

旅行车独特悬架系统的运动特性*

蒋国平¹ 周孔亢²

(1. 广东交通职业技术学院汽车学院 广州 510650;

2. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 利用 ADAMS 软件建立麦弗逊支撑杆摆臂式独立前悬架和带横置钢板弹簧独立后悬架系统的动力学仿真模型, 进行运动学仿真分析和试验研究, 得到随车轮跳动悬架各项定位参数的变化规律。前悬架车轮前束角的变化趋势和幅值不合理, 将增加汽车的过度转向趋势和加剧轮胎磨损。与传统建模方法相比, 刚柔耦合建模技术能有效提高带横置钢板弹簧的独立悬架系统的运动特性的仿真分析精度。

关键词: 旅行车 悬架 刚柔耦合 钢板弹簧 运动特性

中图分类号: U463.33

Kinematic Characteristic of Unique Suspension System for Wagon

JIANG Guoping¹ ZHOU Kongkang²

(1. College of Automobile Engineering, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650;

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: The multi-body kinematics model of the McPherson suspension and the rigid-flexible coupling model of suspension with leaf spring are established by using ADAMS/Car software. The simulation and test of suspension for wagon are carried out and analyzed. The change of each orientation parameter is obtained for the suspension with wheel jumpiness. The change of toe angle of front suspension is in disagreement, which will affect the stable steering characteristics and enhance wheel wear. Compared with traditional methods, the rigid-flexible coupling modeling technique can improve the simulating precision of kinematical moving characteristic of suspension with leaf spring.

Key words: Wagon Suspension Rigid-flexible coupling Leaf spring Kinematic characteristic

0 前言

西班牙西亚特(SEAT)公司的 Ibiza 轿车是一款具有独特悬架结构的旅行轿车, 前部为麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架, 后部为带有横置钢板弹簧的独立悬架。国内某汽车集团公司以 Ibiza 轿车为原型车, 开发适合我国国情的多用途系列旅行车, 样车试验过程中发现存在前轮异常磨损以及稳态转向特性中的过度转向问题, 悬架系统参数的合理匹配成为其改型设计的难点^[1]。

目前对汽车悬架系统动力学方面的研究已比较成熟^[2-5], 但麦弗逊支撑杆摆臂式独立前悬架和带横置钢板弹簧的独立后悬架系统, 在国内轿车中极为罕见, 其悬架运动特性的研究也还处于空白。

本文利用 ADAMS 建立旅行车独特悬架系统的动力学分析模型, 系统分析悬架系统的运动特性, 同时进行试验验证, 为悬架系统参数的合理匹配提供理论依据。

1 悬架系统模型及仿真分析

1.1 麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的模型

利用机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 中的 Car 专业模块, 建立麦弗逊悬架系统模型。图 1 为麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的模型。

试验样车的前悬架采用麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架, 可以抽象为 14 个独立刚体组成的系统: 即减振器、螺旋弹簧、转向横拉杆、转向节臂、摆臂、直拉杆和传动轴等零部件, 并对零部件之间的连接形式作了合理的抽象。转向支柱是最重要的构

* 南京汽车集团技术中心企业博士后资助项目(YJ200101)。20070814 收到初稿, 20071231 收到修改稿

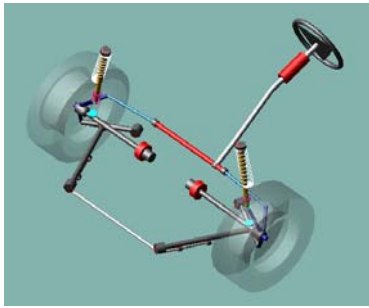


图 1 麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的模型

件, 它包括减振器下部的缸筒、转向节臂和轮胎支承部分等几个实际零件, 但由于零部件之间没有相对运动, 所以应作为一个刚体来处理。转向节臂通过球铰与转向横拉杆连接, 减振器缸筒与减振器活塞杆通过圆柱铰连接, 轮胎支承部分与驱动轮胎转动的花键轴通过转动副相接, 下端则通过一个近似理想球铰的线弹性衬套与下摆臂连接。

横向稳定杆的功用是增加前悬架的侧倾角刚度, 抑制汽车转向时车身的侧倾角。悬架模型选用 ADAMS/simple anti-roll bar system 模型来作为横向稳定杆简化数学模型, 该模型将横向稳定杆定义为用两个由扭转弹簧阻尼器元件连接的两个杆系组合体。

