

# 汽车扭杆弹簧的有限元分析与优化设计

邢艺文, 王东方, 朱俊铖

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:**针对双横臂扭杆弹簧悬架的特点,运用多体动力学理论建立了某汽车独立悬架的仿真模型.根据扭杆弹簧的结构形式,在ADAMS/Car中分别提取3种典型工况关键点处的载荷并将其转化为扭矩,作为静力学分析的载荷条件;在有限元软件ANSYS中对典型工况下的扭杆弹簧进行静力学分析,提出空心杆的结构形式;基于响应面法对扭杆弹簧采取全局单目标优化,得到3种最佳优化方案.对比优化后与优化前的结果可以看出:优化后扭杆弹簧的受力性能得到了显著的改善,承受的最大等效应力降低了24%,总变形量降低了31%,扭杆弹簧质量降低了11%.

**关键词:**扭杆弹簧;悬架;响应面法;优化设计

**中图分类号:**TH12 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.5/6.015

## Finite element analysis and optimization design of the car torsion-bar spring

XING Yi-wen, WANG Dong-fang, ZHU Jun-cheng

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** According to the characteristics of double-wishbone suspension with torsion bar, establish a simulation model of a car independent suspension was established by multi-body dynamics theory. According to the formal structure of torsion bar spring, loads of key points at three typical load conditions in ADAMS/Car were drawn and turned into torsion as the loading condition for statics analysis; statics analysis of the torsion bar was taken in typical conditions with ANSYS. The structure of hollow rod was designed; Three best programs were gotten by taking single objective global optimization on torus torsion spring bar which based on the response surface method. Comparison of the results after optimization and original showed: the mechanical properties of torsion bar improved significantly after optimization, the maximum equivalent stress decreased by 24%, the total deformation decreased by 31%, and the quality of torsion bar decreased by 11%.

**Key words:** torsion-bar spring; suspension; response surface method; optimization design

收稿日期:2015-04-23

作者简介:邢艺文(1990—),男,河南省太康县人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为车辆数字化开发与集成技术.

通信作者:王东方(1961—),男,江苏省南京市人,南京工业大学教授,主要研究方向为机械系统集成设计技术、机械CAD/CAE.

## 0 引言

车辆行驶中,为了缓冲外界振动的影响,需要悬架的部件或者弹性元件具有一定的刚度以保证舒适性.扭杆弹簧作为悬架的储能元件,其蓄能量是钢板弹簧的3倍,高于螺旋弹簧而且可减少非簧载的质量、提高储能,在安装方面也更为方便.因此扭杆弹簧研究具有十分重要的意义.

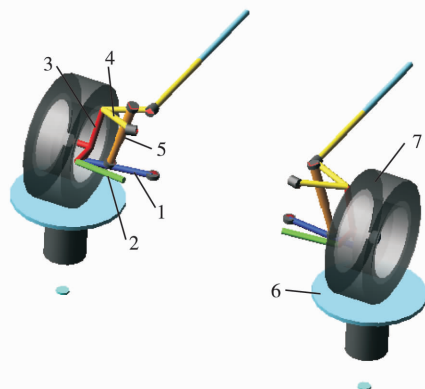
杨雪峰<sup>[1]</sup>以某汽车扭杆弹簧作为研究对象,运用 HyperMesh 软件对扭杆弹簧进行静力分析和模态分析,并利用 Matlab 优化工具箱对扭杆弹簧几何尺寸进行了优化.宋传学等<sup>[2]</sup>成功地将 ADAMS/Car 运用于双横臂独立悬架的分析研究中,并通过下调下控制臂与车架前安装点的位置来提高悬架的整体性能.韩宝坤等<sup>[3]</sup>采用 ANSYS 提供的一阶优化方法对扭杆弹簧进行优化设计,优化后扭杆弹簧应力分布得到了有效的改善.本文拟结合某汽车双横臂扭杆弹簧悬架的结构形式,在 ADAMS/Car 中分别提取几种典型工况下的载荷,对扭杆弹簧部分进行基于响应面法的单目标结构优化设计<sup>[4]</sup>,以为同类型零部件的优化设计提供新的思路.

