

基于 LS-DYNA 的汽车悬置系统静态刚度建模方法研究

郝文静，廖慧红，黄卫，李根，丁智，彭鸿

（吉利汽车研究院（宁波）有限公司，宁波 315000）

摘要：汽车悬置系统的静态刚度建模方式在一定程度上会影响整车低速碰撞模型的仿真精度。本文通过悬置系统静态刚度的仿真与试验对比，探究悬置中橡胶材料参数以及局部建模方式对仿真结果的影响，并建立了精度较高的后悬置系统静态刚度仿真模型。将此建模方法应用于右悬置系统，可同样提高其模型仿真精度。最终可得出结论，此橡胶材料参数设置与局部建模方式可有效提高模型仿真精度，进而指导低速碰撞工况下的悬置建模。

关键词：悬置；刚度；橡胶；仿真

随着整车项目开发周期以及研发成本管控的日益严格，仿真分析手段在项目开发中的作用越来越重要。使用仿真分析方法进行安全性能验证，可有效减少碰撞试验次数、指导方案优化、降低开发成本。因此，对于项目开发而言，提高仿真模型的精度也显得尤为重要。

本文基于某整车项目中悬置系统子系统试验，利用 LS-DYNA 的显式求解器对悬置系统静态刚度进行仿真分析，依据试验结果探究橡胶材料、建模对仿真结果的影响。通过修正悬置模型中的橡胶材料参数与局部建模方式，达到提高悬置静态试验仿真精度的目的，从而为整车低速碰撞工况提供可靠的模型输入。

1 悬置系统静态刚度试验介绍

悬置系统的静态刚度是指悬置系统在静态载荷下抵抗变形的能力，静载荷与之产生的位移成正比关系，其比值即为悬置的静态刚度。文中涉及的悬置系统静态刚度试验在 MTS 弹性体试验机上进行，如图 1 所示。试验前，悬置系统保持与整车中的安装状态一致并通过工装固定于试验台架上，试验时通过图 1 所示的装置以 10 mm/min 的速度对零件施加循环载荷。载荷的 R_{max} 与 R_{min} 按照工程图纸上的要求确定， R_0 表征悬置自由状态下承受的自重，不同受力方向的循环载荷如表 1 中所示。

加载方向	R_0	$R_{max}(N)$	$R_{min}(N)$
X	---	$R_0 + 6000$	$R_0 - 6000$
Y	---	$R_0 + 1000$	$R_0 - 6000$
Z	---	$R_0 + 6000$	$R_0 - 6000$

表 1. 悬置静态刚度加载载荷

循环载荷如图 2 所示，每次循环载荷结束后允许有 30 s 的恢复时间，并保持 20 N 的少量预载，从第四个循环开始记录从 20 N 到 R_{max} ，再到 R_{min} ，再到 R_{max} 的曲线，得到如图 3 所示的静态刚度曲线。

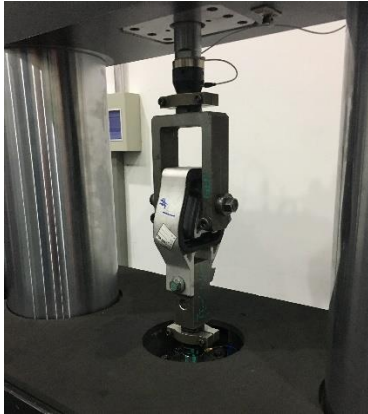


图 1 悬置系统静态刚度测试

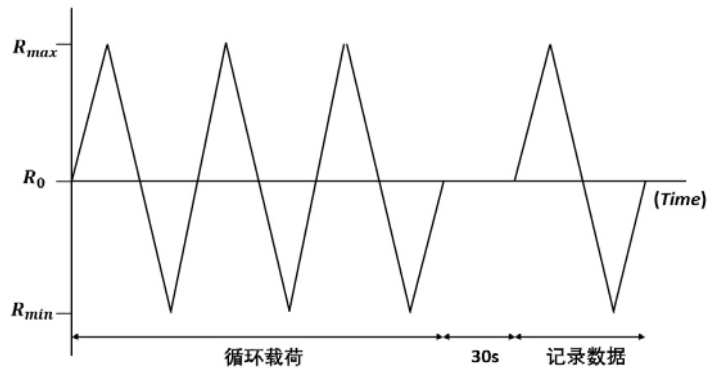


图 2 悬置系统静态刚度测试循环载荷

静态刚度曲线处理方法：如图 3 所示，在 $R_1 \sim R_2$ 范围内读取变形量 δ_1^+ , δ_1^- , δ_2^+ , δ_2^- ，保证 R_1 和 R_2 的取值在线性段区域内，并根据式 (1.1) 计算得出静态刚度 K_S 。依据试验规范要求，本文中涉及的悬置系统静态刚度取值范围为 -150N~150N，因此 R_1 取值为 -150N， R_2 取值为 150N。