试验样车的转向系统采用齿轮齿条式转向器, 转向传动机构为断开式转向梯形, 所建立的试验样车转向系统模型, 将转向系零部件(转向盘、转向轴、转向传动轴、转向输出轴、转向齿条和转向横拉杆)简化为刚体模型, 将齿轮齿条式转向器的运动关系简化为运动定比耦合, 转向盘与转向轴间为固定铰, 转向轴与车身间为转动铰, 转向输出轴与车身之间为转动铰, 转向输出轴与转向齿条之间为复合铰链, 齿条通过万向节铰链与转向横拉杆连接。

合理选择轮胎数学模型对分析结果的精度起决定性的作用。采用被人们普遍认同的 Fiala 轮胎模型, 假设轮胎胎面只在接触区内产生横向变形, 将胎面看作是一个相当于受连续横向弹性支撑的弹性梁, 推导出了轮胎侧向力和回正力矩的量纲一的表达式。Fiala 轮胎模型的量纲一的表达式为

$$\begin{cases} \frac{p_y}{p_z \mu} = \phi - \frac{1}{3} \phi^2 + \frac{1}{27} \phi^3 \\ \frac{M_a}{p_z \mu L_r} = \frac{1}{6} \phi - \frac{1}{6} \phi^2 + \frac{1}{18} \phi^3 - \frac{1}{162} \phi^4 \end{cases}$$

式中 p_y —— 轮胎侧偏力

M_a —— 回正力矩

μ —— 附着系数

p_z —— 垂直载荷

L_r —— 轮胎印迹长度

ϕ —— 量纲一的侧偏角

1.2 带横置钢板弹簧独立悬架系统的模型

1.2.1 柔性体建模技术

在 ADAMS/car 中使用柔性部件必须首先安装 ADAMS/Flex 模块, 在 ADAMS/Flex 中, 物体的柔性特性是用物体的弹性模态来表示的。柔性体建模的基本思想是赋予柔性体一个模态集, 采用模态展开法, 用模态矢量和模态坐标的线性组合来表示弹性位移, 通过计算每一时刻物体的弹性位移来描述其变形运动。ADAMS/Flex 中的柔性体采用的模态中性文件可以直接利用有限元模态分析的结果来生成, 但更可行的方法是利用 ANSYS 等商品化有限元软件包进行分析后将结果转换成模态中性文件, 一旦创建了模态中性文件, 就可以将它输入到 ADAMS 中, 建立相应零件的柔性体。所谓模态中性文件(MNF)是一个独立于操作平台的二进制文件, 它包含下列信息: 几何信息(节点位置及其连接)、节点质量和惯量、模态、模态质量和模态刚度。在利用有限元模型来生成模态中性文件(MNF)的过程中要考虑一些问题, 其中最主要包括: 节点数、界面点、模态选择、单位和约束等。

1.2.2 钢板弹簧的模态中性文件

钢板弹簧是汽车悬架系统中常用的弹性元件, 同时又是传递纵向、侧向力的传力元件, 对其进行动力学建模时存在一定的难度, 以往在研究其动特性时一般是将其简化成一个普通的弹簧, 认为其变形与外力是线性关系, 通过分析钢板弹簧的结构及受载特点, 可以看出这样的简化是近似的、不精确的。利用 ANSYS 软件建立钢板弹簧的模型, 并通过 ANSYS 软件和 ADAMS 软件的接口功能, 在 ADAMS/car 中建立基于模态中性文件的钢板弹簧柔体模型, 这种柔体模型更能反映钢板弹簧的实际动力学特性, 能提高悬架运动特性的仿真分析精度。在模型中引入柔性体首先要在 ADAMS/car 中读入模态中性文件, 然后 ADAMS/car 会创建必要的几何实体用以显示柔性体。ADAMS/Flex 会将该几何体放在其局部物体坐标系原点与整体惯性坐标系原点相重合的位置上, 因此需要将它移到适当的位置, 然后在它与模型中其他零件之间施加约束, 或将模型中已有的该零件的刚体模型替换为柔性体模型, 并施加作用力。

1.2.3 刚柔耦合多体独立悬架系统的模型

利用机械系统动力学分析软件 ADAMS/car 建立包括钢板弹簧、减振器、摆臂等主要部件的独立悬架系统模型, 其中钢板弹簧作为柔性体处理, 摆臂作为刚体处理, 减振器简化为 ADAMS/damper

