

文章编号:1671-6833(2010)04-0073-04

## 基于刚柔耦合的空气悬架建模、仿真与优化研究

秦东晨, 李浩亮

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 基于多体动力学理论, 运用机械系统分析软件 ADAMS 中的 Car 专业模块, 建立了宇通大客车的空气弹簧前悬架的多刚体模型. 利用 ADAMS/AutoFlex, 对其上下摆臂进行了柔化, 建立了该悬架的刚柔耦合模型. 利用虚拟仿真试验对悬架进行了仿真分析, 得出了模型的正确性, 并比较悬架定位参数的变化, 使刚柔耦合模型更趋于合理化. 利用 ADAMS/Insight 模块对在 Car 模块中建立的悬架系统进行了优化设计, 得到了空气悬架定位参数的优化解.

**关键词:** 空气悬架; 刚柔耦合; ADAMS/Insight; ADAMS/Car

**中图分类号:** U461 **文献标识码:** A

### 0 引言

空气悬架系统以空气弹簧为弹性原件, 利用气体的可压缩性实现弹性作用<sup>[1]</sup>, 其作为汽车的重要组成部分, 把车架和车轴弹性地连接起来, 主要功能是传递作用在车轮和车架之间各个方向的力和力矩, 并且缓和由不平路面传给车身的冲击载荷, 削弱由此引起的承载系统振动. 因此, 运动特性的优劣关系到汽车的平顺性、操作稳定性、转向轻便性和轮胎的使用寿命等诸多方面. 随着汽车设计的发展, 在车辆动力学研究中, 悬架构件的柔性变形不应被忽略, 构件作为刚体的传统处理方法已经不能满足设计研究的需要了<sup>[2]</sup>. 因此, 笔者基于 ADAMS/Car 模块对某客车的空气弹簧双横臂独立悬架建立了多刚体模型和刚柔耦合模型, 并对仿真结果进行比较分析. 最后利用 ADAMS/Insight 模块, 对刚柔耦合模型进行优化设计, 得到更理想的优化解.

### 1 利用 ADAMS/Car 建立空气悬架运动学模型

#### 1.1 空气悬架分析

双横臂独立悬架是有多节点联结的 RSSR 结构<sup>[3]</sup>, 笔者分析的宇通 ZK6120HB 大客车空气弹簧独立悬架, 其包括前悬架的上下摆臂是呈三角形, 转向节臂, 阻尼器, 空气弹簧. 空气悬架系统中各关键点的坐标由设计图纸查得, 阻尼器采用德国 ZF SACHS 的 NV36X230HA, 空气弹簧采用德国 Luftfeder 661N 型, 如表 1 所示.

#### 1.2 空气悬架多刚体运动学模型<sup>[4,5]</sup>

在 ADAMS/Car 模块中通过查得的硬点, 建立多刚体模型, 其模型是建立在以下假设的基础上: 所有零部件都认为是刚体; 各运动副均认为是刚性连接; 各运动副内摩擦力、内部间隙忽略不计. 把这些硬点输入到 ADAMS/Car 模块中, 建立结构件. 阻尼器参数建立 DPR 文件. 空气弹簧参数, 通过编辑生成 XML 文件.

表 1 客车关键参数

Tab. 1 Coach key parameters

整车质量	车轮质量	前悬架弹簧	轴距	轮距	设计装载	前轮前	前轮外	主销后	主销内
/kg	/kg	刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	/mm	/mm	质量/kg	束角/(°)	倾角/(°)	倾角/(°)	倾角/(°)
13 300	107.5	1 300	6 250	2 064	4 290	1	-1.5	2	9

收稿日期:2010-04-03; 修订日期:2010-05-16

作者简介:秦东晨(1965-),男,河南温县人,郑州大学教授,博士,主要从事机械强度及结构优化设计、虚拟样机、CAD/CAE/CAM 集成等研究.