$$\begin{aligned}
 K_S &= (R_2 - R_1) / (\delta_2 - \delta_1) \\
 \delta_1 &= (\delta_1^+ + \delta_1^-) / 2 \\
 \delta_2 &= (\delta_2^+ + \delta_2^-) / 2
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

式中 K_S -----悬置静态刚度 (N/mm)；

δ_1^+ , δ_1^- , δ_2^+ , δ_2^- , δ_1 , δ_2 -----悬置变形量 (mm)；

R_1 、 R_2 ----- 静载力 (N)。

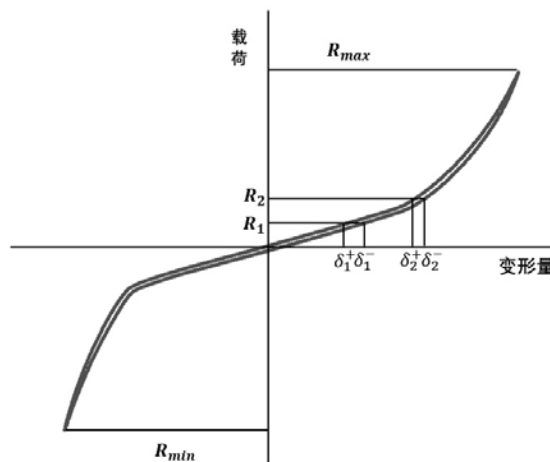


图 3 悬置系统静态刚度曲线

2 悬置系统仿真建模

前处理建模利用 ANSA 软件，采用实体单元对几何模型进行网格划分，为保证仿真精度与计算效率，悬置壳体与悬置橡胶的平均单元尺寸分别选择 5.4 mm 与 3.5 mm。文中涉及的仿真模型分别为整车中的后悬置与右悬置，并依据试验状态建立相应的边界条件。悬置本体赋予其相应的材料属性，试验工装材料定义为刚体，并通过材料卡片约束工装的运动方向。后悬置在 X 方向进行加载，右悬置在 X、Y、Z 三个方向分别进行加载，建立了如图 4 所示的悬置系统静态刚度分析有限元模型。

