

文章编号:1000-582X(2009)06-620-05

全地形车操纵稳定性建模与仿真

张志飞^{a,b},徐中明^{a,b},彭旭阳^b,贺岩松^{a,b}

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院, 重庆 400030)

摘要:基于三维几何建模软件 CATIA 和多体动力学软件 MSC. Adams, 建立了用于操纵稳定性分析的全地形车整车多体动力学模型。参照汽车操纵稳定性试验方法, 对全地形车进行稳态回转仿真分析、角阶跃输入仿真分析和单“移线”仿真分析。全地形车的稳态回转特性在低侧向加速度时体现为不足转向, 中等侧向加速度时体现为过多转向, 高侧向加速度时又表现出不足转向特性, 这是由于全地形车采用单摇臂式后悬和后桥单轴驱动。分析表明驾驶员身体的移动能在一定程度上修正稳态回转特性。

关键词:全地形车; 操纵稳定性; 多体动力学; 虚拟样机

中图分类号: U461.6; TP391.9

文献标志码: A

Modeling and simulation of all-terrain vehicle handling stability

ZHANG Zhi-fei^{a,b}, XU Zhong-ming^{a,b}, PENG Xu-yang^b, HE Yan-song^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A multi-body-dynamics model of all-terrain vehicles (ATVs) is built for analyzing handling stability using the geometry software CATIA and dynamic analysis software MSC. ADAMS based on the controllability and stability testing procedures for automobiles, steady static circular simulation, steering wheel angle step input simulation, and single lane change simulation are performed. The results indicate that this ATV under-steers in the low lateral acceleration range, over-steers during middle lateral acceleration, and under-steers during high lateral acceleration due to its single rocker rear suspension and single drive axle. The steering behavior of this ATV could be changed by the driver shifting her body.

Key words: all terrain vehicles; handling stability; multi-body system dynamics; virtual prototype

全地形车(all terrain vehicle)是指适合所有地形的交通工具,具有良好的机动性,在农业、林业、畜牧业以及军事领域得到了广泛应用,操纵稳定性是全地形车的一个重要性能,但目前对这方面的研究并不多。

操纵稳定性研究常采用试验和仿真来进行^[1],试验受许多条件的限制,理论分析可以克服这些问

题,因此得到了快速发展^[2-5]。基于多体动力学的虚拟样机技术是仿真分析的一个重要手段,在车辆操纵动力学的分析和改进中得到了广泛应用,取得了良好的效果^[3-8]。

笔者利用三维几何建模软件 CATIA 和多体动力学软件 MSC. Adams, 建立全地形车的多体动力学模型,进行操纵稳定性的虚拟试验,分析稳态回转

收稿日期:2009-02-11

基金项目:重庆市重点自然科学基金资助项目(CSTC2006BA6017)

作者简介:张志飞(1983-),男,重庆大学博士,研究方向为车辆动力学与控制,(E-mail)zhangzf@cqu.edu.cn。

徐中明(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)xuzm@cqu.edu.cn。

特性、角阶跃响应特性以及单移线响应特性。最后分析了驾驶员身体的移动对稳态回转特性的影响。

1 整车多体动力学建模

基于 CATIA 和 MSC. Adams 建立了用于操纵稳定性分析的整车多刚体动力学模型(如图 1),该模型由车架、双横臂式前独立悬架、单摇臂式后悬架、转向机构、车架、轮胎模型和路面谱等组成。

整车模型包括主销、上横臂、下横臂、转向拉臂、转向节、后平叉、后桥、方向把、转向轴、转向传动条和转向横拉杆、车架和轮胎等 25 个动力学部件组成(不含路面)。驾驶员、发动机和油箱重量所占整车的比例大,不能忽略,通过简化为 3 个质量点固定在车架上。

