

# 汽车减震器总成仿真建模及对标研究

蒋伟波<sup>1</sup>，黄卫<sup>1</sup>，廖慧红<sup>1</sup>，杨洪<sup>1</sup>，丁智<sup>1</sup>，彭鸿<sup>1</sup>

(1. 浙江吉利汽车研究院有限公司公司，宁波 315336)

**摘要：**有限元仿真方法在整车被动安全开发过程中有着广泛的应用，仿真结果与试验结果的一致性对整车开发过程中方案的优化和设计的改进有着重要的作用。本文详细介绍了汽车减震器总成的仿真建模方法，对减震器总成有限元建模中的连接关系、接触和数模简化等关键技术进行了研究和详细说明。并基于减震器系统动态冲击实验进行了仿真对标分析，最终总结出一套规范且有效的减震器系统建模方法。

**关键词：**减震器总成，速度特性曲线，动态冲击，仿真，对标

在计算机仿真技术诞生之前，汽车安全性能开发过程中往往要经历多轮的试验验证，这无疑增加新产品研发的时间和费用成本。随着计算机技术的发展、计算仿真精度的不断提升，有限元仿真手段在汽车安全性能开发过程中扮演的角色也越来越重要，它有着方便、灵活和快捷的优点。但是如何获得较高精度的有限元仿真结果，需要全面、科学的建模分析方法<sup>[1,2]</sup>。在整车模型的创建中，不单考虑整车碰撞模型本身的完整性<sup>[3]</sup>，还需要通过对具体的材料试验和零部件试验对标出真实的材料状态和零部件状态，从而提高整车碰撞仿真的精度。本文基于减震器系统动态冲击试验对减震器系统进行建模仿真分析对标，从而总结出一套规范且有效的减震器系统建模方法。

## 1 减震器系统简介

减震器系统是汽车重要的组成部分，其传递地面作用在车轮上的力与力矩给车身，同时保证车身和车轮按照特定的轨迹运动，从而保证汽车安全平地稳行驶。减震器将震动能量转化为油液热能，再由减震器吸收散发到空气中，从而消除路面带来的震动提高行驶稳定性，给驾驶者舒适感和稳定感。减震器系统在工作过程中，可以简化为一个弹簧阻尼质量模型，可用式(1)对该系统的运动进行描述。式中 $k$ 为弹簧刚度； $f_m$ 为阻尼； $x$ 为位移； $f$ 为外力； $t$ 为时间； $m$ 为质量。

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + f_m \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

本文分析对标的对象是如图(a)所示的弹簧阻尼减震器系统，减震器总成由减震器、下弹簧垫、防尘套、弹簧、减震垫、上弹簧座、轴承、顶胶和螺母构成。减震器弹簧的刚度和速度特性如图(b)和图(c)所示。

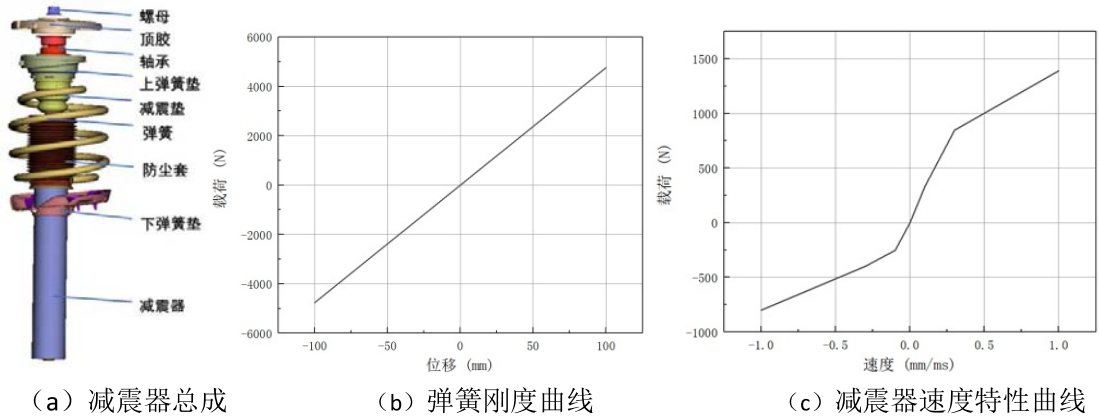


图 1 减震器结构及相关参数示意图

## 2 减震器系统建模

基于有限元分析软件 LS-DYNA 对减震器系统进行建模，如图 2 所示。套筒采用 shell 单元，单元尺寸为 5.4mm。减震垫和衬套结构采用四面体单元，单元尺寸为 5.4mm。对弹簧进行简化，使用 null shell 和 beam 单元创建用于接触的弹簧，使用一个通过弹簧中心线的 beam 单元来模拟实际的弹簧，并在梁单元上施加一个 2KN 的预载，弹簧的刚度为 0.029KN/mm，关键字卡片如图 3 所示。对减震器进行简化，使用两个 Cylindrical joint 铰链来模拟减震器的运动状态，使用一个 beam 单元来模拟减震器的阻尼，beam 单元选择 6 号单元公式，其关键字卡片如图 4 所示。整体模型采用 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE 接触，beam 单元之间采用 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_GENERAL 接触。

