

文章编号:1000-582X(2003)04-0038-04

## 汽车后悬架的非线性有限元分析\*

胡玉梅, 邓兆祥, 王欣, 宾洋

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**介绍了非线性有限元分析的基本概念和求解思想,利用 ANSYS 有限元分析软件的接触非线性求解功能,对 SC1020 汽车后悬架钢板弹簧的强度和刚度进行了考虑接触状况的静强度分析,得到各片钢板弹簧在总装配后的预应力分布、预变形、在不同载荷作用下的应力分布和变形情况,并在此基础上计算了钢板弹簧的力学性能和动态特性,并且和试验结果符合得很好。分析结果表明:利用 CAE 分析技术有助提高汽车悬架设计水平、缩短设计周期,减少开发成本。

**关键词:**悬架,有限元,非线性,建模

**中图分类号:**U463.33<sup>+</sup>

**文献标识码:**A

汽车悬架直接影响汽车的平顺性与舒适性,随着汽车向轻量化和高速化的发展,对悬架的要求越来越高,传统的设计方法把悬架的钢板弹簧展开为近似的梯形结构<sup>[1]</sup>,主要基于《材料力学》及一些经验公式来计算悬架的刚度、频率和应力等,远远不能适应现代汽车发展的需求。以计算机为工具,以有限元分析为基础的现代设计方法正逐渐成为汽车设计的主流<sup>[2-4]</sup>。文中以在 SC1020 汽车的开发过程中,利用 ANSYS 有限元分析软件对其后悬架的强度和刚度进行了静力学分析,得到其在总装配后的预应力分布和预变形;在不同载荷作用下的应力分布和变形;悬架的刚度随载荷变化的规律及悬架的固有频率随载荷的变化规律。

### 1 悬架非线性有限元分析基本概念

SC1020 汽车的后悬架由 5 片钢板弹簧组成,其中第 4、5 片为副簧,仅在载荷较大时参与工作。钢板弹簧各片在未装配而处于自由状态时,各片的曲率半径各不相同,在散片夹紧总装后,它们只有一个曲率半径,故各片之间存在相互作用,会产生预应力,同时,钢板弹簧受载后,其静挠度和动挠度一般都达几十厘米,属于大变形几何非线性问题;另外在总装配以及加载过程中,各片之间的接触情况及相互作用随着总装配过程和加载过程而变化,这种边界条件的可变性和不可逆性称为边界非线性问题。因此整个钢板弹簧的有限元分析属于非线性有限元分析。

求解非线性问题一般都采用逐步线性化的方法,即把非线性问题化为一系列线性问题。为了使这一系列线性解收敛,且逼近非线性解,人们提出过许多具体解法,但这些解法都有一定的局限性。某一解法对某一类或某一种程度的非线性问题合适,而对另一类或另一种程度的非线性问题不一定合适。因此,正确选用解法成为非线性有限元法的一个极为重要的问题。针对 SC1020 汽车后悬架非线性问题的特点,笔者选用带自适应下降的全牛顿-拉普森方法(简称 NR 方法)来进行平衡迭代求解<sup>[5]</sup>。

全牛顿-拉普森方法是一种逐步递增载荷的平衡迭代方法,其原理如图 1 所示。其优点是可迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛(在某个容限范围内),在每次求解前, NR 方法估算出残差矢量(如  $P_1 - R_3$ ),这个矢量是回复力(对应于单元应力的载荷)和所加载荷的差值,然后使用非平衡载荷进行线性求解,且检查收敛性。如果不满足收敛准则,重新估算非平衡载荷,修改刚度矩阵,获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

全牛顿-拉普森方法每进行一次平衡迭代将修改刚度矩阵一次,而且每一次平衡迭代都使用正切刚度矩阵(如  $k_1, k_2$  等)。当使用自适应下降的 NR 方法时,只要迭代保持稳定(也就是,只要残余项减小,且没有负主对角元出现),程序将仅使用正切刚度矩阵。一旦在一次迭代中探测到发散倾向,程序就不再进行