整车动力学模型共含 29 个约束铰链,3 个运动学约束,1 个用来驱动方向把转向,另 2 个用来驱动后轮。整车多体动力学模型有 13 个自由度。

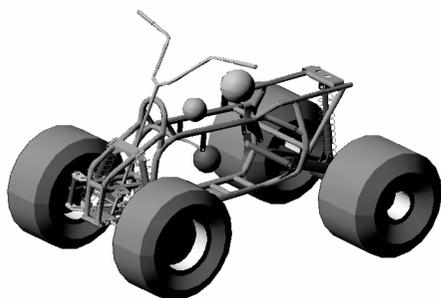


图 1 整车多刚体动力学模型

轮胎是操纵稳定性建模的重要部件。轮胎模型的研究较多^[1-12],目前比较成熟的轮胎模型有 Fiala、Delet、Smithers 和 UA。Fiala 轮胎模型的参数较少且满足操纵稳定性仿真要求,故选用 FIALA 轮胎模型。

2 操纵稳定性仿真分析

参照国标《汽车操纵稳定性试验方法》^[13]对全地形车分别进行稳态回转仿真分析、角阶跃输入仿真分析和单“移线”仿真分析,分析其操纵动力学特性。

2.1 稳态回转仿真分析

采用固定方向把转角连续加速的方法进行稳态回转试验。全地形车方向把转角为 31°,以最低稳定车速沿半径 $R_0 = 15\text{ m}$ 的圆周行驶,然后固定方向把不动,车速 u 开始缓慢均匀加速。图 2 为该车的仿真运动轨迹。

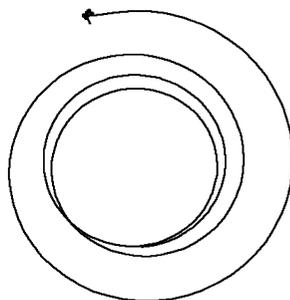


图 2 全地形车稳态回转时的轨迹

弯半径比 R/R_0 随侧向加速度 a_y 的变化曲线、侧向加速度 a_y 随时间的变化曲线以及 4 个车轮垂直载荷随时间的变化曲线。

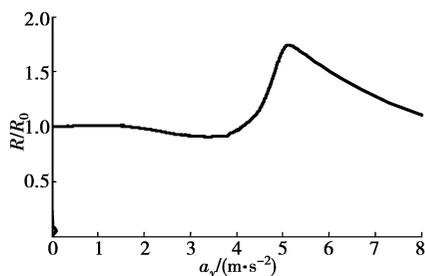


图 3 转弯半径比 R/R_0 变化曲线

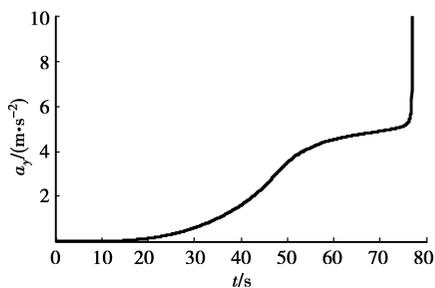


图 4 侧向加速度变化曲线

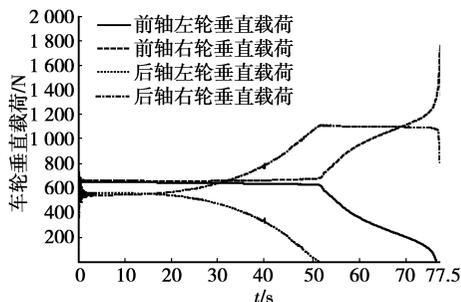


图 5 车轮载荷变化曲线

该全地形车的稳态回转特性体现出以下特点:

1) 在低侧向加速度时表现为不足转向;

2) 随着侧向加速度的增加,后轴左、右轮载荷转移量比前轴大,使得后轴轮胎侧偏刚度变化大,从而使整车趋于过多转向,该车中性转向点侧向加速度为 1.319 m/s^2 。

3) 51.4 s 时,侧向加速度为 3.774 m/s^2 ,后轴左车轮离地,此时 R/R_0 达到最小。

4) 51.4 s 以后,左后轮离地,使得后轴侧偏刚度变化不大,前轴左、右轮载荷转移量开始增加,使得前轴侧偏刚度变小,整车趋于不足转向,但此时四轮全地形车只有三轮着地,稳定性差。