## 1 扭杆弹簧受力分析

扭杆弹簧本身是一根由弹簧钢制成的扭杆,其作为弹性元件在各种车辆和机械设备中有着广泛的应用,一般工作时承受纯扭转负荷,对应力和寿命要求比较高.为了获取扭杆弹簧上的受力载荷,将典型工况下轮胎接地点的载荷作为已知参数,输入到多体动力学 ADAMS/Car 软件中进行分析,获取上横臂球铰接点的载荷,再根据该点到扭杆弹簧的距离,计算出其受到的扭矩.根据实车结构分析,利用 ADAMS/Car 软件,建立如图 1 所示的悬架仿真实验模型.将仿真软件与数学计算方法相结合,在一定程度上可以提高获取零件载荷的准确度<sup>[5]</sup>.

计算过程中,需要用到的车辆整车质量及其部分性能参数见表 1.

在汽车行驶的过程中,其载荷是非常复杂的,而且其受力的载荷工况也是由基础的弯曲载荷、侧向载荷、扭杆弹簧载荷、冲击载荷等多方面组成,因此选取 3 种常见的工况对其载荷的提取进行阐述.



1.下摆臂 2.转向横杆 3.转向节 4.上摆臂  
5.减震器 6.激振台架 7.车轮

图 1 悬架仿真实验模型

表 1 车辆基本参数

参数	数值	参数	数值
整备质量 $G_0$ /kg	2 000	轴距 $L$ /mm	3 080
前轴质量 $G_f$ /kg	1 212	车身长/mm	5 035
后轴质量 $G_h$ /kg	798	车身宽/mm	1 880
前轴簧下质量/kg	166.04	车身高/mm	1 455
后轴簧下质量/kg	148.428	质心到前轴距离 $H_f$ /mm	1 857.2
前轮距 $a$ /mm	1 545	质心到后轴距离 $H_h$ /mm	1 222.8
后轮距 $b$ /mm	1 570		

### 1) 紧急制动工况

紧急制动和紧急加速均属于汽车车辆行进中的突变情况,区别是加速度的方向不一样.在紧急制动的过程中,车轮会产生抱死情况而使纵向力达到最大.

### 2) 单车轮过凸包工况

单车轮过凸包的情况经常发生,在乡间小路上,这种情况尤为明显.单车过凸包的车轮其上受到的垂直力是 29.4 N,其他车轮为 9.8 N.其中在左前轮过凸包时,该车轮受到的垂向力为没有过凸包右前轮的 3 倍.

### 3) 最大加速度转弯工况

具有对称结构的汽车在转弯时,一边会发生侧倾,使得车身质量的重心发生偏移,该侧的车轮负载会变大,另一侧的车轮负载会变小.本文中从左前轮进行最大侧向加速度转弯行驶为例.

根据该车的整车参数,以及查阅相应的动载荷系数,计算以上各个工况下的轮胎接地点的载荷,用作多体动力学模型的输入条件<sup>[6]</sup>.相应的工况载荷见表 2.

为了得到典型工况下的扭矩,需要先获取各工况下悬架上控制臂外侧球铰点处载荷,铰点载荷通

过在 ADAMS/Car 中根据不同工况下轮胎的接地点载荷仿真测试得到,见表 3. 其中  $F_x, F_y, F_z$  代表  $x, y, z$  方向上的力;  $F_w$  表示  $x, y, z$  方向上合力.

表 2 各工况下轮胎接地点载荷计算结果 kN

工况	左前轮			右前轮		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
紧急制动	-6.7	0	8.3	-6.7	0	8.3
单轮过凸包	0	0	3.6	0	0	1.2
最大加速度转弯	0	-8.3	8.3	-1.1	0	1.1

表 3 各工况下悬架上控制臂外侧球铰点载荷 N

工况	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_w$
紧急制动	3 467.1	-1 674.7	4 698.5	6 437.1
单轮过凸包	2 450.3	5 450.5	2 543.2	6 894.3
最大加速度转弯	6 840.2	1 845.5	1 030.4	7 852.3

弹簧扭矩由悬架上控制臂的力传递而来,已知前悬架控制臂上的长度  $L$  为 366 mm,利用 ADAMS/Car 软件仿真得到控制臂点的力  $F$ ,通过  $F$  与  $L$  的叉乘可获得扭杆弹簧与悬架连接处的扭矩  $M$ ,各工况下扭杆弹簧扭矩的大小见表 4.

表 4 扭杆弹簧各工况下的扭矩

工况	扭矩 $M/(N \cdot mm)$
紧急制动	2.36e6
单轮过凸包	2.50e6
最大加速度转弯	2.87e6

由表 4 可以看出,最大侧向加速度转弯行驶时,悬架上的扭杆弹簧承受的扭矩在上述 3 种工况下较大,这样的工况很容易影响驾驶人员对整个悬架舒适度与安全度的感受,因此要对此工况下扭杆弹簧的受力情况进行检查,并采取进一步措施.