\* 收稿日期:2002-12-20

作者简介:胡玉梅(1964-),四川青神人,重庆大学副教授,博士,主要从事车辆 CAE 技术研究。

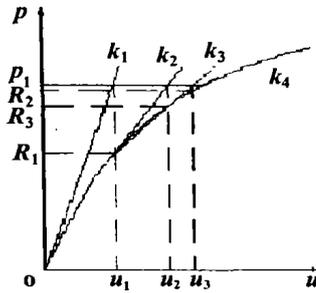


图1 全牛顿-拉普森平衡迭代示意

发散迭代而重新开始应用正切和正割刚度矩阵( $k_3$ )的加权组合求解。当迭代回到收敛模式时,程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对象汽车钢板弹簧这样复杂的非线性问题,自适应下降将提高程序获得收敛的能力。

## 2 SC1020 汽车后悬架的结构强度有限元分析

介于钢板弹簧在几何形状及载荷上的特点,按前后对称取一半,并略去各片横截面上的倒圆,按其自由叠放的状态建立钢板弹簧的有限元模型如图2和图3所示,从图中可以看出,由于钢板弹簧第2片在自由状态下的曲率半径大于第1片在自由状态下的曲率半径,因此,按自由状态叠放后,其第1片固定端的下表面和第2片固定端的上表面间是接触在一起的。第3片固定端的下表面与第4片固定端上表面也是接触在一起的;而钢板弹簧第3片在自由状态下的曲率半径小于第2片在自由状态下的曲率半径,按自由状态叠放后,第2片固定端的下表面至第3片固定端上表面的距离为21.1859 mm。第4片固定端的下表面与第五片固定端上表面的间隙为1.063 mm。

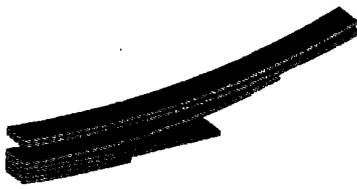


图2 钢板弹簧的有限元模型

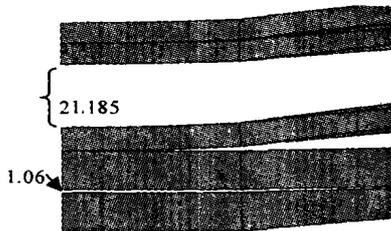


图3 钢板弹簧各片固定端几何关系

建立好钢板弹簧的有限元模型后,通过在相邻两片之间建立面-面柔性体接触单元<sup>[6]</sup>来模拟各片之

间的相互作用;在第3、4两片的固定端横截面上施加固定约束来消除整个模型的刚体运动。

### 2.1 钢板弹簧装配后的预应力和预变形分析

在以上模型的基础上,在第1、2片钢板弹簧的固定端施加向下的位移,在第5片钢板弹簧的固定端施加向上的位移,以模拟钢板弹簧的装配过程。在选择和设置好非线性分析所需的求解参数如接触的法刚度、切向刚度、表面穿透量、最大接触应力等,经非线性迭代求出钢板弹簧总装配后的预应力的等效应力分布云图如图4所示。其中第3片靠近固定端的预应力最大,其大部分区域的等效应力值在100~120 MPa;其次是第2片,其大部分区域的等效应力为60~90 MPa;再次是第1片,其大部分区域的等效应力为30~50 MPa;而第4、5片大部分区域的等效应力为0~28 MPa。固定端的灰色部分则为约束所引起的应力集中,可以不予考虑。

