

The Study and Application of Simply Modeling Method in Mounting Rubber Bushing

Jian Shi

School of Mechanical-Electrical & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: To improve the calculation accuracy of the vibration isolation rate, the simply modeling method of mounting rubber bushing in full vehicle finite element model is studied. The 5 parametric generalized Maxwell model is selected to describe the dynamic characteristics of the mounting rubber bushing. The finite element mounting rubber bushing model is constructed, and the dynamic stiffness curve is analyzed. By fitting the dynamic stiffness curve and the 5 parametric generalized Maxwell model, 5 parameters is got, and the 5 parametric generalized Maxwell model is constructed in full vehicle finite element model. The results of the vibration isolation rate shows this simplified model method in mounting rubber bushing can improve the accuracy effectively.

Keywords: Mounting; Rubber bushing; Vibration isolation rate; Simply modeling method

悬置橡胶衬套简化建模方法研究及应用

时健

重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆, 中国 400074

摘要: 为提高悬置隔振率分析精度, 对有限元模型中悬置橡胶衬套简化建模方法进行了研究。选取 5 参数广义 Maxwell 模型来描述悬置橡胶衬套动态特性。建立悬置橡胶衬套有限元模型, 计算出动刚度曲线。将悬置橡胶衬套动刚度曲线与 5 参数广义 Maxwell 模型进行参数拟合, 得出各参数值, 并在整车有限元模型中建立 5 参数广义 Maxwell 橡胶衬套模型。隔振率计算结果表明, 这种新型的悬置橡胶衬套简化建模方法可以有效地提高悬置隔振率计算精度。

关键词: 悬置; 橡胶衬套; 隔振率; 简化建模

1 引言

悬置系统应具有适当的隔振性能, 减小发动机的激励向车身及底盘的传递, 提高乘坐舒适性 [1]。发动机悬置橡胶衬套是悬置系统的重要组成部分, 是广泛应用于汽车上的隔振元件, 其动态特性对悬置隔振性能具有重要影响。悬置隔振性能通常以隔振率表示, 通过分析悬置隔振率, 可以对整车 NVH 性能改进提供依据。然而目前来说, 隔振率分析主要依赖于试验, 主要因为在当前的有限元模型中, 由于橡胶材料力学性能复杂, 将悬置橡胶衬套简化为一个固定刚度值进行建模, 不能完全表现出其动态特性, 导致隔振率分析精度较低。

某 MPV 车型在怠速时出现右悬置 Z 向 (车高方向) 隔振率不足问题, 由于整车有限元模型中悬置橡胶衬套模型建模方式过于简单, 导致对隔振率进行有限元分析时无法重现此现象。为提高整车有限元模型

中悬置隔振率分析精度, 对悬置橡胶衬套简化建模方法进行了研究。基于 5 参数广义 Maxwell 模型, 提出一种新型的悬置橡胶衬套简化建模方法, 并将其应用到悬置隔振率分析中。

2 橡胶材料粘弹性力学模型

橡胶材料动态特性主要受激振振幅和激振频率的影响, 频率相关性由橡胶材料的黏弹性决定, 振幅相关性则由橡胶材料的摩擦特性决定 [2]。悬置隔振率用以衡量悬置在不同激励频率下的隔振效果, 故仅考虑悬置橡胶衬套的激振频率影响。为描述悬置橡胶衬套动态特性, 首先应选取准确的粘弹性力学模型。

为了能够在较宽的频率内准确描述橡胶材料的动态特性, 文献 [3] 提出用若干 Maxwell 模型替 Kelvin-Voigt 模型中的理想黏壶, 得到广义 Maxwell 模型。考虑到引入过多参数会导致计算过于复杂, 选取 5 参数广义 Maxwell 模型来描述悬置橡胶衬套的动态特

