

## 钢板弹簧动力学建模及建模参数影响分析

姬鹏,祁盟盟

(河北工程大学机电学院,河北邯郸056038)

**摘要:**采用等效中性面简化的离散 BEAM 单元法建立钢板弹簧多体动力学模型,对建立的模型进行仿真分析,并与试验结果进行对比;将该模型植入悬架系统及整车模型中,分析对钢板弹簧总成特性影响较大的建模参数对车辆性能的影响。研究表明:离散 BEAM 单元法建立的钢板弹簧模型能够较真实准确地模拟钢板弹簧的总成特性;具有过度转向或过大的不足转向特性的车辆可以选取合适的卷耳形式,通过降低或提高卷耳位置来获取期望的不足转向度。

**关键词:**钢板弹簧;建模;卷耳;仿真;分析

**中图分类号:**TH12,U463

**文献标识码:**A

### Leaf spring dynamics modeling and analysis on modeling parameters

Ji Peng, Qi Meng-meng

(Department of Mechanical Engineering and Electronics, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Leaf spring multi-body dynamics model was established by using discrete BEAM method simplified by equivalent neutral surface, the results of simulation analysis of the model were compared with the experimental results. The modeling parameters of the leaf spring assembly characteristics on vehicle performance were analyzed by implanting the model to suspension system and vehicle model. The results indicate that the discrete BEAM method to establish the leaf spring model is able to simulate the actual characteristic of leaf spring. The vehicle with oversteer or excessive understeer characteristics can obtain the desired understeer degree by lowering or raising the eyehook position.

**Key words:** leaf spring; modeling; eyehook; simulation; analyse

钢板弹簧是商用车悬架中应用最广泛的一种弹性元件,同时兼具弹性元件、减振元件和导向机构的功用,所以正确合理的建立钢板弹簧模型对研究车辆的操纵稳定性和乘坐舒适性有着至关重要的影响<sup>[1-2]</sup>。

钢板弹簧动力学模型的建立比较困难,为了尽可能体现钢板弹簧的非线性特点,目前常采用有限元模态法、SAE 三连杆法和离散 Beam 单元法三种方法<sup>[3-5]</sup>。其中,离散 Beam 单元法因为可以用等效中性面法简化以减少模型的自由度提高仿真速度,并且同时适用于悬架特性分析及整车动力学仿真分析而得到广泛应用<sup>[6]</sup>。本文针对目标车辆,在综合考虑建模精度、计算强度及整车动力

学仿真分析的情况下,选择用等效中性面简化的离散 BEAM 单元法建立钢板弹簧动力学模型。

#### 1 钢板弹簧动力学模型建立

本文中目标车辆为某皮卡,采用渐变刚度钢板弹簧非独立后悬架。钢板弹簧的结构特点和现有数据如表 1 所示。

本文选择用等效中性面简化的离散 BEAM 单元法建立钢板弹簧动力学模型。首先在 ADAMS/CHASSIS 中利用 Leaf Spring 工具箱建立钢板弹簧模型,再将其导入 ADAMS/CAR 中;建模步骤及 CHASSIS 中参数的设置参考文献[7],建立的钢板弹簧模型如图 1 所示。

表 1 目标车辆钢板弹簧数据  
Tab.1 Data of target vehicle's leaf spring

簧片	伸直长度/mm	前端半长/mm	厚度/mm	宽度/mm	备注
1	1 300	610	8	60	
2	1 150	540	8	60	均为矩形截面
3	960	450	8	60	空载(3 528 N),弧高:42.2 mm
4	740	360	7.5~13	60	满载(8 869 N),弧高:-32.8 mm
5	520	240	8.5~13	60	