5) 76.25 s 时,侧向加速度为 5.333 m/s^2 ,左前轮也开始离地,整车处于不稳定状态,处于翻车临界状态。

全地形车的稳态转向特性随侧向加速度的变化而变化,主要原因是它采用双横臂式前独立悬架、单摇臂式后悬架、驱动方式为后桥单轴驱动。

2.2 角阶跃输入仿真分析

仿真时,全地形车的初始状态是匀速直线行驶,速度取最高车速的 70%,即为 56 km/h 。在第 10 s 时,通过阶跃函数来输入方向把转角,输入过程持续时间为 0.1 s,转角为 6° 。转角大小由要求达到的稳态侧向加速度 a_y 值确定,该车稳态侧向加速度值不应超过 1.319 m/s^2 。

全地形车的横摆角速度和侧向加速度响应分别如图 6、7 所示,该车响应时间 $\tau=0.18 \text{ s}$,峰值反应时间 $\epsilon=0.21 \text{ s}$,超调量 $\sigma=103.54\%$ 。该工况下,全地形车的侧向加速度峰值为 1.179 m/s^2 ,稳态值为 1.139 m/s^2 ,均低于中性转向点侧向加速度。

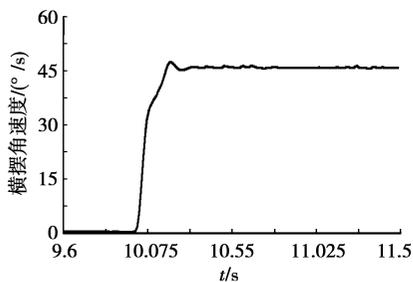


图 6 横摆角速度响应曲线

车速不变,不同方向把转角输入下的侧向加速度响应曲线如图 8 所示,体现出以下特点:

1) 随方向把转角的增加,侧向加速度稳态值越来越大,波动越来越明显。

2) 方向把转角为 10° 时,侧向加速度峰值达到

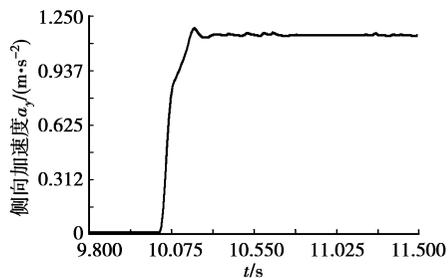


图 7 侧向加速度响应曲线

1.319 m/s^2 时,具有过多转向特性,转弯半径减小,侧向加速度迅速增加到 3.774 m/s^2 左右,此时后轴左轮离地,这个过程响应没有峰值,侧向加速度迅速增加直到稳定状态,这是临界状态。

3) 方向把转角为 14° 时,全地形车单轮离地,具有不足转向,响应时间快,整车处于相对稳定状态。

4) 当方向把转角为 18° 时,侧向加速度响应峰值达到 7.18 m/s^2 ,高于翻车临界侧向加速度值 5.333 m/s^2 ,但由于侧向加速度稳态值为 4.489 m/s^2 ,且进入稳态所经历的时间很短(1.2 s),由于惯性原因车不会翻倒。

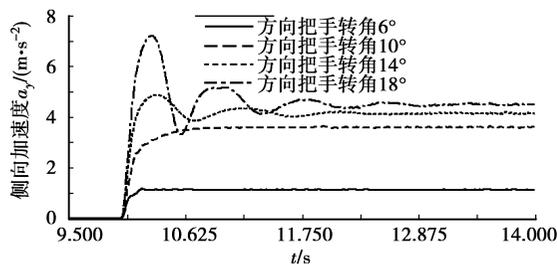


图 8 不同转角下的侧向角速度响应

2.3 单移线仿真分析

单移线试验是对超车动作的一种模拟,也是一种包括驾驶员特性在内的“闭环试验”,它在一定程度上表现出车辆转向运动的综合性能。为减小驾驶员的主观影响,学者们提出用单周期正弦输入来造成汽车行驶轨迹的平移,用来代替“移线”试验^[1]。驾驶员很难准确完成正弦输入,需借助机器人^[14-15],而仿真分析能够很好地完成这个试验。

分析时,全地形车的初始状态是匀速直线行驶,速度取最高车速的 70%,即为 56 km/h ,然后给方向把 1 个单周期正弦转角输入,周期为 3 s,最大转角为 6° 。研究表明,驾驶员主观评价与方向把与横摆角速度之间的时间滞后有最密切的关系,较小的时间滞后会得到驾驶员的好评。