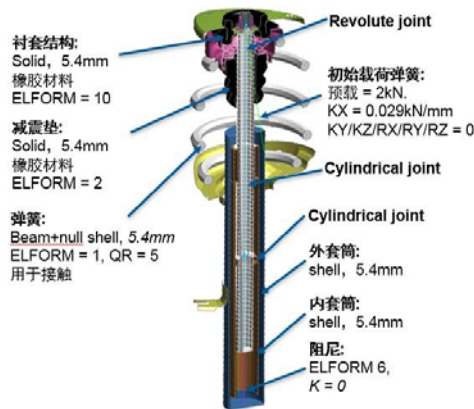


图 2 减震器有限元建模

```
*MAT_GENERAL_SPRING_DISCRETE_BEAM_TITLE
Spring_preload
$ MID RO
55220024 1.
$ DOF TYPE K D CDF TDF
1 1 0.029 0. 0. 0.
$ FLCID HLCID C1 C2 DLE GLCID
0 56020003 0. 0. 1. 0
```

图 3 弹簧单元材料设置

```
*SECTION_BEAM_TITLE
Suspension_Dumper
$ SECID ELFORM SCOOR
99559416 6 -2.
$ VOL INER CID
0.03 0.1 0
*MAT_GENERAL_SPRING_DISCRETE_BEAM_TITLE
Suspension_damper
$ MID RO
55220014 1.
$ DOF TYPE K D CDF TDF
1 0 0. 0. 0. 0.
$ FLCID HLCID C1 C2 DLE GLCID
0 56020006 0. 0. 1. 0
```

图 4 阻尼单元设置

### 3 减震器系统冲击试验

为了更准确地模拟减震器的动态特性，提高模型仿真精度，本文设计了一个减震器动态冲击试验，用于减震器系统的仿真对标。试验装置如图 5 所示，固定减震器下端，使用 60kg 落锤以自由落体的形式对其进行冲击。根据某车型正面 25% 偏置碰撞试验，得到在碰撞过程中该减震器与车身最大相对速度为 7.85m/s，参考此值，此处设置减震器冲击试验落锤下落时与减震器系统上端接触时的速度 8m/s。

对减震器进行 3 次试验，得到冲击时的位移载荷曲线如 6 所示，test2 相比其它两组试验碰撞载荷的第一个峰值偏小；test1 在位移为 35mm 时出现第二个峰值，这是因为在冲击试验前，对减震器预加载的过程中减震器内油液填充不够充分。总体而言 3 组试验的一致性较好，可基于这 3 组减震器动态冲击试验对接下来将要创建的减震器总成有限元模型进行对标分析及修正。



图 5 阻尼单元设置

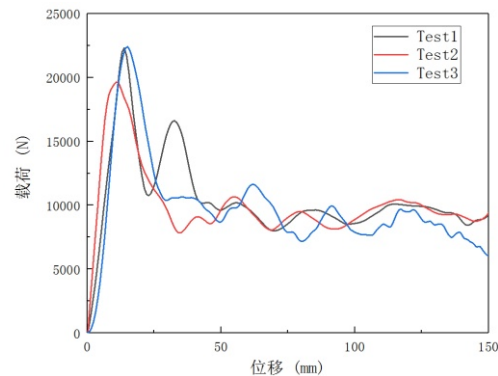


图 6 冲击位移载荷曲线

### 4 减震器系统仿真对标

根据试验工况建立如图 7 所示的减震器动态冲击模型，约束减震器下端 6 个自由度，上端用一个质量为 60kg，大小为 600mm\*600mm 的刚性墙以 8m/s 的初始速度对减震器上端进行冲击。使用 LS-Dyna 求解器对动态冲击过程进行求解<sup>[4,5]</sup>，显示求解的动力学方程如式 2 所示， $K$ 为刚度矩阵； $C$ 为阻尼矩阵； $M$ 为质量矩阵； $f$ 为外载荷； $\ddot{Z}$ 为加速度矢量； $\dot{Z}$ 为速度矢量； $Z$ 为位移矢量； $t$ 为时间。