图1 钢板弹簧多体动力学模型

Fig.1 The diagram of leaf spring multi-body dynamics model

刚度特性曲线,将其与试验结果进行对比(图3)。由图3可以看出仿真结果与试验曲线不仅变化趋势符合很好,而且偏差也很小,符合建模精度要求。

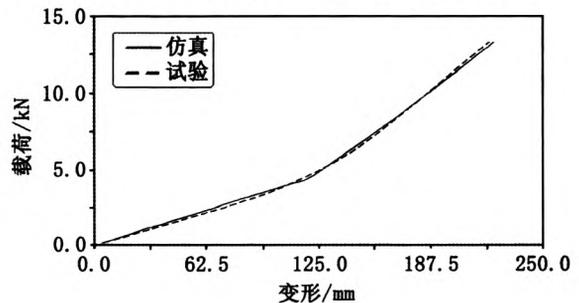


图3 钢板弹簧垂向刚度特性曲线

Fig.3 The curve of leaf spring vertical stiffness characteristic

## 2 钢板弹簧动力学模型精度验证

由于 ADAMS/CHASSIS 在建模过程中创建了大量的虚拟部件及约束,因此需要删除这些虚拟部件及约束并在前端卷耳、后端卷耳及吊耳处添加铰链约束;在板簧中部施加垂向力及预载荷(消除板簧垂向振动)。修改后获得钢板弹簧垂向刚度仿真模型(图2-a),图2-b为钢板弹簧垂向刚度试验示意图。

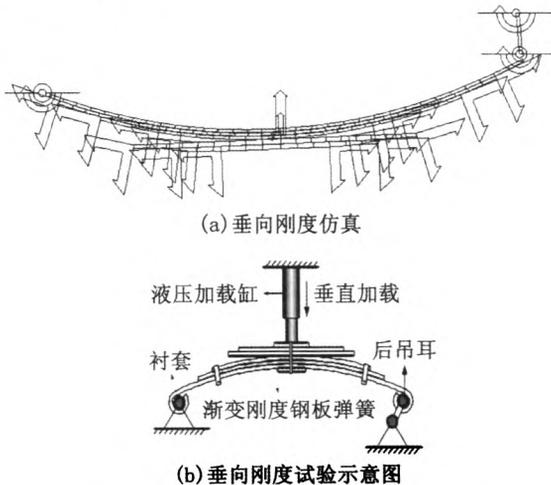


图2 钢板弹簧垂向刚度仿真及试验

Fig.2 The diagram of simulation and test of the vertical stiffness of leaf spring

调整板簧材料系数、弹性力指数等参数后对钢板弹簧模型进行垂向刚度仿真,获得钢板弹簧垂向

## 3 钢板弹簧建模参数影响分析

本文中目标车辆采用渐变刚度钢板弹簧非独立后悬架。钢板弹簧非独立悬架是商用车广泛采用的悬架形式,承担着为车桥提供导向和承载簧载质量的作用,其总成特性直接影响商用车的操纵稳定性。

在钢板弹簧的建模过程中应用到的建模参数主要分为特性参数(包括材料参数和接触参数)及结构参数(包括形状参数和位置参数)。由于篇幅所限,本文仅就不同形式的卷耳对钢板弹簧承载特性及导向特性的影响展开研究,其它参数的研究将在今后的工作中逐步进行。

依据前文中建立的钢板弹簧多体动力学模型,在保证钢板弹簧与车桥装配方式及位置不变的前提下,通过改变前端卷耳的位置建立不同前端卷耳形式的钢板弹簧。卷耳姿态的三种组合如表3所示,图4所示为卷耳三种姿态的示意图。