### 1.3 空气悬架刚柔耦合运动学模型

在实际中,由于作用在车轮上各方向的力和力矩是经过空气悬架各弹性元件和上下摆臂等传递到车架上的,在这些力和力矩的作用下,空气悬架构件将发生变形<sup>[6]</sup>.因此,多刚体运动学模型就满足不了要求,必须对一些构件柔性化,使分析结果更能接近实际情况.笔者利用 ADAMS/AutoFlex 建立刚柔耦合模型,ADAMS/AutoFlex 建立柔性体有:拉伸法建柔性体、用构件的几何外形来生成柔性体和导入有限元模型的网格文件创建柔性体.笔者利用构件的几何外形来生成柔性体,使空气悬架的上摆臂、下摆臂分别柔性化,这样就产生了一个简单的刚柔耦合模型.其中合理地选取网格尺寸、形状、模态阶数对仿真结果也有一定的影响,因此要求结合一定的有限元知识.另外在进行空气悬架系统运动学仿真时,应考虑各个运动副之间的弹性连接<sup>[7]</sup>.模型如图1所示.

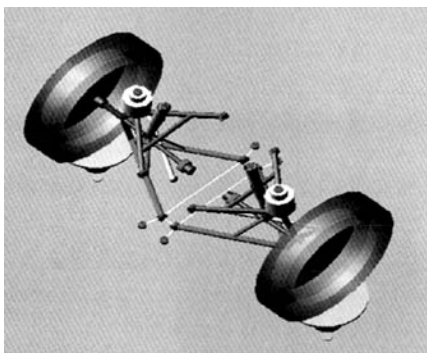


图1 空气弹簧双横臂式独立悬架

Fig.1 Air spring double wishbone - type independent suspension

影响悬架的另一个重要参数就是轮胎,ADAMS/Tire 模块提供了许多种轮胎模型,有 Fiala 轮胎模型、UA Tire 轮胎模型等<sup>[8]</sup>.笔者选用的 Fiala 轮胎模型,根据厂家提供的相关参数建立轮胎模型.定义各构件的相对运动关系及其零部件的拓扑结构.确定主销轴线,输入车轮的前束角和外倾角,建立该模型与试验台架之间的数据交换.

## 2 空气悬架运动学性能仿真与分析

悬架的运动学分析首先反应在车轮定位参数的变化上.选择标准的悬架轮胎典型工况—车轮激振分析(Wheel Travel Analysis),令双轮同向激振,车轮中心在 $z$ 轴上下跳动的范围为 $\pm 50$  mm.可以得到车轮前轮外倾角、前轮前束角、主销内倾

角和主销后倾角等.

### 2.1 前轮前束角随车轮跳动量变化特性

由于前轮外倾角的影响和路面阻力的作用,为了减小外倾角带来的不利影响,减小轮胎的磨损,增加了车轮前束.在车轮设计中,车轮跳动过程中,应该尽可能使前束保持不变或者变化很小.图2为仿真得到的前轮前束角随车轮跳动量变化的特性曲线,可以看出,在车轮跳动量为 $\pm 50$  mm的行程内,前轮前束角的多刚体模型值为 $(0.739\ 2^\circ, 0.839\ 2^\circ)$ ,刚柔耦合模型值为 $(1.039\ 2^\circ, 1.119\ 7^\circ)$ .

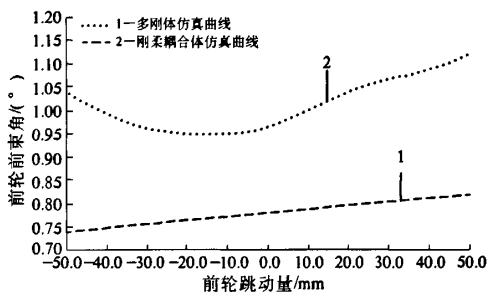


图2 前轮前束角变化曲线

Fig.2 Toe angle variation curve

在多刚体仿真中,前束角在车轮每跳动10 mm时的平均变化值为 $0.01^\circ$ ;而在刚柔耦合仿真中,前束角在车轮每跳动10 mm的平均变化值为 $0.008\ 05^\circ$ ,比多刚体变化值少 $0.001\ 95^\circ$ ,并且设计图纸给出的前轮前束角是 $1.0^\circ$ ,在车轮无跳动时多刚体的是 $0.778^\circ$ ,而刚柔耦合的是 $0.965^\circ$ ,精度比多刚体的更高.