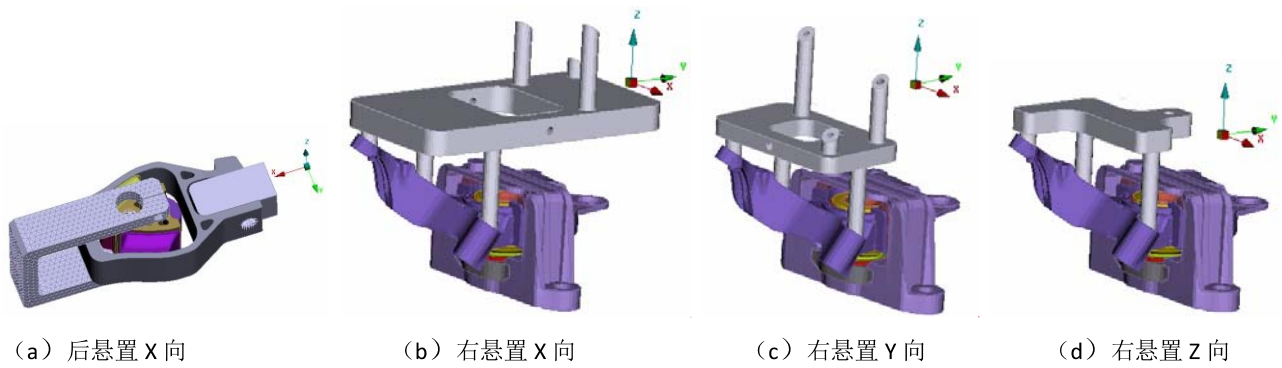


图 4 悬置系统静态刚度分析有限元模型

3 悬置静态刚度试验仿真对标与验证

3.1 橡胶材料参数修正

橡胶是悬置系统的主要组成部分，其静态力-位移特性在控制汽车的操作稳定性方面起着非常重要的作用^[1]。在汽车碰撞模型中，针对橡胶衬套主要有两种模拟方式，一种是利用三个相互垂直的弹簧单元进行模拟，即星形三弹簧单元的建模方式，对弹簧单元分别赋予试验测得的三个方向的静态力-位移曲线，只考察其对输入的响应；另一种是对橡胶进行实体单元建模，赋予其实际的材料参数，并定义相应的接触等^[2]。第一种建模方式不需要考虑材料的本构关系，建模要求简单，但需要在项目前期对悬置系统进行大量的试验获得性能曲线，往往不满足项目开发时间节点要求，同时也存在项目后期设计变更风险；第二种建模方式无需进行大量试验，在设计初期即可开展相关仿真性能评估，但橡胶材料本构参数难以确定，且容易出现因橡胶单元负体积而计算终止的错误。

文中涉及的悬置系统直接取自整车碰撞模型，橡胶采用实体单元模拟。对此后悬置进行静态刚度试验仿真，得到如图5所示的载荷位移曲线，依据试验曲线处理方式可知，曲线中线性段b-c段的斜率即为悬置静态刚度。对比曲线可知，仿真中后悬置模型的静态刚度与试验结果相比略大，仿真中橡胶材料参数与实际橡胶材料相比误差较大，需进行对标修正。本文中橡胶材料的本构选择MAT7_BLATZ-KO_RUBBER，此材料卡片仅需设置密度RO与剪切模量G，泊松比 μ 固定为0.463^[3]。已知此发动机悬置的橡胶硬度在40 HA~50 HA之间，由式（3.1）、式（3.2）可得出橡胶的剪切模量G的范围为0.58 Mpa~0.84 Mpa。

$$E = \frac{15.75 + 2.15HA}{(100 - HA)} \quad (3.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.2)$$

式中 E ----- 弹性模量 (Mpa);
 G ----- 剪切模量 (Mpa);
 HA ----- 邵氏硬度 (Mpa);
 μ ----- 泊松比。

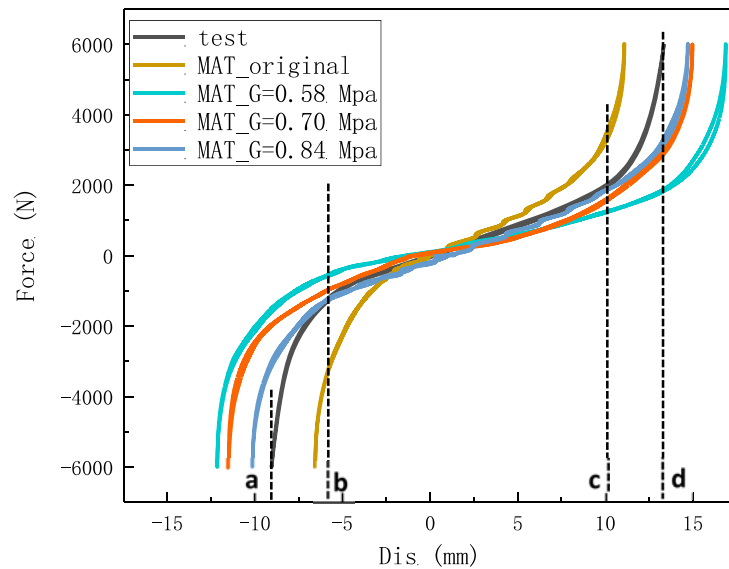
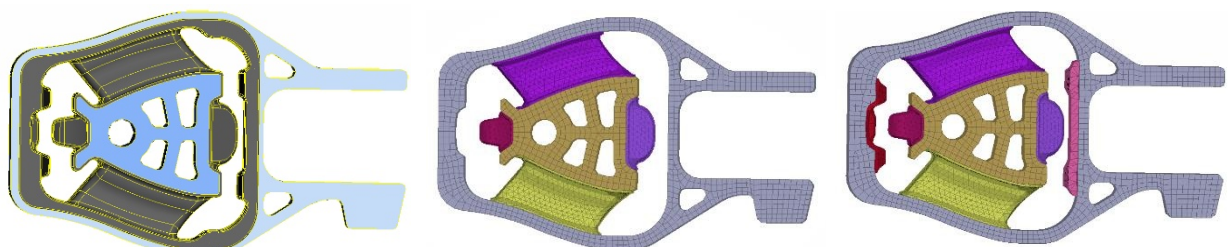