模型,悬架模型还详尽考虑了减振器橡胶衬套、橡胶副簧和钢板弹簧橡胶衬垫。图2为样车的刚柔耦合横置钢板弹簧悬架系统的模型。

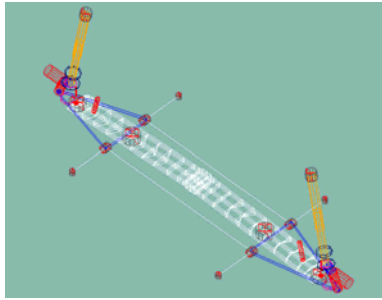


图2 刚柔耦合横置钢板弹簧悬架系统的模型

1.3 独立悬架系统运动特性的仿真分析

ADAMS/car 是机械系统动力学分析软件 ADAMS 软件包中的一个专业化模块,提供了强大的悬架系统仿真分析功能,后处理文件中所包括的曲线几乎涵盖了所有常用的悬架特性,可自动计算出多种悬架特性。利用 ADAMS/car 软件的悬架系统分析功能,对汽车悬架系统的运动特性进行研究,进行双轮同向跳动试验,得到车轮外倾角、主销后倾角、主销内倾角、车轮前束角和轮距等参数随车轮跳动量的变化特性曲线。

2 悬架系统的台架试验方案

为了能从试验角度分析试验样车悬架系统的运动学特性,按照试验样车悬架系统的空间布置,选用原装零部件,分别建立了试验样车的麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架和带横置钢板弹簧独立悬架系统的试验台。采用机械式千斤顶加导向支架的方式对车轮加载以模拟车轮的上下跳动,这样可以方便地控制车轮的跳动行程。在车轮上下运动的过程中,导向支架保证与车轮接触的平面的稳定性,从而避免了测量误差。另外,在导向支架的上平面设置了仅存在侧向运动的滑动机构,在滑动机构上设置了侧向滑动的锁止销,可以实现存在侧向力或消除侧向力的测试。为考察转向系统对车轮定位参数的影响,试验台同时安装了转向系统,同时在台架横梁上安装力传感器,测量车轮的垂直力。车轮定位参数变化的测量采用 GCD- I 型光束水准车轮定位仪与由倾角传感器、A/D 卡及计算机组成的测试系统相结合的方法进行^[6]。利用建立的悬架系统试验台进行悬架特性试验,在设计载荷条件下,锁定转向器,采用机械式千斤顶使车轮上下移动,来模拟车轮的跳动,并以设计载荷时车轮的位置为零点,每隔 20 mm 车轮行程记录车轮前束角、车轮外倾角、

主销后倾角、主销内倾角、轮距和轮胎垂直作用力的值。图3、4分别为麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架和带横置钢板弹簧独立悬架系统的试验台。



图3 麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的试验台



图4 带横置钢板弹簧独立悬架系统的试验台

3 麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的定位参数分析

车轮定位参数的变化特性,直接影响汽车稳态转向特性以及轮胎磨损,通过对麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架进行仿真和试验,得到了车轮外倾角、主销后倾角、主销内倾角和车轮前束角的随车轮跳动量的变化特性^[1]。

3.1 车轮外倾角的变化特性

车轮外倾角是车轮中心平面与地面垂线的夹角,当车轮顶端向车身外侧倾斜时取正值。通常认为外倾角应使车轮经常处于与地面垂直的状态。图5a为车轮外倾角与车轮跳动量的关系曲线。当车轮向上跳动时,车轮外倾角由正向负变化,变化趋势合理。车轮跳动量在 ± 50 mm行程内,车轮外倾角的总变化量在 2.0° 以内,车轮外倾角变化幅值比较合理。如车轮由下向上跳动时外倾角向负值方向变化过大,在汽车满载工况下可能出现车轮外倾角负值过大,导致轮胎磨损严重及产生热量过大,严重时会造成轮胎损坏。

3.2 主销后倾角的变化特性

在汽车纵向平面内,主销上部向后倾斜的角度称为主销后倾角,主销后倾角应保证有足够的侧向力回正力矩,以利于汽车直线行驶。一般主销后倾角越大,主销后倾拖距也越大,则回正力矩的力臂