## 2 扭杆弹簧有限元模型

### 2.1 扭杆弹簧的建模与网格划分

根据测量的扭杆弹簧尺寸参数,简化花键部分计算扭杆弹簧的有效长度. 建立扭杆弹簧的有限元模型及网络划分见图 2<sup>[7]</sup>.

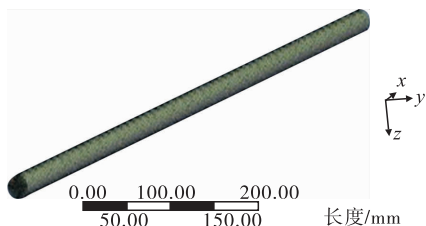


图 2 扭杆弹簧有限元模型及网格划分

### 2.2 材料属性

扭杆弹簧材料为弹簧钢,对化学成分以及机械性能有着严格的要求. 常用的弹簧钢为 50CrV, 60CrA, 60Si 等材料,重要弹簧选用 45CrNiMoVA. 本文选用 45CrNiMoVA 材料,查阅相关文献抗拉强度为 1 470 MPa,屈服强度为 1 330 MPa.

### 2.3 边界条件及加载

根据扭杆弹簧的运动关系,车轮发生上下跳动时,扭杆通过链接悬架上控制臂,以扭杆弹簧中心线为中心,做旋转运动. 扭杆弹簧一端固定,另一端受到扭矩的作用. 在 ANSYS/Workbench 中对扭杆弹簧分别施加载荷和约束,见图 3.

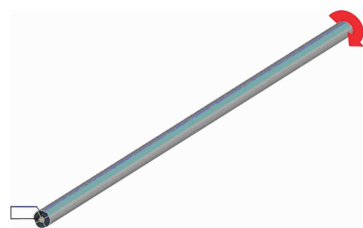


图 3 扭杆弹簧载荷及约束

### 2.4 最大加速度转弯工况下静力学分析

确定以最大的扭矩工况对汽车悬架上扭杆弹簧进行静力学分析,获取应力应变云图,探讨性地建立环形扭杆弹簧模型,即在前人研究较多的圆形扭杆弹簧中部加工一个小孔,对其进行静力学分析. 图 4 为产生最大扭矩工况下的应力应变云图. 从图 4 中可以看出,环形圆截面扭杆弹簧的最大变形量为 8.823 6 mm,最大应力为 1 179.7 MPa,这显然已经超过了汽车材料的许用剪切应力  $[\tau] = 900$  MPa,所以需要对其进行必要的优化设计.

## 3 扭杆弹簧全局单目标优化

### 3.1 优化理论

基于二次多项式的响应面方法是多学科优化设计全局优化中常见的代理模型方法,但需要在构造响应面之前确定多项式函数的形式. 采用合适的试验设计的设计空间获得构造相应面所需的样本点,然后用样本点生成响应面模型作为代理模型进行全局单目标优化.

数学模型是建立有限元模型分析的基础,因此需要对设计变量、目标函数、约束函数等方面进行分析.

