

# 基于虚拟样机技术的汽车前悬架优化

陆森林, 许静超

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 运用 Adams/View 建立了某乘用车双横臂扭杆弹簧独立悬架动力学模型, 并对悬架运动学特性进行跳动仿真, 发现了前轮前束角以及主销内倾角偏大的问题. 由于悬架系统结构复杂, 优化参数过多, 涉及到多目标优化, 一般的优化方法很难达到好的优化效果. 结合多体动力学软件 Adams/View 与优化模块 Adams/Insight, 通过研究悬架部分点坐标对目标函数各悬架定位参数的影响程度, 得到设计变量的灵敏度. 根据灵敏度合理选择修改设计变量并对这些设计变量进行优化, 最终使得目标函数同时达到目标值, 车辆运动学性能得到改善.

**关键词:** Adams/View; Adams/Insight; 悬架; 仿真; 优化

**中图分类号:** U463 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.029

## 0 引言

悬架是汽车的重要组成部分, 悬架的结构形式和性能参数选择合理与否, 直接关系汽车行驶平顺性和操纵稳定性. 目前, 该课题分为两部分: 一是研究在路面的激励下, 影响汽车平顺性的弹性元件和阻尼元件的力学特性, 称之为悬架系统动力学研究; 另一方面是研究在车轮与车身发生相对运动时, 悬架导向机构对车轮运动的约束和引导作用以及车轮定位等悬架参数的运动学特性, 这是对汽车操纵稳定产生影响的悬架特性研究领域, 其参数指标主要指反应车轮定位的参数<sup>[1-4]</sup>. 笔者分析了双横臂独立悬架定位参数随车轮跳动量变化时对参数进行优化, 通过修改悬架部分硬点坐标以减小参数变动范围提高车辆操纵稳定性, 能够有效地缩短汽车的研发周期, 大大降低新产品的研发成本, 对提高产品的设计和制造具有重要意义.

## 1 双横臂扭杆弹簧悬架动力学模型的建立与仿真

### 1.1 Adams/View 与 Adams/Insight 的介绍

ADAMS 即机械系统动力学自动分析系统 (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Sys-

tems), 该软件是美国 MDI (Mechanical Dynamics Inc.) 公司开发的虚拟样机分析软件. 目前, 全世界各行各业的主要制造商都已经采用 ADAMS. 它的交互式图形环境, 零件库、约束库以及力库可以使用户方便快速地创建完全参数化的虚拟机械系统几何模型, 支持并行仿真环境, 节省大量的建模时间和成本. MSC 的 ADAMS/Insight 实验优化设计软件, 不仅用于对参数化虚拟样机的设计实验, 还可以用于对仿真实验结果的统计分析. 使用此模块和 ADAMS 其他产品联合工作, 不但能够方便快捷地了解实验参数对虚拟样机性能的影响, 还可以了解到样机中各个参数之间的相互影响关系.

### 1.2 前悬模型建立

某型号乘用车采用双横臂扭杆式独立悬架, 由摆臂、减震器、扭杆、转向横拉杆、转向纵拉臂、转向节、车轮、主销等组成, 充分考虑现有条件下所能得到的模型所需参数, 不必过分追求模型的复杂程度. 根据厂商公布及实测尺寸、性能参数及设计点坐标参数数据, 在 Adams/View 中建立前悬动力学模型, 并与测试平台装配, 模型如图 1 所示.

机械系统自由度  $DOF$  计算公式<sup>[5]</sup>

$$DOF = 6n - \sum_{i=1}^m p_i - \sum R_k,$$

收稿日期: 2013-12-03; 修订日期: 2014-02-01

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2009212)

作者简介: 陆森林 (1957-), 男, 江苏江阴人, 江苏大学教授, 工学博士, 主要研究方向为车辆动态特性和车辆振动噪声的控制, E-mail: lusl@ujs.edu.cn.

式中: $n$  表示活动构件总数; $p_i$  为第  $i$  个运动副约束自由度数; $m$  为运动副总数; $R_k$  为其它约束条件. 由于前悬左右完全对称,故取其左前 1/2 悬架模型进行计算:8 个活动部件,3 个旋转副,4 个球副,1 个固定副,1 个点面约束副,2 个移动约束副. 自由度计算  $DOF = 6 \times 8 - 5 \times 3 - 3 \times 4 - 6 \times 1 - 1 \times 3 - 2 \times 5 = 2$ ,即 1/2 悬架模型有 2 个自由度,分别是车轮绕主销的转动和车轮的上下跳动.