性，如图 1 所示， K_i 为理想弹簧的模量， C_i 为理想黏壶的粘度。

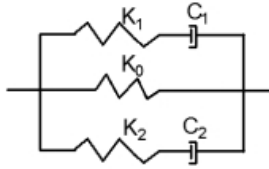


Figure 1.5 Parametric Generalized Maxwell Model
图 1.5 参数广义 Maxwell 模型

其运动方程为：

$$s = K_0 se + \frac{K_1 C_1 se}{K_1 + C_1 s} + \frac{K_2 C_2 se}{K_2 + C_2 s} \quad (1)$$

储存模量：

$$K_{storage}(w) = K_0 + K_1 \frac{w^2 t_1^2}{1 + w^2 t_1^2} + K_2 \frac{w^2 t_2^2}{1 + w^2 t_2^2} \quad (2)$$

损耗模量：

$$K_{loss}(w) = K_1 \frac{w t_1^2}{1 + w^2 t_1^2} + K_2 \frac{w t_2^2}{1 + w^2 t_2^2} \quad (3)$$

橡胶材料动刚度：

$$K_{dyn} = \sqrt{K_{storage}(w)^2 + K_{loss}(w)^2} \quad (4)$$

3 悬置橡胶衬套动态特性仿真分析

为解决某 MPV 车型右悬置 Z 向隔振率不足问题，首先对其右悬置橡胶衬套动态特性进行分析，得出详细的动刚度曲线。在 Abaqus 中建立悬置橡胶衬套有限元模型，如图 2 所示。

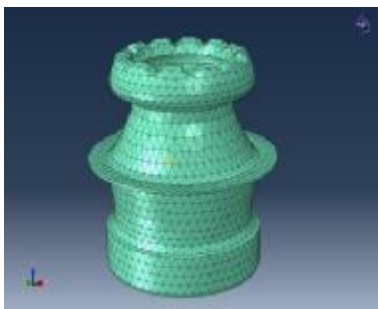


Figure 2. The Finite Element Model of Mounting Rubber Bushing
图 2. 悬置橡胶衬套有限元模型

网格尺寸为 8mm，采用四面体网格完成划分，网格总数为 35685。采用 Mooney-Rivlin 本构模型来描述其超弹性，采用 Prony 级数来描述其粘弹性。材料本构参数由悬置橡胶衬套供应商提供，详见表 1。

Table1. Rubber Material Constitutive Parameters
表 1. 橡胶材料本构参数

Mooney-Rivlin 本构模型			Prony 级数			
i	m_i	a_i	i	g_i	k_i	t_i
1	0.321	0.042	1	0.235	0.042	0.633
2	0.019	0.001	2	0.201	0.002	0.024
3	0.743	0.001	3	0.074	0.003	0.002

模拟橡胶衬套工作状态，在中间施加 6 个方向自由度约束，保持中间轴不动，在外圈施加强迫位移，预紧橡胶衬套。施加 1mm 的轴向振幅位移激励，采用直接稳态响应算法进行动刚度曲线计算，求得具体动刚度曲线，如图 3 所示，用于与 5 参数广义 Maxwell 模型进行参数拟合。

4.5 参数广义 Maxwell 模型建模

为实现悬置橡胶衬套的简化建模，需要对 5 参数广义 Maxwell 模型进行参数识别。将悬置橡胶衬套动刚度曲线导入 Origin，利用 Origin 自带的拟合函数功能，将动刚度曲线与 5 参数广义 Maxwell 模型推导出的动刚度计算公式（4）进行参数拟合，直至满足精度要求，如图 3 所示。

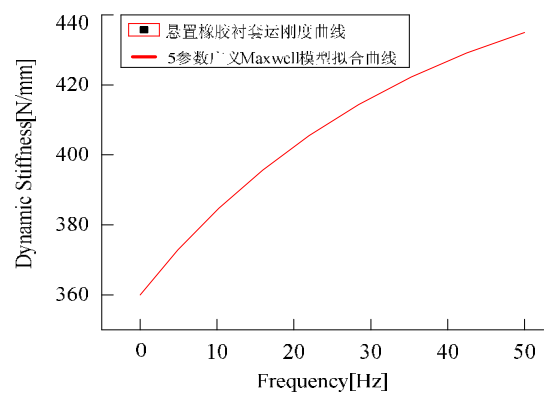


Figure 3. The Fitting Results of 5 Parametric Generalized Maxwell model

图 3.5 参数广义 Maxwell 模型参数拟合结果

得到 5 参数广义 Maxwell 模型中各参数值，如表

2 所示。

Table 2.5 Parameters of Generalized Maxwell Model Parameters
图 2.5 参数广义 Maxwell 模型参数值