全地形车在单周期正弦输入下的运动轨迹如图 9 所示,很好地表达了单移线试验。图 10、11 分别是方向把最大转角 8° 和 10° 时,方向把输入转角和横摆角速度的示意图。该全地形车时间滞后较短,但随方向把最大转角的增加而增加,说明方向把转角不宜过大。

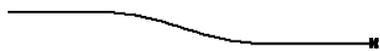


图 9 全地形车单移线时的轨迹

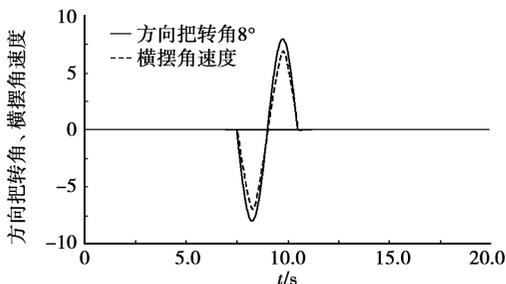


图 10 方向把转角 (8°) 和横摆角速度响应

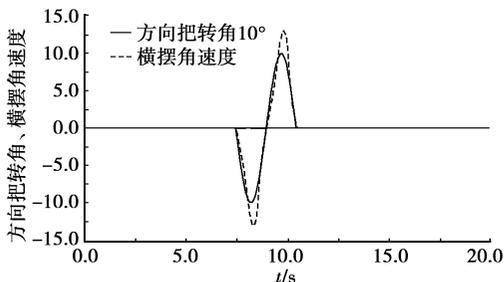


图 11 方向把转角 (10°) 和横摆角速度响应

3 驾驶员身体移动对操纵稳定性的影响

对于汽车操纵稳定性的讨论多集中在前后整车质心位置、前后轮胎的侧偏刚度、前后悬架的刚度、前悬架主销的定位参数、前悬架导向机构的几何参数等整车参数上。

对于全地形车而言,驾驶员的质量占了一部分比重,驾驶员身体的移动对全地形车姿态的控制也有很大作用,驾驶员的主观经验验证了这一点。因此下面探讨驾驶员身体的移动对全地形车稳态回转特性的影响。

转弯加速过程中驾驶员身体移动和身体相对车身不动所得的转弯半径比 R/R_0 变化曲线如图 12、

13 所示,其中实线为驾驶员身体不动的计算结果,虚线分别表示驾驶员身体向前移动 30 mm 和身体向内侧偏斜 60 mm 的计算结果,定性模拟驾驶员身体向前、向内偏斜对稳态回转特性的影响。

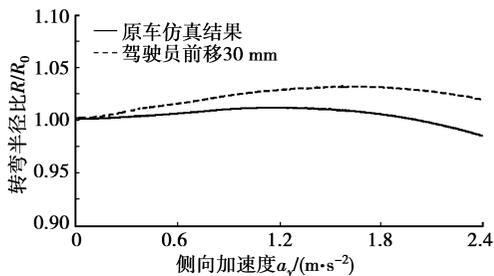


图 12 驾驶员身体移动前后转弯半径比 R/R_0

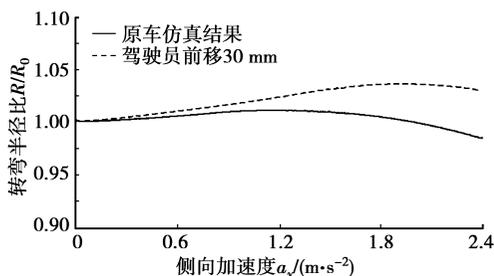


图 13 驾驶员偏斜前后转弯半径比 R/R_0

由仿真结果可以看出,驾驶员身体向前移动 30 mm,中性转向点侧向加速度的值由 1.319 m/s^2 增加到 1.645 m/s^2 ,驾驶员身体向内偏斜 60 mm 使得中性转向点侧向加速度值增加到 2.035 m/s^2 。

在给定侧向加速度的情况下,驾驶员身体移动使转弯半径比 R/R_0 比移动前大,且随侧向加速度增加这种差值也在增加。仿真结果说明驾驶员身体前移对整车质心布置影响大,一定侧向加速度范围内,驾驶员身体的侧倾可以减小后轴左、右车轮载荷的转移量,从而减小后轮侧偏刚度的损失,改善全地形车的稳态回转特性。