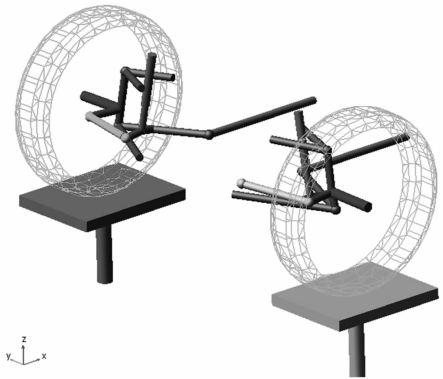


图 1 Adams/View 下建立的前悬模型  
Fig.1 Kinetic model of front suspension

1.3 前悬性能仿真及分析

在 Adams 环境中对激振台施加 50 mm 振幅正弦激励对车轮进行同向跳动仿真<sup>[6]</sup>. 在后处理模块得到悬架定位参数车轮外倾角、前轮前束、主销内倾角、主销后倾角及车轮侧向滑移随车轮上下跳动时的变化特性仿真曲线,如图 2~6 所示.

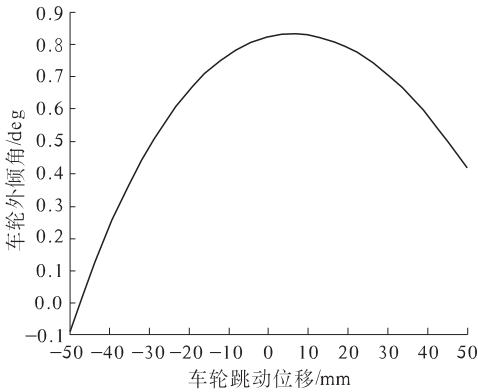


图 2 车轮外倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.2 Curve of comber angle vs wheel travel

车轮外倾角是指车轮中心平面和道路平面垂直线之间的夹角,是汽车操纵稳定性的一个重要参数. 安装车轮时预先使车轮有一定的外倾角,外倾角不宜过大以免产生偏磨. 一般希望外倾角变化范围在  $1^\circ$  左右. 由图 2 知前轮外倾角变化范围为  $-0.1^\circ \sim 0.8^\circ$ ,变化量  $0.9^\circ$ ,符合要求.

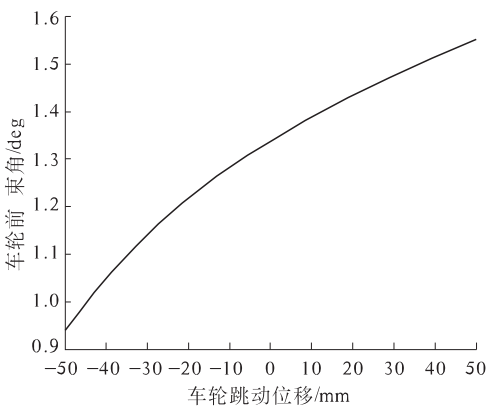


图 3 车轮前束角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.3 Curve of the angle vs. wheel travel

前轮前束角是指汽车纵向平面与车轮中心平面和地面的交线之间的夹角. 车轮上跳及下落时前束变化对车辆直行稳定性、稳态响应有很大影响. 车轮前束还可以弥补外倾角所带来的不利影响,减少轮胎磨损. 所以前束角的设计原则是车轮跳动时,其变化范围越小越好. 从图 3 可知,前束角变化范围为  $0.9^\circ \sim 1.6^\circ$ ,变化量  $0.7^\circ$ ,变化范围偏大,需进行优化.

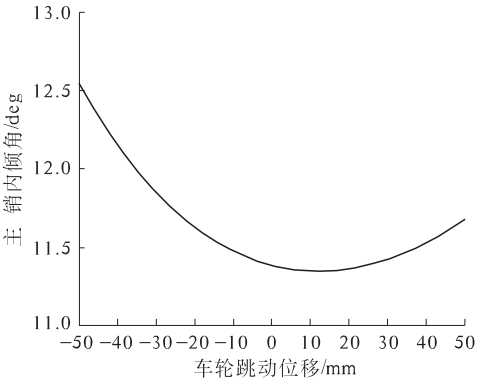


图 4 主销内倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.4 Curve of kingpin inclination vs. wheel travel