	K0	K1	K2	C1	C2
参数值	363	25.65	19.51	7.53	4.53

在有限元模型中，悬置橡胶衬套由 CBUSH 单元模拟，CBUSH 单元是 Hypermesh 建模中常用的一种连接单元，可用于最多定义六个方向的刚度和阻尼，由两个节点，连接成一个线单元，并具有频率相关性。以往对悬置橡胶衬套简化建模时，由一个 CBUSH 单元连接悬置主动侧与悬置被动侧，仅对其赋予一个固定刚度值，因此不能表现出悬置动态特性。参照 5 参数广义 Maxwell 模型结构，在有限元模型中，利用 5 个 CBUSH 单元的线性组合，建立新的悬置橡胶衬套简化模型。

5 悬置隔振率分析

问题 MPV 车型怠速激励频率约为 24Hz，发动机转速为 720r/min。为解决此问题，通过 Hypermesh 建立整车有限元模型，网格划分以 CQUAD4 四边形单元为主，尺寸为 8mm，少数区域以 CTRIA3 三角形单元进行过渡，网格单元总数为 2359641，三角形单元比例为 4.9%，满足模型精度要求。焊点采用 CWELD 单元进行模拟，螺栓用 RBE2 单元进行模拟，材料属性根据 BOM 表赋予。



Figure 4. The Finite Element Model of the Full Vehicle
图 4. 整车有限元模型

悬置隔振率是指悬置支架主动端加速度响应有效值 a_1 与悬置支架被动端加速度响应的有效值 a_2 比值取对数的 20 倍，即： $T_{db} = 20 \lg \frac{a_1}{a_2}$ 。

对 MPV 车型来说，通常要求：

$$T_{db} \geq 20, \text{ 即 } \frac{a_1}{a_2} \geq 10$$

由上式可知，要在整车有限元模型中进行隔振率分析，可简化为对悬置主动侧接附点、悬置被动侧接附点加速度响应进行分析。采用 5 参数广义 Maxwell 模型的简化建模方法对悬置橡胶衬套进行建模，采用 NASTRAN 软件的频率响应模块的模式叠加法 (SOL 111) 计算悬置支架主动侧、被动侧的加速度。激励频率为 0~50Hz，频率步长 0.5Hz，在发动机质心的 Z 方向施加 1 N 的简谐单位力，输出支架主动侧、被动侧的加速度的 Z 向加速度响应值。选择 0~100 Hz 范围内的柔性模态进行叠加计算。有限元隔振率分析结果如图 5 所示。

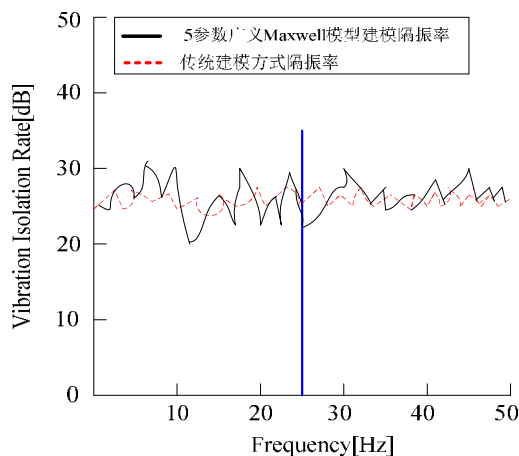


Figure 5. Vibration Isolation Ratio Analysis Results
图 5. 隔振率分析结果

由图 5 可知，在怠速即激励为 24Hz 时，5 参数广义 Maxwell 模型建模隔振率为 18.1，传统建模方法隔振率为 23.2。而试验部门提供右悬置在怠速时 Z 向隔振率为 17.3。将试验部门提供怠速时隔振率数据与有限元分析结果对比，如表 3 所示。