4 结论

文中建立全地形车的操纵动力学模型,进行虚拟试验,分析了驾驶员身体移动对操纵稳定性的影响。得到以下结论:

1) 全地形车在低侧向加速度时具有不足转向、中等侧向加速度时具有过多转向、高侧向加速度时又具有不足转向特性,这是由于全地形车采用单摇臂式后悬和后桥单轴驱动所造成的。

2) 角阶跃输入试验和单移线试验说明,不宜对方向把突然施加较大转角,56 km/h 车速下,不宜突

然施加大于 10° 的方向把转角。

3) 为安全驾驶, 该全地形车的侧向加速度应该控制在 1.319 m/s^2 内, 对技术熟练的驾驶员, 侧向加速度可以达到 4 m/s^2 左右。当全地形车转弯半径为 15 m 时, 车速达到 42 km/h 就会翻车。

4) 在转弯行驶过程中, 驾驶员身体的移动能明显的改善整车稳态回转特性, 与驾驶员的经验一致。

参考文献:

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [2] 徐延海, 宁凡坤. 用于汽车操纵稳定性模拟的虚拟现实平台的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 3984-3987.
XU YAN-HAI, NING FAN-KUN. Research on virtual reality system for simulation of vehicle handling and stability[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(17): 3984-3987.
- [3] 王国权, 王树凤, 李世雄, 等. 汽车操纵稳定性的虚拟试验技术[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(1): 172-176, 180.
WANG GUO-QUAN, WANG SHU-FENG, LI SHI-XIONG, et al. The virtual environment test technique on vehicle handling and stability [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(1): 172-176, 180.
- [4] 秦东晨, 潘筱, 赵红宇, 等. 面向 SUV 车型操纵稳定性的多体动力学建模与仿真[J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2126-2129, 2136.
QIN DONG-CHEN, PAN XIAO, ZHAO HONG-YU, et al. Multi-body dynamics modelling and simulation oriented to SUV vehicle handling stability[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2126-2129, 2136.
- [5] 褚志刚, 邓兆祥, 王攀, 等. 基于虚拟样机的汽车稳态转向特性改进研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 106-109.
CHU ZHI-GANG, DENG ZHAO-XIANG, WANG PAN, et al. Improvement of stable characteristic of vehicle based on virtual prototype [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 106-109.
- [6] FRANCESCO B, PAOLO P, EDOARDO S. Evaluation of human body dynamical behaviour during handling maneuvers and crash test simulations using multi-body codes[C] // Proceedings of 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [7] TAEHYUN S, PRADHEEP C V. Suspension design and dynamic analysis of a lightweight vehicle [J]. International Journal of Vehicle Design, 2007, 43(1-4): 258-280.
- [8] HUSSAIN K, STEIN W, DAY A J. Modelling commercial vehicle handling and rolling stability[J]. Professional Engineering Publishing, 2005, 219(4): 357-369.
- [9] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] SEONGHO K, PARVIZ E N, GWANGHUN G. A two-dimensional tire model on uneven roads for vehicle dynamic simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(10): 913-930.
- [11] BOZDOG D, OLSON W W. An advanced shell theory based tire model [J]. Tire Science and Technology, 2005, 33(4): 227-238.
- [12] LUTZ A RAUH J, REINALTER J. Developments in vehicle dynamics and the tire model performance test[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(suppl. 1): 7-19.
- [13] 长春汽车研究所, 清华大学. GB/T 6323-1994. 汽车操纵稳定性试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [14] ED RICHARDSON. Robot testers [J]. Automotive Industries, 2006, 186(7): 66.
- [15] 薛金林, 张为公, 龚宗洋. 汽车室内台架试验用驾驶机动车人[J]. 汽车工程, 2007, 29(10): 893-895.
XUE JIN-LIN, ZHANG WEI-GONG, GONG ZONG-YANG. Robot Driver for Indoor Test of Vehicles[J]. Automotive engineering, 2007, 29(10): 893-895.

(编辑 陈移峰)