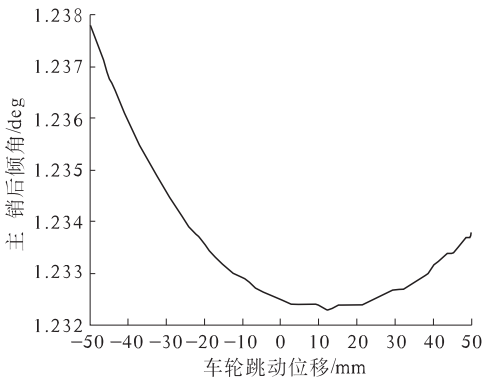


图 5 主销后倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.5 Curve of caster angle vs. wheel travel

主销内倾角是指汽车横向平面内主销轴线与地面垂线之间的夹角. 内倾角有使车轮自动回正的作用, 还有利于转向轻便. 一般认为主销内倾角变化范围在  $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$  内, 希望取较小值, 从图 4 看出本仿真用车主销内倾角变化范围为  $11.3^{\circ} \sim 12.5^{\circ}$ , 内倾角过大, 需进行优化.

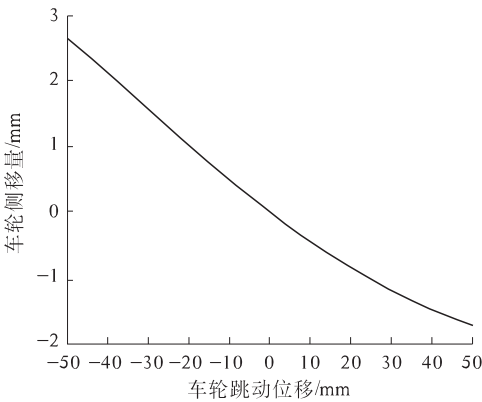


图 6 车轮侧移量随车轮跳动的关系曲线  
Fig. 6 Sideway Displacement vs. Wheel Travel

主销后倾角是指在汽车纵向平面内, 主销轴线与地面垂线之间的夹角. 实践表明主销后倾角过大将会导致汽车在行驶中高速稳定性降低, 主销后倾角一般为  $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ . 由图 5 可知仿真用车主销后倾角变化范围为  $1.233^{\circ} \sim 1.238^{\circ}$ , 符合设计要求.

车轮跳动时, 左右轮距的变化对汽车的操纵稳定性影响很大, 并且会导致轮胎磨损, 减少使用寿命. 因此, 设计时尽量减少轮距的变化量, 图 6 中车轮侧移量变化范围为  $-2 \sim 2.5$  mm, 变化量为 4.5 mm.

2 悬架定位参数优化设计

2.1 设计变量与目标函数确定

由之前分析知车轮前束变化范围过大、主销内倾角过大需进行优化, 前轮外倾角、主销后倾角符合设计值, 车轮侧移量可以进一步减小. 由于车轮各定位参数的相关性, 如果使用传统方法对悬架设计点位置进行改动既耗时又费力, 难以满足各种要求. 笔者通过使用 Adams/View 和 Adams/Insight 进行联合仿真, 可以对复杂机构实现多目标同时优化, 极大减轻了设计人员的工作量<sup>[7-8]</sup>.

在 Insight 模块中, 选取下横臂外端点 (lca\_outer)、上横臂外端点 (uca\_outer)、拉臂外端点 (rod\_outer)、拉臂内端点 (rod\_inner) 4 个对悬架其它零件影响较小的点, 以这 4 个点 3 个轴向坐

标 12 个变量为设计变量, 变化范围设为 mm, 以上五组定位参数最小值为目标函数进行多目标优化设计方法进行性能优化.

2.2 优化求解

对上述 5 个目标函数进行灵敏度分析找出对前轮前束、主销内倾角影响最大的设计变量如图 7、图 8 所示.