Table 3. Comparison of Vibration Isolation Ratio Analysis Results
表 3. 隔振率分析结果对比

	分析值	试验值	误差
5 参数	18.1	17.3	4.62%
传统	23.2		34.10%

由表 3 可知，传统建模方式隔振率与试验相比误

差较大, 而 5 参数广义 Maxwell 模型建模方法隔振率计算结果与试验结果对比, 误差为 4.62%, 满足精度要求, 能够表现出在 24Hz 附近隔振率不足的问题。

从悬置被动侧支架入手, 分析隔振率不足的原因。对悬置被动侧支架接附点进行原点动刚度分析, 结果如图 6 所示。

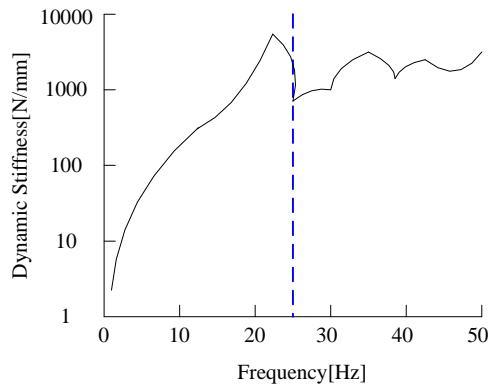


Figure 6. The Dynamic Stiffness of the Mounting Passive Side Holder

图 6. 悬置被动侧支架动刚度

悬置被动侧支架动刚度在 24Hz 处存在一个明显的波谷值, 仅为 607N/mm。通常来说, 悬置被动侧支架动刚度不应低于 5000N/mm, 由此可以判定, 隔振率不足的原因为悬置被动侧支架动刚度不足。同时, 这个结果从侧面验证了 5 参数广义 Maxwell 模型建模方法隔振率分析的准确性, 并为后续的隔振率优化指

明了方向。

6 结论

基于 5 参数广义 Maxwell 模型, 提出了一种新型的悬置橡胶衬套简化建模方法。采用这种建模方法, 对悬置隔振率进行有限元分析, 将分析结果与试验结果对比, 结果误差 4.62%, 满足精度要求。该建模方法能有效提高隔振率分析精度, 对后续隔振率优化提供了更为便捷的手段。

References (参考文献)

- [1] Wang Xiao-feng, Lin Ru-ning, Fu Yuan-fang. Finite element method of vibration isolation performance of powertrain mount system[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(10): 1-3.
- [2] Lei Gang, Liu Ying, Hu Peng, et al. A study on dynamic characteristics of rubber bushing. Science Technology and Engineering, 2015; 15(7): 74-78.
- [3] Sjöberg M, Kari L. Nonlinear Isolator Dynamics at Finite Deformations: An Effective Hyperelastic, Fractional Derivative, Generalized Friction Model[J]. Nonlinear Dynamics, 2003, 33(3):323-336.
- [4] PAN Xiao-yong. An investigation on modeling and calculation methods for dynamic properties of a rubber isolator[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [5] HE Man-jun, CHEN Xiao-wei, DONG Xi-xia. Polymer physics. Revised edition. [M]. Fudan University. 2000.
- [6] A.Stenti, D.Moens, P.Sas, et al. A three-level non-deterministic modeling methodology for the NVH behavior of rubber connections [J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(7):912-930.
- [7] Liu Zi-qiang, Analysis and optimization of dynamic and static characteristic of engine mount components[D].Hefei Ploytechnic University.
- [8] Xu Zi-cheng. Finite element analysis of rubber dynamic property [D]. Beijing University of Technology, 2012.