$$M\ddot{Z}(t) + C\dot{Z}(t) + KZ(t) = f(t) \quad (2)$$

减震器系统动态冲击仿真得到如图 8 所示的位移载荷曲线。仿真与试验的冲击位移载荷曲线变化趋势基本一致，位移在 20mm 之前冲击载荷达到峰值，但仿真曲线的第一个峰值与试验相比偏大，这是因为模型输入的速度特性曲线中最大的冲击速度仅为 1m/s，而仿真的冲击速度为 8m/s，因此需要对模型输入的速度特性曲线进行外推插值。对减震器特性曲线速度线性外推后得到新的速度特性曲线如图 9 所示。

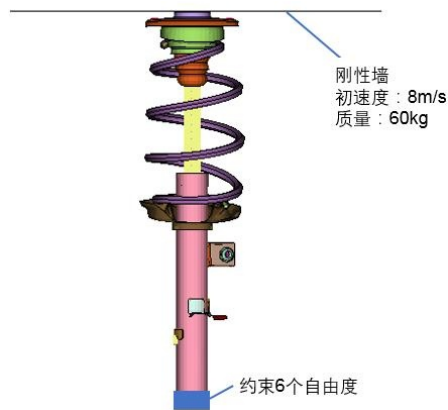


图 7 动态冲击有限元模型

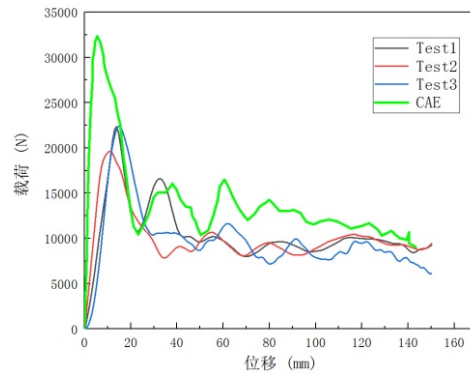


图 8 试验仿真冲击位移载荷曲线

对修正速度特性曲线后的减震器动态冲击模型重新提交计算，得到减震器冲击仿真的位移载荷曲线如图 10 所示。位移达到 30mm 之前，试验和仿真的最大载荷以及达到最大载荷时的位移相差很小；位移达到 30mm 之后，试验和仿真的位移载荷曲线基本一致。上述表明修正后的减震器系统仿真模型达到了较高的精度。

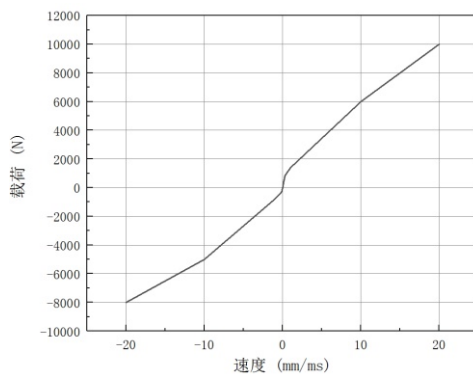


图 9 修正后的速度特性曲线

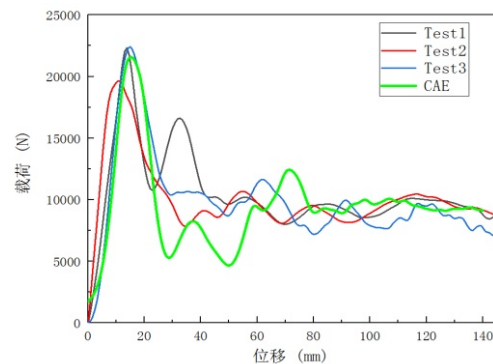


图 10 试验仿真冲击载荷位移曲线

## 5 结论

本文详细介绍了汽车减震器系统基于 LS-Dyna 的建模方法，为了更准确地模拟减震器的动态特性设计了减震器动态冲击试验，并对减震器系统模型进行对标仿真分析。基于减震器动态冲击试验，对减震器速度特性曲线进行修正，最终得到精度较高的仿真模型。本文减震器系统的建模及对标方法对于同类型的减震器系统的建模以及提高减震器系统仿真精度具有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 钟志华. 汽车碰撞安全技术[M]. 北京: 机械工业出版社.
- [2] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 张荣荣, 陈华全. 汽车排气管总成仿真建模及对标 [J]. 2013 汽车工程学会论文集, 2013.
- [4] Livermore Software Technology Corporation [R]. LS-Dyna KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II Material Models. 2018.
- [5] Livermore Software Technology Corporation [R]. LS-Dyna KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I APPENDIX A: User Defined Materials. 2018.