图 5 后悬置系统静态刚度仿真与试验结果对比

悬置橡胶材料剪切模量分别取值 $G_1=0.58$ Mpa, $G_2=0.70$ Mpa, $G_3=0.84$ Mpa, 得到后悬置系统静态刚度曲线如图5所示, 由曲线对比可以看出, 当橡胶材料剪切模量 G 分别取值为0.58 Mpa和0.70 Mpa时, 仿真结果在b-c段的斜率明显小于试验, 且在a-b段与c-d段, 橡胶位移比试验结果偏大, 表明此时仿真中橡胶材料偏弱。当橡胶材料的剪切模量 $G=0.84$ Mpa时, 仿真所得的载荷位移曲线与试验曲线在线性段b-c段内一致性较好, 曲线斜率相当。由此可知, 悬置橡胶的材料本构选择MAT7_BLATZ-KO_RUBBER, 材料密度 $\rho=1.98E-6$ kg/mm³, 剪切模量 $G=0.84$ Mpa, 泊松比 $\mu =0.493$ 时, 可有效模拟悬置系统在静态下的变形。

3.2 仿真模型修正

由图5仿真与试验结果对比可知, 在b-c段, 仿真曲线与试验结果一致性较好, 而在a-b段与c-d段, 仿真中的位移明显大于试验结果, 分析原因可知, 在悬置零件实物与CAD数据中, 壳体表面还包有一层橡胶结构, 并与悬置壳体通过硫化连接, 如图6 (a) 中所示。在整车模型特别是高速碰撞工况中, 此处结构对结果影响较小, 在建模中往往直接忽略, 建模方式如图6 (b) 中所示。在静态零部件试验中此处存在橡胶间的挤压变形, 并影响试验位移, 因此需要在仿真中增加此处橡胶建模。考虑到与壳体硫化连接的大部分橡胶厚度在1.0 mm~2.0 mm之间, 若全部进行实体建模则会增加模型因负体积而报错的几率, 因此本文根据试验具体情况, 选择橡胶挤压关键区域进行局部更新, 更新后仿真模型如图6 (c) 所示, 并对其赋予对标后的橡胶材料参数, 得到静态刚度仿真结果如图7所示。



(a) 后悬置 CAD 数据 (b) 后悬置基础仿真模型 (c) 后悬置仿真模型 (新增局部橡胶)

图 6 后悬置 CAD 与仿真模型结构

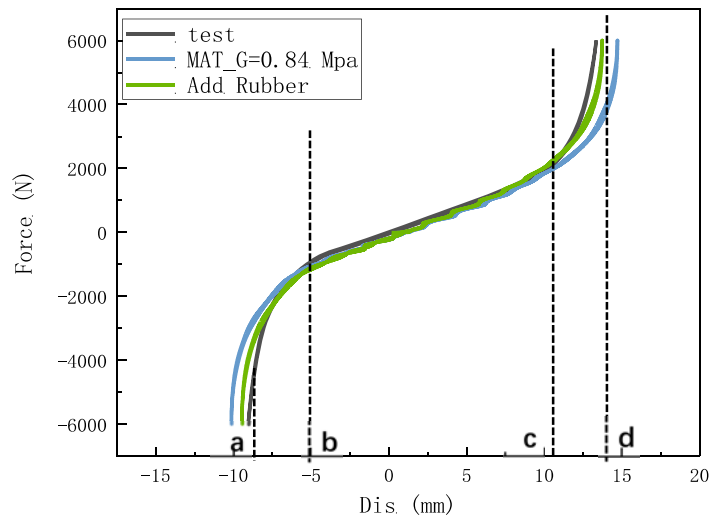


图 7 更新橡胶结构后仿真与试验结果对比

由图7中曲线对比可知，在悬置模型中新增局部橡胶结构后，仿真曲线在a-b段以及c-d段位移减小，与试验结果更加贴合，且模型计算稳定，未出现单元负体积的错误。

3.3 橡胶材料及建模方法验证

由上述探究结果可知，当悬置橡胶材料定义为MAT7_BLATZ-KO_RUBBER材料，密度 $\rho=1.98E-6 \text{ kg/mm}^3$ ，剪切模量 $G=0.84 \text{ Mpa}$ ，且局部更新悬置的橡胶建模时，可显著提高后悬置系统静态刚度的仿真精度。将此橡胶材料参数应用于此车型的右悬置模型中，并依据CAD数据更新细化了右悬置中X向，Y向及Z向的橡胶结构，主要为细化橡胶单元尺寸和依据CAD数据减少橡胶与悬置支臂之间的间隙，如图8所示。