### 2.2 前轮外倾角随车轮跳动量变化特性

前轮外倾角是指从汽车的前面看车轮偏离铅垂线,在设计时前轮通常会具有一定的外倾角,以使汽车行驶的过程中车轮尽可能垂直于路面.当做汽车设计时一般使车轮向上跳时外倾角向负值变化,而下落时向正值变化.图3为仿真得到的前轮外倾角随车轮跳动量变化的特性曲线,可以看出,在车轮跳动量为 $\pm 50$  mm的行程内,前轮外倾角的多刚体模型值为 $(-2.221\ 3^\circ, -1.585\ 1^\circ)$ ,刚柔耦合模型值为 $(-2.657\ 4^\circ, -2.094\ 6^\circ)$ .在多刚体仿真中,外倾角在车轮每跳动10 mm时的平均变化值为 $0.063\ 62^\circ$ ;而在刚柔耦合仿真中外倾角在车轮每跳动10 mm的平均变化值为 $0.056\ 28^\circ$ ,比多刚体少 $0.007\ 34^\circ$ ,刚柔耦合模型精度更高.

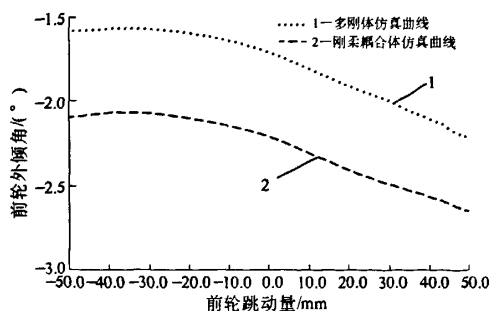


图3 前轮外倾角变化曲线

Fig.3 The front wheel camber variation curve

### 2.3 主销后倾角随车轮跳动量变化特性

主销后倾角影响汽车直线行驶的稳定性和转向轮的回正功能。一般不希望后倾角在车轮上、下运动过程中出现大的变化,以免当载荷变化时出现回正力矩过大或过小的现象,使操纵性能恶化。一般要求后倾角具有随车轮上跳而增加的趋势,这样可以抵消制动“点头”时后倾角减小的趋势。图4为仿真得到的主销后倾角随车轮跳动量变化的特性曲线,可以看出,在车轮跳动量 $\pm 50$  mm的行程内,主销后倾角的多刚体模型值为 $(1.7915^\circ, 1.8239^\circ)$ ,刚柔耦合模型值为 $(1.8833^\circ, 2.2071^\circ)$ 。在多刚体仿真中,后倾角在车轮每跳动10 mm时的平均变化值为 $0.01324^\circ$ ;而在刚柔耦合仿真中后倾角在车轮每跳动10 mm的平均变化值为 $0.03238^\circ$ ,变化量都非常小,并且设计图纸给出的设计量为 $(1.5 \sim 2.5)^\circ$ ,完全符合设计要求。

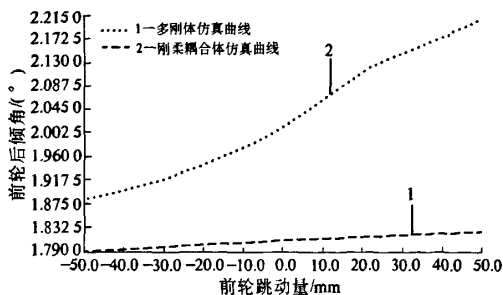


图4 主销后倾角变化曲线

Fig.4 Caster variation curve

### 2.4 主销内倾角随车轮跳动量变化特性

主销内倾角是悬架的一个重要定位参数,主要通过回正力矩来对操纵稳定性进行影响。根据汽车设计的要求,在车轮跳动过程中主销的倾角不能发生显著变化,因为显著而急剧的倾角变化

将破坏汽车的平顺性。图5为仿真得到的主销内倾角随车轮跳动量变化的特性曲线,可以看出,在车轮跳动量为 $\pm 50$  mm的行程内,主销内倾角的多刚体模型值为 $(8.6887^\circ, 9.2862^\circ)$ ,刚柔耦合模型值为 $(9.1887^\circ, 9.7562^\circ)$ 。在多刚体仿真中,内倾角在车轮每跳动10 mm时的平均变化值为 $0.05975^\circ$ ;而在刚柔耦合仿真中内倾角在车轮每跳动10 mm的平均变化值为 $0.05675^\circ$ ,比多刚体变化值少 $0.003^\circ$ ,精度更高。