#### 3.1.1 设计变量的确定 在不改变弹簧有效长度

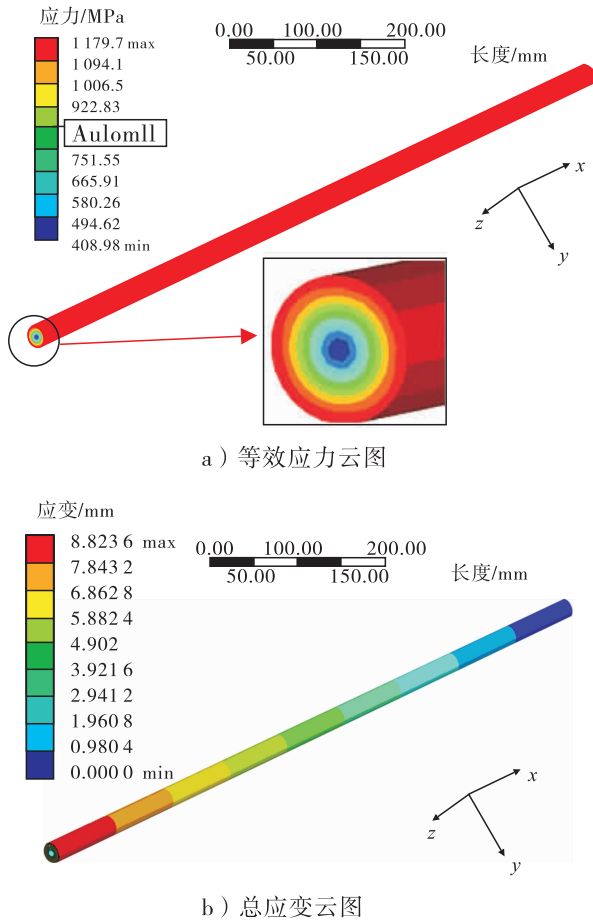


图 4 扭杆弹簧静力学分析结果

$$\tau_{\max 1} = \frac{M_n}{N_n} = \frac{16Fl}{\pi(D^3 - d^3)} \leq [\tau] \quad (3)$$

其中,  $M_n$  为扭杆弹簧所受扭矩,  $N_n$  为扭杆弹簧扭转断面系数,  $F$  为扭臂力,  $l$  为臂长导向装置的杠杆臂长,  $[\tau]$  为最大许用切应力. 综合上述的公式, 将②③代入①中, 整理可得扭杆弹簧的目标函数为

$$U_s = \frac{16K_r^2 F^2 l^2 L}{\pi G (D^4 - d^4)}$$

其中,  $K_r$  为扭杆载荷的集中应力系数, 一般取 1.2<sup>[8]</sup>.

**3.1.3 约束条件的确定** 扭杆弹簧刚度的约束条件需要在一定的范围内, 其约束条件为

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$$

根据扭杆的刚度定义可以知道, 扭杆弹簧刚度  $K$  受到扭杆扭臂力  $F$  的作用, 结合卡氏定理可以知道其变形为

$$K_f = \frac{F}{\Delta} = \frac{F}{dU} \cdot dF$$

弹簧刚度为

$$K_f = \frac{\pi G (D^4 - d^4)}{32K_r^2 l^2 L}$$

环形空心圆截面扭杆弹簧强度约束为

$$\tau_{\max} = \frac{16K_r l}{\pi(D^3 - d^3)} \leq [\tau]$$

环形圆截面扭杆弹簧外径、内径、长度满足条件:

$$\begin{cases} D_{\min} \leq x_1 \leq D_{\max} \\ d_{\min} \leq x_2 \leq d_{\max} \\ L_{\min} \leq x_3 \leq L_{\max} \end{cases}$$

### 3.2 优化方法及结果

依据全局单目标优化方法, 在前人研究的基础上探讨性地对环形圆截面扭杆弹簧进行优化分析. 选择典型工况中最危险的工况为条件, 结合有限元软件 ANSYS/Workbench 对其进行优化分析. 假设扭杆的等效长度  $L$ , 外径  $D$ , 内径  $d$  为参照设计变量, 对结构进行优化, 得到 3 种最佳优化方案, 见表 5.

由优化结果可以看出, 方案 A 为最优方案, 优

表 5 环形圆截面扭杆弹簧优化方案 mm

方案	等效长度	外径	内径	最大应力 /MPa	最大应变
方案 A	911.42	25.23	7.299 6	836.93	6.059 3
方案 B	949.77	25.284	7.440 0	881.69	6.277 3
方案 C	930.60	25.176	7.728 0	894.25	6.229 3

的前提下, 确定扭杆的参数设计变量. 根据环形圆截面扭杆弹簧变形能计算, 以弹簧的等效工作长度  $L$ , 外径  $D$  和内径  $d$  为设计变量, 即