总装配后的预变形如图5所示,第1片自由端向下的位移量为14.931 mm。

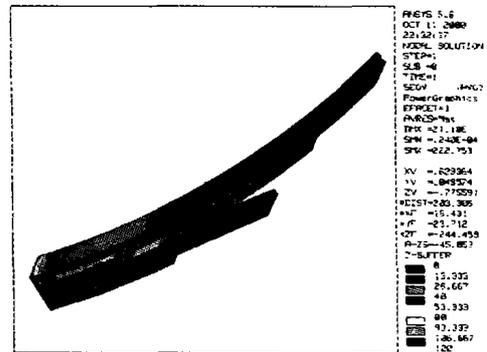


图4 总装配后所产生的预应力的等效应力分布云图

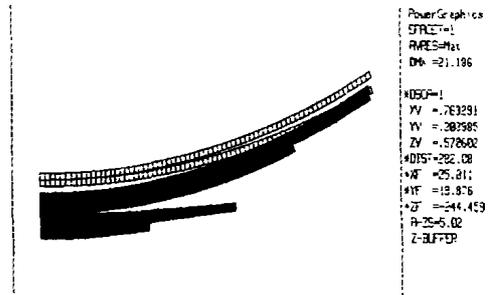


图5 总装配后所产生的预变形图

### 2.2 钢板弹簧在不同载荷下的变形及应力分布

为了得到钢板弹簧的变形随载荷变化的曲线,在第1片钢板弹簧的自由端由小到大共施加了9个载荷步,经非线性求解得到了钢板弹簧在不同载荷下的应力分布、变形等信息。

各载荷步的载荷大小如表1所示。

表1 各载荷步的载荷大小

载荷步	载荷/kg	对应汽车载重量/kg
1	26.98	0(无货厢)
2	107.94	185.14
3	161.90	390.14
4	215.87	594.96
5	269.84	800(额定载重量)
6	323.80	1005.23
7	377.77	1210.28
8	431.74	1415.32
9	485.71	1620.36

当给钢板弹簧总成第1片的自由端施加 269.84 kg 向下的载荷时,扣除掉钢板弹簧在装配过程中所产生的预变形(14.931 mm)之后,钢板弹簧第1片向下的位移为 92.479 mm。其等效应力分布云图如图6所示,各片的应力分布规律不尽相同,其中第1、2、3片的最大应力区均靠近固定端。第1片的最大应力区约占该片长的 2/3,在该区域的等效应力为 355~400 MPa;第2片的最大应力区超过该片长的 2/3,在该区域的等效应力为 311~350 MPa;第3片的最大应力区约占该片长的 2/3,在该区域的等效应力为 533~600 MPa;第4片的最大应力区出现在该片中段的上、下表面,其等效应力为 160~180 MPa,从中间段上、下表面到

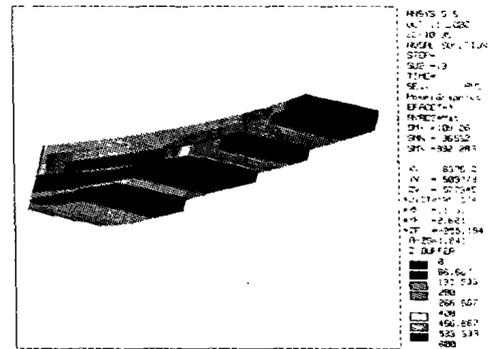


图6 钢板弹簧总成第1片的自由端施加 269.82 kg 载荷时等效应力分布云图

自由端,应力逐渐降到 20 MPa 以下,从中间段上、下表面到固定端,应力有所减小,降到 80 MPa 以下,从上、下表面到中心层,应力迅速减小,降到 20 MPa 以下;第5片靠近固定端处上、下表面的等效应力较大,为 285~320 MPa,沿表面到中心层应力迅速减小到 36 MPa 以下,沿固定端到自由端应力逐渐减小到 36 MPa 以下。

经类似的计算,可得到钢板弹簧各片应力随载荷的变化如表2所示。从表2的数据不难看出,钢板弹簧各片的应力并非完全随载荷的递增而呈规律上升,这是由于钢板弹簧受载后的非线性大变形和接触的非线性所致。