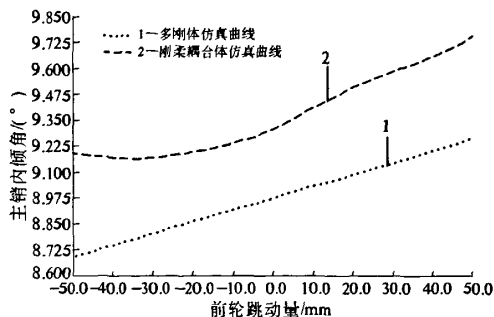


图5 主销内倾角变化曲线

Fig.5 Kingpin inclination angle variation curve

## 3 空气悬架性能参数的优化

### 3.1 悬架性能优化研究

根据汽车设计的要求,车轮定位参数的变化量不能太大,为了分析悬架参数对车轮定位参数的影响,很有必要对车轮定位参数进行优化。笔者利用ADAMS/Insight模块,对车轮定位参数中的多个参数进行优化,使各参数达到理想值。通过对模型中多个关键硬点为设计变量,并且设定约束条件进行优化以达到优化定位参数的目的。在Insight模块中,对前悬架的上、下横臂的内点、外点的8个点的24个坐标值为设计变量,设定每个坐标值的变动范围为每个坐标值的1%。对于24个坐标值的分析,Insight将进行224次迭代结算,计算量非常庞大,所以只进行了128次迭代。并且以主销内倾角、主销后倾角等为约束条件进行优化,得到前轮外倾角、前轮前束角的最优解,更接近于设计量。

### 3.2 优化结果分析

#### 3.2.1 前轮前束角

优化后前轮前束角的变化值为 $(1.1197^\circ, 1.1392^\circ)$ ,前束角在车轮每跳动10 mm时的平均变化值为 $0.00195^\circ$ ,比刚柔耦合模型减小了

0.006 $^{\circ}$ . 设计图纸给出的前轮前束角设计量为 $1.0^{\circ}$ , 而优化后得到的为 $1.017^{\circ}$ , 更接近于设计量. 而且与前轮外倾角符号相反, 使前轮前束与前轮外倾协调作用, 保证前轮在汽车行驶过程中滚动而无滑动.

### 3.2.2 前轮外倾角

为防止车轮出现过大的不足转向或过度转向趋势, 优化后前轮外倾角的变化值为( $-2.758^{\circ}$ ,  $-2.2^{\circ}$ ), 外倾角在车轮每跳动 10 mm 时的平均变化值为 $0.055^{\circ}$ , 比刚柔耦合模型减小了 $0.004^{\circ}$ . 保证前轮在汽车行驶过程中滚动而无滑动.

## 4 结论

笔者运用 ADAMS/Car, 建立了空气悬架的多刚体模型和刚柔耦合模型, 分析了空气悬架的定位参数随车轮跳动的变化趋势, 使仿真结果更加接近于实际值. 运用 ADAMS/Insight 模块, 对空气悬架关键点的几何位置进行了优化分析, 使空气悬架的定位参数达到了比较理性的设计参数, 改善了该车的定位参数和操稳性.

## 参考文献:

- [1] 钱德猛. 汽车空气悬架系统的参数化建模、分析及设计理论和方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 2005. 4-5.
- [2] 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. 102-105.
- [3] OLLEY M. Suspension and handling[J]. Engineering Report: General Motors Corp, 1987.
- [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.
- [5] 岑少起, 潘筱, 秦东晨. ADAMS 在汽车操纵稳定性仿真中的应用研究. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(3): 55-58.
- [6] 蔡颖超. 客车空气悬架系统集成及行驶平顺性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2007.
- [7] 石傅强. ADAMS 基础与工程范例教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [8] 杨柳青, 汪文龙, 李明红, 等. 基于 ADAMS 的悬架多柔体动力学仿真[J]. 拖拉机与农用运输车, 2006, 33(2): 47-49.

## Research for Modeling, Simulation and Optimization of Air Suspension Based on Rigid-flexible Coupling

QIN Dong-chen, LI Hao-liang

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** On the basis of the multi-body dynamics theory, the professional ADAMS/Car module of mechanical system analysis software ADAMS is applied to establish the multi-rigid-body model of air front suspension in a Yutong bus. Using the ADAMS/AutoFlex, the up and down cantilever are made flexible to set up the rigid-flexible coupling model. The suspension simulation analysis is carried and the model is correct by the virtual simulation test. The changes of the suspension parameters are compared and the rigid-flexible coupling model is reasonable. We use the ADAMS/Insight module to optimize the suspension system. The optimal positioning parameters of the air suspension are obtained.

**Key words:** air suspension; rigid-flexible coupling; ADAMS/Insight; ADAMS/Car