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ D \\ d \end{bmatrix}$$

**3.1.2 目标函数的确定** 因要求扭杆弹簧变形能控制在一定的范围内, 故目标函数为

$$U_s = \frac{\lambda \tau_{\max 1}^2 LS}{4G} \quad (1)$$

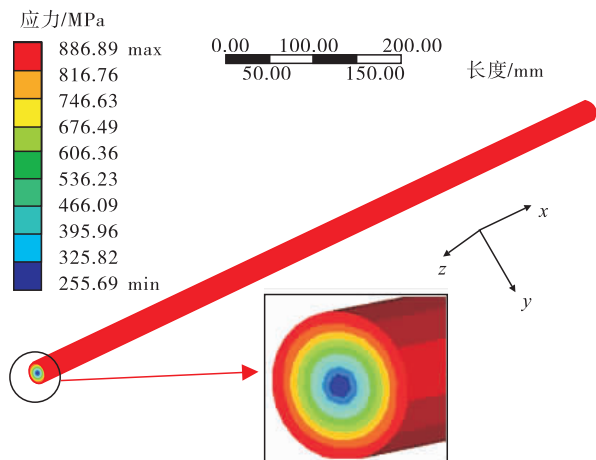
其中,  $U_s$  为目标函数,  $\lambda$  为载荷比,  $\tau_{\max 1}$  为扭杆弹簧最大扭转应力,  $S$  为环形圆截面面积,  $G$  为材料的剪切弹性模量. 依据圆截面公式推导环形截面的面积公式, 以及该形式的扭转应力公式, 以便确定扭杆弹簧的目标函数.

环形圆截面面积为

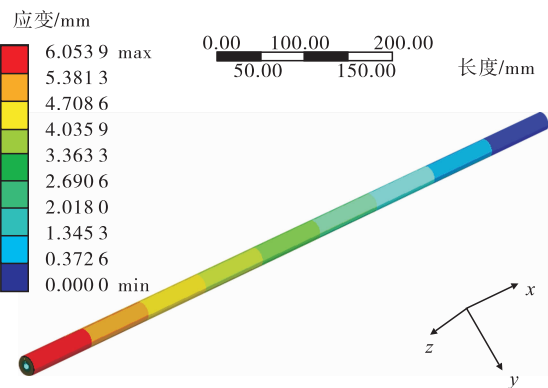
$$S = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (2)$$

环形圆截面扭杆弹簧的扭转应力为

化后的扭杆弹簧长度、外径和内径均有所变化. 等效长度为 911.42 mm, 外径为 25.23 mm, 内径为 7.299 6 mm, 得到最大应力为 836.93 MPa, 最大应变为 6.059 3 mm. 优化后的扭杆弹簧应力和变形云图见图 5.



a) 优化后等效应力云图



b) 优化后总应变云图

图5 优化后扭杆弹簧静力学分析结果

表6为扭杆优化前后结果的对比分析,从分析结果可以看出扭杆弹簧的受力性能有了明显改善:承受的最大应力降低了24%,总变形量降低了31%,质量降低了11%,且分布更为合理,达到了设计要求.

表6 扭杆弹簧优化前后结果对比分析

扭杆弹簧	应力/MPa	总变形/mm	质量/kg
优化前	1 179.70	8.823 6	3.324 5
优化后	886.89	6.054 0	2.945 8

## 4 结论

本文以某汽车双横臂扭杆弹簧悬架为基础,在ADAMS/Car中分别提取3种典型工况下的载荷,结合传统方法计算出3种典型工况下扭杆弹簧的最大扭矩,作为静力学分析的载荷条件.利用有限元法,对最大转矩工况下的扭杆弹簧进行静力学分析,结果表明其应力大于自身材料许用应力,所以需要采取必要的措施加以改进.在此基础上,依据全局单目标优化方法,结合ANSYS/Workbench软件对扭杆进行了结构优化分析,得出3种最佳优化方案.结果表明经优化后的扭杆弹簧受力性能显著改善,更加符合使用要求,为同类型零部件的优化设计提供了新的思路,具有一定的指导意义.

## 参考文献:

- [1] 杨雪峰. 基于HyperWorks汽车扭杆弹簧有限元分析与优化[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2012.
- [2] 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:工学版,2004,34(4):554.
- [3] 韩宝坤,黄华,殷兆辉. 扭杆弹簧计算与优化[J]. 机械工程师,2003(8):64.
- [4] Pandya N C, Maru N A. Optimum design of torsion bar for a vehicle suspension[J]. Journal of The Institution of Engineers,1988(5):153.
- [5] 苏小平. 依维柯汽车多体动力学仿真分析、优化研究及工程实现[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [6] Yen J. Constrained equations of motion in multibody dynamics as ODE on manifolds[J]. SIAM, Numer Anal, 1993,30(2):553.
- [7] 叶惠娟,黄致建. 基于ANSYS的二维发动机风扇盘结构应力分析方法研究[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2015,30(1):77.
- [8] 王海亮,林忠钦,金先龙. 基于响应面模型的薄壁构件耐撞性优化设计[J]. 应用力学学报,2003,20(3):62.