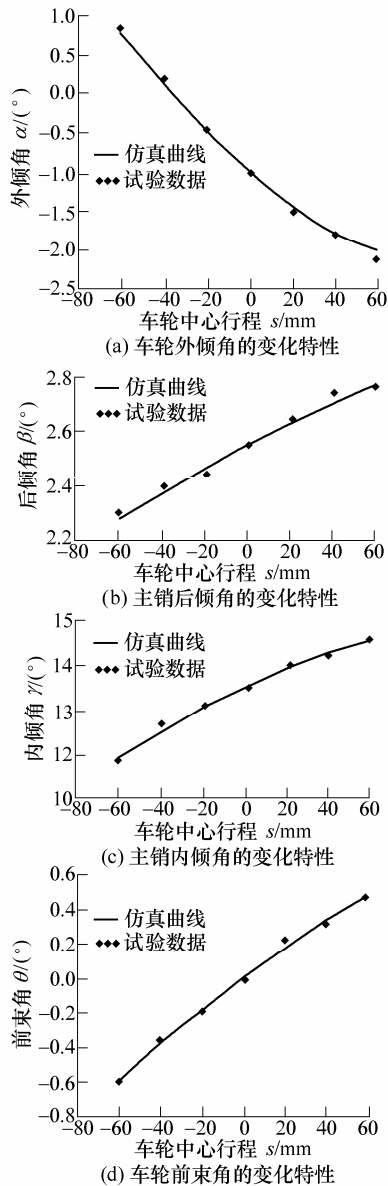


图 5 前悬架特性参数与车轮跳动量的关系曲线

越大,因此回正力矩也就越大,但是回正力矩不宜过大,否则在转向时为了克服此力矩,驾驶员必须在转向盘上施加较大的转向力。一般认为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 是主销后倾角合理的范围。图 5b 为主销后倾角与车轮跳动量的关系曲线。随着车轮向上跳动,主销后倾角逐步变大,这样的主销后倾角变化趋势可以在制动过程中,适当增加回正力矩,保持汽车的直线行驶能力。车轮跳动量在 ± 50 mm 行程内,主销后倾角的总变化量在 1.0° 以内,主销后倾角变化幅值合理。

3.3 主销内倾角的变化特性

在汽车横向平面内,主销上部向内倾斜的角度称为主销内倾角。主销内倾角也有使车轮自动回正的作用,它具有利用汽车本身的重力使车轮回复到原来中间位置的效应。主销内倾角与主销横向偏移距是相联系的,主销内倾有利于主销横向偏移距的减小,从而减少转向时驾驶员加在转向盘的力,使

转向操纵轻便,同时也可减少从转向轮传到转向盘上的冲击力。图 5c 为主销内倾角与车轮跳动量的关系曲线。随着车轮向上跳动,主销内倾角呈增长趋势,车轮跳动量在 ± 50 mm 行程内,主销内倾角的总变化量在 3.0° 以内,主销内倾角变化趋势和变化幅值都比较合理。

3.4 车轮前束角的变化特性

车轮前束角是汽车纵向中心平面与车轮中心平面和地面的交线之间的夹角。图 5d 为车轮前束角与车轮跳动量的关系曲线。随着车轮向上跳动,前束角呈增长趋势,变化趋势不合理,这将增加汽车的过度转向趋势。合理确定前束角随车轮跳动量的变化规律,可获得希望的不足转向特性,如果前桥车轮上跳时,前束向负角度方向变化,前桥车轮下跳时,前束向正角度方向变化,可使汽车在曲线行驶时增加不足转向的趋势。车轮跳动量在 ± 50 mm 行程内,车轮前束角的总变化量为 0.87° ,绝对变化量偏大。车轮跳动过程中过大的前束角变化会因轮胎的侧偏使其磨损加剧、滚动阻力增大以及直线行驶能力下降。

4 带横置钢板弹簧独立悬架的特性参数分析

横置钢板弹簧的独立悬架系统是一种独特的悬架系统,通过对独立悬架系统进行仿真和试验,得到了车轮外倾角、轮距和悬架刚度随车轮跳动量的变化特性^[1]。

4.1 车轮外倾角的变化特性

外倾角的变化趋势和变化量对保持轮胎的侧向附着力和提高操纵稳定性具有重要意义。图 6a 为车轮外倾角与车轮跳动量的关系曲线。当车轮向上跳动时,车轮外倾角由正向负变化,变化趋势合理。外倾角的变化趋势对保持轮胎的侧向附着力具有重要意义,合理选择悬架的设计参数,使得车轮由下向上跳动时外倾角向减小的方向变化,以确保汽车曲线行驶过程中车身侧倾时,外侧车轮接近垂直地面状态,提高轮胎的侧偏特性。车轮跳动量在 ± 50 mm 行程内,车轮外倾角的总变化量为 3.1° ,车轮外倾角变化幅值偏大,可能会加剧轮胎磨损。

4.2 轮距的变化特性

轮距的变化应控制在一定范围之内,一般要求车轮跳动 ± 50 mm 时,轮距变化为 $-10 \sim 10$ mm。图 6b 为轮距与车轮跳动量的关系曲线。综合分析图 6b 可以看出:车轮向下跳动的过程中,轮距减小;车轮向上跳动的过程中,轮距先变大,然后减小,且下跳阶段的变化量要大于上跳阶段的变化量,当车