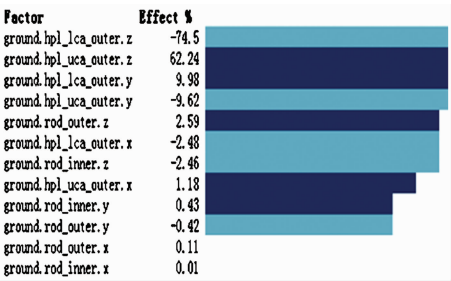


图 7 设计变量对前轮前束的影响程度  
Fig. 7 Incidence of design variable on toe angle

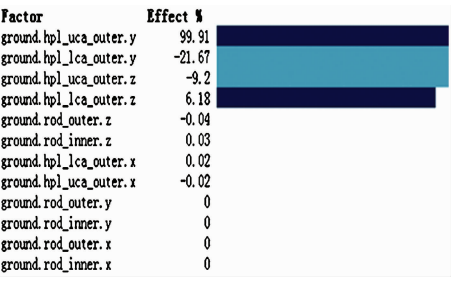


图 8 设计变量对主销内倾角的影响程度  
Fig. 8 Incidence of design variable on kingpin inclination

在尽量满足和减少设计量的变化对悬架其他性能的影响下, 针对前轮前束以及主销内倾角影响最大下横臂外端点 z 坐标值以及上横臂外端点 y 坐标值进行优化. 实验策略采用响应曲面法 (DOE Response Surface), 并利用二次型拟合参数与优化函数间的关系<sup>[9]</sup>. 由于采用全因子设计法, Insight 将进行  $2^2$  迭代. 表 1 为优化前后设计变量坐标值.

表 1 优化前、后设计点坐标值  
Tab. 1 The coordinate value of design variable before and after optimization

坐标值	优化前	优化后
lca_outer_z	-94	-99
uca_outer_y	-598	-562

2.3 优化结果分析

前悬定位参数优化前后对比结果如图 9 ~ 13 所示, 实线为优化前特性曲线, 标记点曲线为优化后特性曲线.

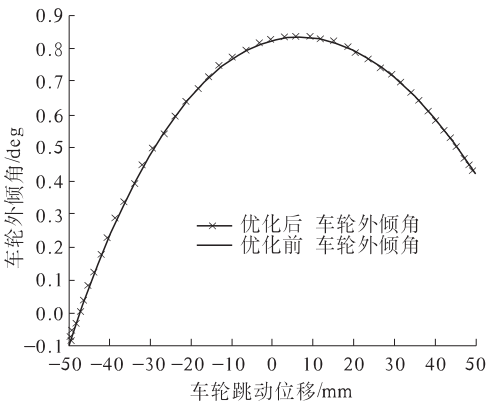


图 9 车轮外倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.9 Camber Angle vs. Wheel Travel

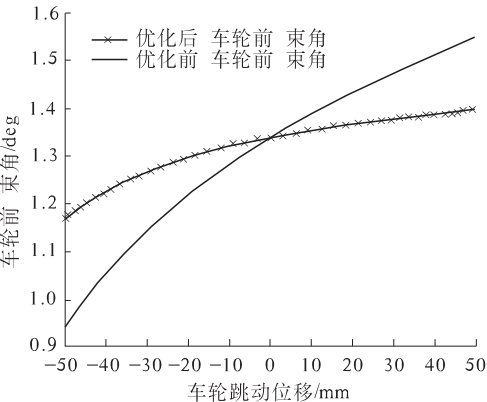


图 10 车轮前束角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.10 Toe Angle vs. Wheel Travel

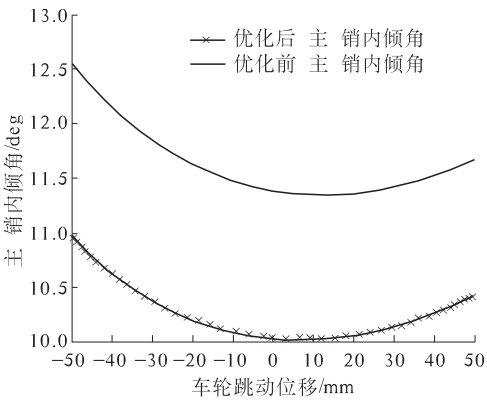


图 11 主销内倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.11 Kingpin Inclination vs. Wheel Travel

由悬架定位参数前后对比图可知车轮外倾角几乎没有变化,前轮前束角变化范围缩小为 $1.15^{\circ} \sim 1.40^{\circ}$ ,主销内倾角变化范围降为 $10.0^{\circ} \sim 11.0^{\circ}$ ,主销后倾角变化范围变为 $2.18^{\circ}$ 至 $2.19^{\circ}$ ,车轮侧移量变化范围降为 $-0.5 \sim 1 \text{ mm}$ ,可以看出前轮前束以及主销内倾角均达到优化目的,其他参数除主销后倾角均有所降低,而主销后倾角变化依然在允许范围内.由此可以得出,此次优化

设计结果是成功的.