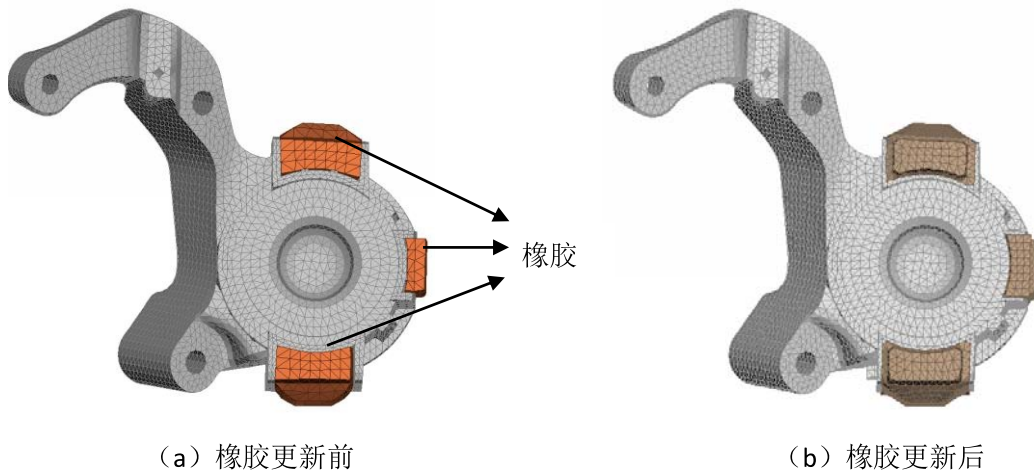


图 8 右悬置系统仿真模型更新

将更新后的模型按照实际试验建立边界条件与加载，得到右悬置X向，Y向及Z向的静态刚度曲线，仿真与试验结果对比图9所示。由结果对比可知，经过修正后的仿真模型得到的静态力-位移曲线，与试验曲线更接近，在静态刚度取值的线性段内斜率一致。虽然右悬置模型的仿真精度在更新橡胶材料和修正局部建模后有所提升，但仍和试验结果存在差异，分析原因是由于右悬置结构比其他悬置复杂，不仅有橡胶、铸铝和塑料，还存在液压结构，液压结构的准确模拟一直是仿真中难点问题，也是我们今后提升模型仿真精度的研究方向。