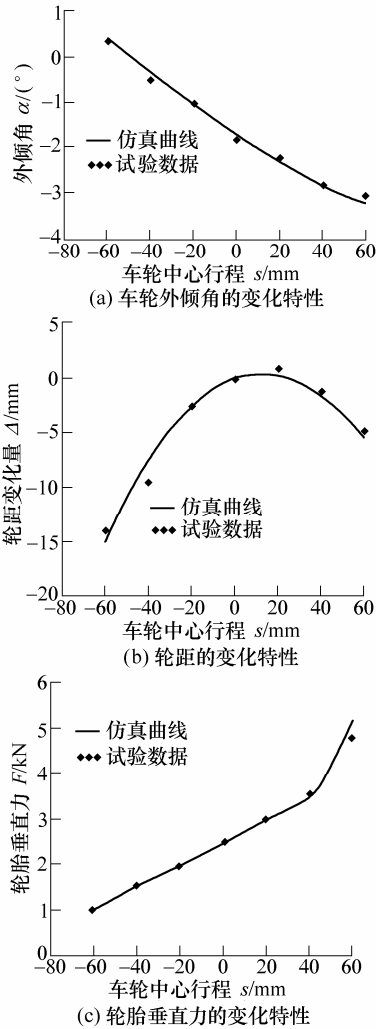


图 6 后悬架特性参数与车轮跳动量的关系曲线

轮下跳 50 mm 和上跳 50 mm 时，轮距的减少量分别为 11 mm 和 3 mm。轮距的变化趋势和变化幅值比较合理。

4.3 悬架刚度的变化特性

悬架的刚度对汽车行驶平顺性和操纵稳定性有着及其重要的影响，独立悬架系统中，导向元件与弹性元件一般相对独立，此时悬架刚度不是弹性元件，而是一种等效的综合刚度。试验样车悬架采用的是单横摆臂独立悬架，弹性元件为横置钢板弹簧和橡胶副簧的组合模式。图 6c 轮胎垂直作用力与车轮跳动量的关系曲线。车轮跳动行程在 ± 50 mm 以内时，随着车轮上跳，悬架理论(仿真)刚度和悬架试验刚度略有变大趋势，当车轮跳动行程大于 50 mm，悬架刚度明显变大，此时悬架刚度由横置钢板弹簧和橡胶副簧共同提供，而橡胶副簧的刚度特性是非线性，因此悬架刚度的非线性特性非常明显。

5 结论

(1) 将麦弗逊独立悬架和转向机构作为一个整

体，综合运用理论建模仿真分析和试验研究的方法，对麦弗逊支撑杆摆臂式独立悬架的运动特性进行系统研究。研究表明：车轮前束角的变化特性不合理，随着车轮向上跳动，前束角呈增长趋势，这将增加汽车的过度转向趋势，同时在车轮常见的跳动量范围内车轮前束角的绝对变化量值偏大，会加剧轮胎磨损。

(2) 在建立钢板弹簧柔性体模型的基础上，详尽考虑减振器橡胶衬套、橡胶副簧和钢板弹簧橡胶衬垫等非线性影响因素，建立了刚柔耦合多体独立悬架系统的模型。试验和仿真结果表明，刚柔耦合建模技术在带横置钢板弹簧独立悬架中的应用是成功的，能提高悬架运动特性的仿真分析精度。

参 考 文 献

- [1] 蒋国平. 汽车操纵稳定性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2003. JIANG Guoping. Research on controllability and stability base on Unique car[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2003.
- [2] 丁华. 麦弗逊悬架系统性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2001. DING Hua. Study on characteristic of Mcpherson suspension [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2001.
- [3] 夏长高. 麦弗逊式独立悬架运动特性[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 1-4. XIA Changgao. Study on characteristic of Mcpherson front suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 1-4.
- [4] 宋传学, 蔡章林. 基于 ADAMS/car 的双横臂独立悬架建模与仿真[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(4): 554-558. SONG Chuanxue, CAI Zhanglin. Modeling and simulation of double wishbone suspension based on ADAMS/car[J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(4): 554-558.
- [5] 陆丹, 汤靖, 王国林. 基于 ADAMS 的麦弗逊前悬架优化设计[J]. 中国制造信息化, 2004, 33(8): 106-108. LU Dan, TANG Jing, WANG Guolin. The optimization of Macpherson suspension based on ADAMS[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2004, 33(8): 106-108.
- [6] 王国林, 蒋国平, 李守成. 车轮跳动对定位参数影响的试验分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 29-31. WANG Guolin, JIANG Guoping, LI Shoucheng. Experimental analysis on influence of wheel jouncing on alignment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 29-31.

作者简介: 蒋国平, 男, 1973 年出生, 博士后, 副教授。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: jiangguoping@china.com