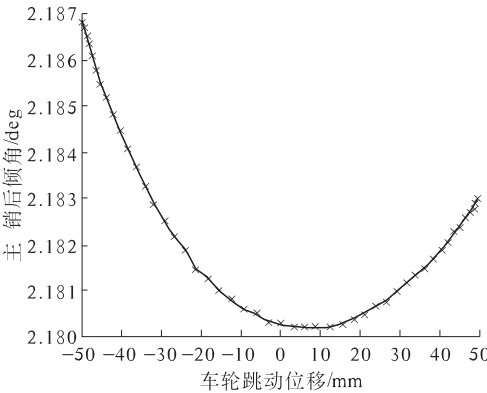


图 12 主销后倾角随车轮跳动的关系曲线  
Fig.12 Caster Angle vs. Wheel Travel

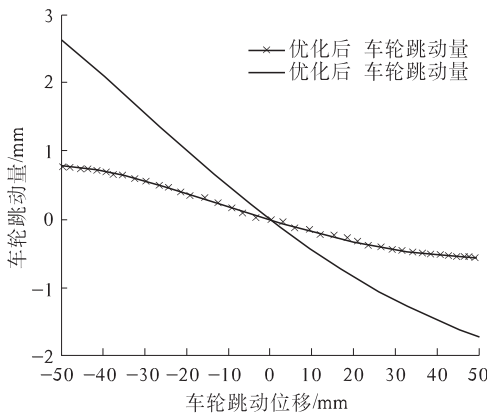


图 13 车轮侧移量随车轮跳动的关系曲线  
Fig.13 Sideway Displacement vs. Wheel Travel

3 结论

运用 Adams 成功建立起某乘用车前悬动力学模型并进行了运动学仿真,分析了悬架的定位参数随车轮跳动的变化规律.针对模型前轮前束以及主销内倾角过大的问题,联合运用 Adams/View 与 Adams/Insight,以前轮前束和主销内倾角为优化目标进行优化,通过对定位参数影响最大的悬架硬点坐标进行多次修改和迭代计算,系统可以自动匹配最优结果达到优化目的.上述方法可以快速准确地进行参数优化以及结构设计,具有广泛的应用前景.

参考文献:

[1] 尹文杰. 车辆悬架动力学/运动学分析和参数优化 [D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院, 2003. 14 - 20.

[2] 陈家瑞. 汽车构造 [M]. 北京:机械工业出版社, 2010. 199 - 243.

- [3] 魏道高. 汽车前轮定位参数研究与展望[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(12): 1594 - 1598.
- [4] 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[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(3): 55 - 58.
- [5] 宋传学. 车辆平顺性的虚拟仿真及试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 259 - 262.
- [6] 李军, 邢俊文, 覃文杰. ADAMS 实例与教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [7] Mechanical Dynamics, Inc. Using ADAMS/ Insight with ADAMS/View [C]. USA. 3 - 99.
- [8] 田野. 双横臂独立悬架优化设计及整车平顺性仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学机械与自动化学院, 2009: 28 - 36.
- [9] 唐应时, 朱位宇, 朱彪, 等. 基于轮胎磨损的悬架与转向系统硬点优化[J]. 汽车工程, 2013, 35(7): 643 - 644.

## Optimization of Front Suspension of Vehicle Based on Virtual-Pototype-Technology

LU Sen-lin, XU Jing-chao

(School of Automotive & Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The double wishbone suspension of torsion bar spring of a passenger vehicle was established and operated in Adams/View. Then, it was found out that the toe angle and caster angle is way too large after simulation. Since the complexity of suspension system and excessive number of variables, it would be difficult to take use of familiar ways to reach the ideal result. In this paper, the combination of multi-body dynamics software Adams/View and its optimization module Adams/Insight was introduced. The sensitivity of design variables was received and the parameter values was obtained. Then the object function was reached at the same time with the optimization of several design variables, thus the kinematic performance was improved as well.

**Key words:** Adams/View, Adams/Insight, suspension, simulation, optimization

(上接第 123 页)

## Research on Recoverable Energy Distribution of Hydraulic Excavator

ZHANG Shu-zhong, JIANG Ji-bin, LIAN Guo-fu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Based on the inefficiency of excavator hydraulic system, a 20-ton hydraulic excavator adopted double-pump and dual-circuit is taken as research object. The recoverable energy distribution experiment of hydraulic system is set up, and the models of multi-body work set and hydraulic system are built in MATLAB. After simulation and experimental studies in the standard work cycle, the recoverable energy distributions of each actuator (swing motor, boom, stick, bucket hydraulic cylinder) are calculated. The results show that recoverable energy reaches up to 21.1% of total input energy of hydraulic system, in which the boom potential energy and swing braking energy occupy most of the recoverable energy accounting for 72% and 23.8% respectively, indicating the boom potential and swing braking energy recovery system is an effective way to reduce energy consumption.

**Key words:** hydraulic excavator, recoverable energy, distribution, experiment, boom potential energy, swing braking energy