表 2 卷耳姿态设置

Tab.2 Setting of eyehook

组合	前端卷耳	后端卷耳
D/U	Downturned	Upturned
B/U	Berlin	
U/U	Upturned	

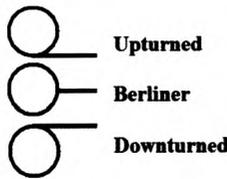


图4 卷耳姿态示意图

Fig.4 The diagram of eyehook

3.1 承载特性影响分析

按照前文验证钢板弹簧模型精度时添加约束及刚度分析的方法,分别对三种不同前端卷耳形式的钢板弹簧进行垂向刚度仿真分析,仿真所得钢板弹簧垂向刚度特性曲线如图5所示。

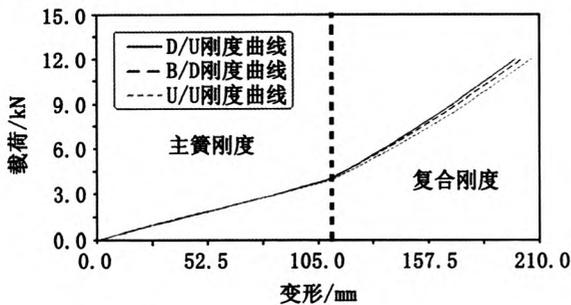


图5 钢板弹簧垂向刚度特性曲线

Fig.5 The curve of leaf spring vertical stiffness characteristic

由图5可以得出,随前卷耳位置的上移,钢板弹簧主簧刚度几乎不变,复合刚度随前卷耳位置的上移有所降低,但降低不大。因此,不同卷耳形式对钢板弹簧的承载特性影响不大。

3.2 导向特性影响分析

汽车在转弯时,车身产生侧倾。由于车桥与钢板弹簧的导向运动特性关系,车身的侧倾造成车轴在水平面内的转动,从而影响汽车的转向特性。

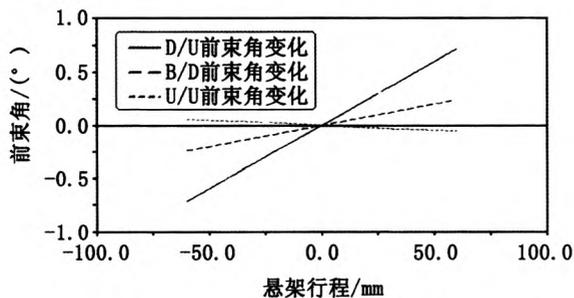


图6 前束角随轮跳的变化

Fig.6 The curve of the toe angle with wheel travel

在 ADAMS/CAR 中建立钢板弹簧后悬架子系

统模型并进行反向轮跳仿真(上、下跳均为 60 mm),仿真所得前束角随轮跳的变化如图6所示。

建立整车模型并进行稳态回转变真,验证三种形式的钢板弹簧对整车不足转向特性的影响。仿真所得前后桥侧偏角差值随侧向加速度的变化如图7所示。前后桥侧偏角差值与侧向加速度关系曲线上侧向加速度值为  $2 \text{ m/s}^2$  处的平均斜率即为车辆的不足转向度,图8所示即为不同卷耳形式下整车的不足转向度,可以看出对于后悬架来说,随卷耳位置的提高,车辆的不足转向度逐渐降低。因此,如果在轮胎等其他因素产生过大的过度转向(不足转向)时,可以选取适当的卷耳形式,通过降低(提高)卷耳位置来获得期望的不足转向度。

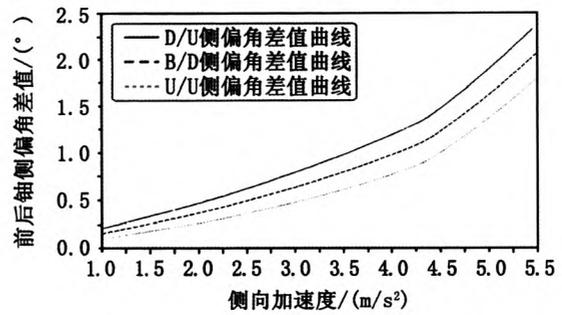


图7 侧偏角差值随侧向加速度的变化

Fig.7 The curve of  $(\delta_1 - \delta_2)$  with lateral acceleration

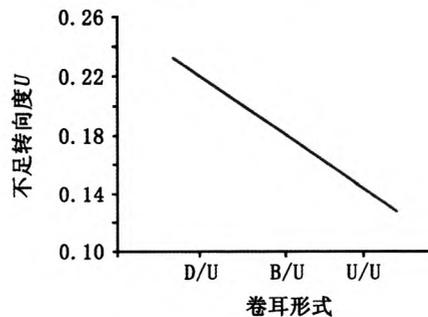


图8 不同卷耳形式下整车的不足转向度

Fig.8 The diagram of the curve of  $U$

4 结论

1)建立的钢板弹簧动力学模型能够准确地模拟钢板弹簧垂向刚度特性,具有较高的精度,为悬架特性分析及整车性能研究奠定了基础;