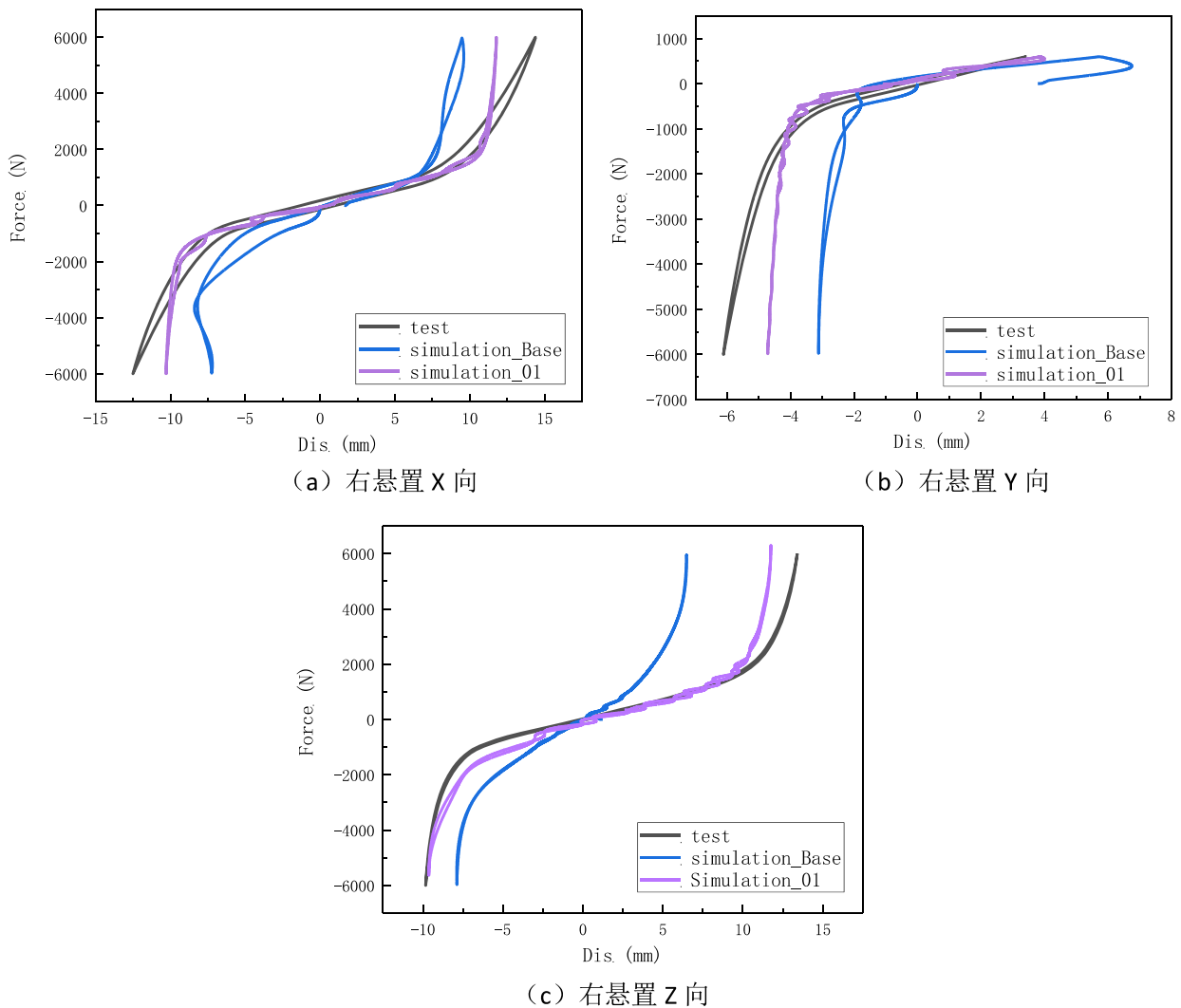


图 9 右悬置系统静态刚度仿真与试验结果对比

4 结论

1) 针对后悬置系统静态刚度试验结果，确定了合理的橡胶材料参数与建模方式。本文表明：悬置橡胶材料本构定义为 MAT7_BLATZ-KO_RUBBER，材料密度 $\rho=1.98E-6 \text{ kg/mm}^3$ ，剪切模量 $G=0.84 \text{ Mpa}$ ，泊松比 $\mu=0.493$ 时，可有效保证后悬置系统静态刚度的仿真精度。

2) 依据上述对标方法更新右悬置模型并进行静态刚度仿真验证，结果表明：此橡胶材料参数与局部结构更新策略可有效提高右悬置的静态刚度仿真精度，可指导低速碰撞工况中的悬置建模修正。

3) 右悬置仿真所得静态刚度曲线与试验结果趋势一致，但仍存在差异。分析原因是由于液压结构的模拟影响，后期需进一步进行验证优化。

参考文献

- [1] 陈茜.橡胶衬套静态力学行为研究 [D].重庆: 重庆理工大学,2014.
- [2] 胡耀威.发动机橡胶悬置衬套冲击试验及模拟研究 [D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2014.
- [3] 何小静.橡胶隔振器静态特性计算与建模方法的研究 [D].广州: 华南理工大学,2012.

Simulation Method Research of Vehicle Mount System About Static Stiffness Test Based on LS-DYNA

Hao Wenjing Liao Huihong Huang Wei Li Gen Ding Zhi Peng Hong

(Geely Automatic Research Institute Co. Ltd, Ningbo, 315000)

Abstract: Modeling method of mount system can affect the accuracy of vehicle impact model in low velocity. By comparing the test and simulation result of mount system static stiffness, the influence of rubber material parameters and modelling method has been studied, a more reliable simulation model about rear mount system is set up. Applying this method to the right mount system, the results showed that this modelling method can effectively improve the simulation accuracy and this modeling method can be used in low velocity impact model.

Key words: mount system; stiffness; rubber; simulation