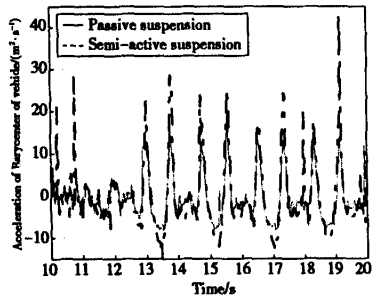


图6 车体质心加速度对比值 Fig.6 Acceleration Comparison of CG of vehicle

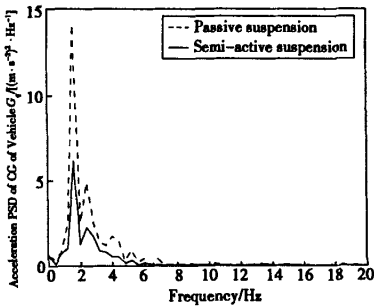


图7 车体质心处加速度功率谱
Fig.7 Acceleration PSD of Vehicle Center

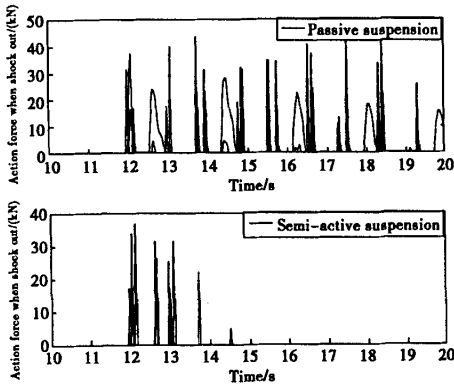


图8 悬挂“击穿”时域图
Fig.8 Suspension shock out curve

4 结论

(1)采用多刚体系统分析软件 RecurDyn 可以快速、方便的进行履带式装甲车辆悬挂系统线性、非线性振动的仿真分析与研究。

(2)采用可变阻尼式可控减振器的半主动悬挂系统可有效改善履带式装甲车辆的减振性能、降低车体振动、提高乘坐舒适性,改善了人机环境,使驾驶员可保持好的工作效能,有利于提高战斗力。

(3)这种通过调节阻尼实现振动控制的半悬挂系统实现方便、改动小、价格低,是一种性价比高的悬挂系统,具有很广的应用前景。

(4)如果能进行履带式装甲车辆安装半主动悬挂系统的实车道路试验,则上述结论将更有说服力。

参 考 文 献

- 1 王书镇. 高速履带车辆行驶系. 北京:北京理工大学出版社, 1988 (Wang Shuzheng. Driving System of High-Speed Tracked Vehicles. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988 (in Chinese))
- 2 林野. 振动主动控制理论及其在车辆工程中的应用[学位论文]. 北京:北京理工大学, 1987 (Ling Ye. Vibration Active Control Theory and It Application in Vehicle Engineering. Vehicle Engineering School of Beijing Institute of Technology, 1987 (in Chinese))
- 3 Choi S B, Suh M S, et al. Neuro-Fuzzy Control of a Tracked Vehicle Featuring Semi-Active Electro-Rheological Suspension Units. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 35:141~162
- 4 RecurDyn. Solver Theoretical Manual FunctionBay, Inc
- 5 张克健. 车辆地面力学. 北京:国防工业出版社, 2002 (Zhang Kejian. Vehicle-Terramechanics. Beijing: National Deference Industry Press, 2002 (in Chinese))
- 6 顾亮. 叶片式减振器阻尼稳定性和温衰特性的研究[学位论文]. 北京:北京理工大学, 1996 (Gu Liang. Research of Stability of Damping and Thermo-Decay for vane Absorber. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1995 (in Chinese))
- 7 余志生. 汽车理论(第二版). 北京:机械工业出版社, 2000 (Yu Zhisheng. Vehicle Theory (Second Edition). Beijing: Mechanical Industry Press, 2000 (in Chinese))
- 8 丁法乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学. 北京:国防工业出版社, 2004 (Ding Faqian. Dynamics of Tracked Armored Vehicles suspension System. Beijing: National Deference Industry Press, 2004 (in Chinese))

A SIMULATION STUDY OF TRACKED VEHICLE WITH EMI-ACTIVE SUSPENSION BASED ON MULTIBODY DYNAMICS

Chen Bing Gu Liang Huang Hua

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Suspension system is an important component of the high-speed tracked vehicles, and its characteristics directly affect the vehicles' ride comfort and cross-road mobility. However, the fixed structural limitation of the passive suspension makes it impossible to further improve the vehicles' comfort and mobility. the semi-active suspension system is capable of adjusting its parameters and keeps the vehicle's suspension characteristics always optimal or sub-optimal, and it can improve the vibration circumstance of the vehicle evidently. A full tracked vehicle equipped with a passive or a semi-active suspension was analyzed by real-body modeling method with RecurDyn software, and their respectively simulation results were compared. We found that the semi-active control changing damp force could improve vehicle vibration clearly, and the semi-active suspension system using adjustable damping rate was effective and available for high-speed tracked vehicles.

Key words tracked vehicles; semi-active suspension; multibody dynamics simulation