2)不同卷耳形式对钢板弹簧的承载特性影响很小。其中,随前卷耳位置的上移,钢板弹簧主簧刚度几乎不变,复合刚度随前卷耳位置的上移有所降低。

3)对于后悬架来说,随卷耳位置的提高,车辆的不足转向度逐渐降低。因此,(下转第 112 页)

- [4] LIU B. Some research problems in uncertainty theory [J]. Journal of Uncertain Systems, 2009, 3(1): 3 - 10.
- [5] LI X, LIU B. Hybrid logic and uncertain logic [J]. Journal of Uncertain Systems, 2009, 3(2): 83 - 94.
- [6] LIU B. Uncertain set theory and uncertain inference rule with application to uncertain control [J]. Journal of Uncertain Systems 2010, 4(2): 83 - 98.
- [7] LIU B. Uncertain risk analysis and uncertain reliability analysis [J]. Journal of Uncertain Systems, 2010, 4(3): 163 - 170.
- [8] LIU B. Theory and practice of uncertain programming [M]. Berlin: Springer - Verlag, 2009.
- [9] BHATTACHARYYA R. Uncertainty theory based novel multi - objective optimization technique using embedding theorem with application to R and D project portfolio selection [J]. Applied Mathematics, 2010, 1(1): 189 - 199.
- [10] GAO X. Some properties of continuous uncertain measure, International Journal of Uncertainty [J]. Fuzziness and Knowledge - Based Systems, 2009, 17(3): 419 - 426.
- [11] GAO X, GAO Y, RALESCU D. On Liu's inference rule for uncertain systems [J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge - Based Systems, 2010, 18(1): 1 - 11.
- [12] LIU W, XU J. Some properties on expected value operator for uncertain variables [J]. Information: An International Interdisciplinary Journal, 2010, 13(5): 1693 - 1699.
- [13] PENG Z, IWAMURA K. A sufficient and necessary condition of uncertainty distribution [J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2010, 13(3): 277 - 285.
- [14] LIU Y, HA M. Expected value of function of uncertain variables [J]. Journal of Uncertainty Systems, 2010, 4(3): 181 - 186.
- [15] WANG X, PENG Z. Method of moments for estimating uncertainty distribution [OL]. <http://orsc.edu.cn/online/100408.pdf>.
- [16] WANG X, GUO H. Uncertain variance of sample and its application [J]. Information: An International Interdisciplinary Journal, 2011, 14(1): 79 - 87.
- [17] WANG X, GAO Z, GUO H. Delphi method for estimating uncertainty distributions [J]. Information: An International Interdisciplinary Journal, to be published.
- [18] GAO J. Determine uncertainty distribution via Delphi method [J]. Proceeding of the First Conference on Uncertainty Theory, Urumqi, 2010.
- [19] WANG X, GAO Z, GUO H. Uncertain hypothesis testing for expert's empirical data [OL]. Mathematical and Computer Modelling, <http://orsc.edu.cn/online/100408.pdf>, to be published.
- [20] LIU Y. How to generate uncertain measure [M]. Proceedings of Tenth National Youth Conference on Information and Management Sciences, Luoyang China, 2008 (In Chinese).

(责任编辑 刘存英)

(上接第 86 页)

如果在轮胎等其他因素产生过大的过度转向(不足转向)时,可以选取适当的卷耳形式,通过降低(提高)卷耳位置来获得期望的不足转向度。

#### 参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 王望予. 汽车设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 侯宇明. 商用车板簧建模及整车性能指标分解与综合关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [4] 胡海军. 双排桩 - 锚杆支护的有限元模拟 [J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(11): 44 - 47.
- [5] 黄颖, 张金霖. 福建省某高速公路匝道桥梁顶升有限元程序分析 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2012, 25(5): 87 - 90.
- [6] 李刚. 渐变刚度钢板弹簧后悬架有限元与动力学建模及仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [7] 韩翔. 基于 ADAMS 的钢板弹簧动力学建模方法及性能仿真 [J]. 机械设计与制造, 2009(10): 12 - 15.

(责任编辑 马立)