表2 钢板弹簧各片在不同载荷下的应力

载荷步	载荷/kg	应力					MPa
		第1片	第2片	第3片	第4片	第5片	
1	26.98	44~50	17.3~19.5	195~220	88~100	71~80	
2	107.94	209~235	168~190	409~460	60~67	77~88	
3	161.90	280~315	249~280	454~510	21~24	135~152	
4	215.87	320~360	284~320	489~550	87~98	211~238	
5	269.84	355~400	311~350	533~600	160~180	285~320	
6	323.80	408~460	355~400	560~630	231~260	365~410	
7	377.77	444~500	417~470	622~700	298~335	436~490	
8	431.74	498~560	480~540	676~760	427~480	520~585	
9	485.71	556~625	537~604	755~850	362~408	595~670	

### 2.3 钢板弹簧的变形随载荷的变化情况

根据前面各载荷步的分析结果,扣除掉钢板弹簧总装配所产生的预变形,得出悬架的位移随载荷的变化情况如图7中虚线所示,相应的试验数据如图中实线所示。由此可见,有限元分析的结果与试验数据是一致的,误差在 6% 以内,可以满足实际工程的需要。

## 3 结论

与试验方法相比,笔者的分析可以在悬架钢板弹簧的设计阶段预估其力学性能和动态特性,从而有利

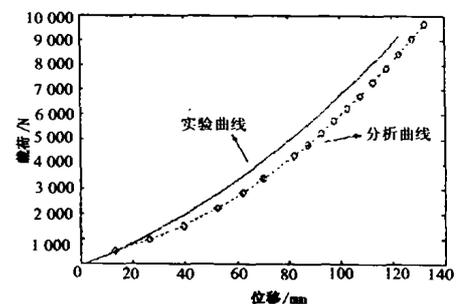


图7 悬架静扰度随载荷变化的曲线

于加快产品的开发进程。利用有限元分析技术可以较准确而迅速的得到该悬架的基本力学特性,这对缩短产品设计周期、提高产品设计质量是非常有必要的。

#### 参考文献:

- [1] 张洪欣. 汽车设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1998. 163-171.
- [2] 黄向东. 汽车悬架系统的有限元分析法及其应用[J]. 中国机械工程, 1994, 5(1):44-45.
- [3] HUANG X D. FEM Models For Vehicle Component and their Application AMSE[A]. 建模仿真控制 92 国际会议论文集[C]. 合肥:1992.
- [4] KARLSON SORENSON INC. MSC/NASTRAN Theoretical Manual /User's Manual(V4-5)[Z]. Hibbitt, USA, 1985.
- [5] 蒋友谅. 非线性有限元法[M]. 北京:北京工业学院出版社. 1998. 138-146.
- [6] 雷晓燕. 不同材料交界面上接触应力的有限元分析[J]. 应用力学学报, 1995, 12(3):116-119.

## Analysis of Leaf Suspension of Vehicle Using Non-linear Finite Element

HU Yu-mei, DENG Zhao-xiang, WANG Xin, BIN Yang

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper introduced basic concept and resolvent of nonlinear FEA, the analysis of intensity and stiffness of the rear leaf spring on SC1020 vehicle was carried out with contact nonlinear function of FEA program ANSYS, and the pre-stress distribution and pre-deformation after assembled were introduced, the stress distribution and deformation under different loads had also been presented. Thus we can calculate the mechanical and dynamic performance of leaf spring at the design stage. The result showed a great agreement with the test. It is convinced that the CAE (Computer Aided Engineering) technology can improve the design of vehicle suspension and the cost and time can be saved.

**Key words:** suspension; finite element; non-linear; modeling

(责任编辑 张小强)

(上接第29页)

## Key Technology of Product Visualization Based on Web

WU Xing, ZHANG Si-fu, LI Guo-long, ZUO Shi-lun

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The article analyzes two approaches of product visualization, and brings forward a common approach of product data to achieve Web visualization based on IGES standard. It transforms CAD data to universal and useful 3D data, it don't need special browser, and it is very simple and useful. A technological process is introduced to transform Web formats from IGES data. The article also describes concretely triangle anatomy of entity, and the minutia arithmetic of curve face. The principle that triangle piece realize to transform to VRML format is described. With the verification in the prototype system, this approach is proved with reason and credibility.

**Key words:** IGES; VRML; visualization; transform

(责任编辑 张小强)