

不同预载下橡胶悬置高频动态特性的计算方法

李兴泉¹, 庞剑¹, 杨亮¹, 贾小利¹, 吴健翔², 殷智宏², 上官文斌²

(1. 重庆长安汽车股份有限公司汽车工程研究总院 重庆, 401120)

(2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

摘要 为了提升悬置高频动刚度计算精度, 研究了一种不同预载下橡胶悬置的高频动态特性的计算方法。首先, 测试了不同切向预应变下橡胶试片的动态特性, 根据橡胶试片的动态特性试验数据, 识别得到不同预应变下橡胶材料频域的黏弹性参数; 其次, 提出了一种在预载作用下, 橡胶悬置高频动刚度计算的有限元建模方法; 然后, 根据橡胶悬置在不同预载下各个单元的八面体切应变, 对悬置的单元进行分组, 为每一组单元输入相应的黏弹性参数; 最后, 基于建立的有限元建模方法, 计算了一款橡胶悬置的动态特性, 测试了橡胶悬置在不同预载下的动刚度。结果表明, 橡胶悬置的动刚度计算结果与试验结果的误差小于 10%。

关键词 动态特性; 黏弹性; 有限元法; 橡胶悬置; 预载荷

中图分类号 TH123; U463

引言

相比于内燃机的低频点火、机械和燃烧噪声, 电动汽车的主要噪声为电磁力和齿轮啮合导致的高频噪声^[1]。研究表明, 电驱动总成 2 500 Hz 以下频率的噪声主要通过结构路径传递至车内^[2], 因此动力总成悬置的隔振设计对车内噪声的控制至关重要。电动汽车悬置设计时应尽可能减小所关心的关键工况下悬置的静刚度和动静比^[1], 这对橡胶悬置在不同预载下的动态特性计算提出了更高的要求。近年来, 研究人员针对发动机的橡胶隔振器动态特性提出了众多模型并进行了试验验证^[3-5], 但其频率都局限于 200 Hz 以内。另外, 针对电动力总成的橡胶隔振器的动态特性研究^[6-8], 橡胶悬置动态特性的频率范围不再局限于 200 Hz 以内, 同时总结了结构改进对橡胶悬置动刚度的影响。但是, 以上都没有针对不同预载下橡胶悬置的动态特性进行深入研究。

笔者提出了一种橡胶悬置在不同预载下的高频动态特性的计算方法。首先, 参考试验标准制备了橡胶试样, 测试了不同切向预应变下橡胶试片的动态特性, 并根据橡胶试片的动态特性试验数据识别得到不同预应变下橡胶材料频域的黏弹性参数; 其次, 提出了一种有限元建模的方法, 根据橡胶悬置在相应工况下单元的八面体切应变, 对悬置的单元进行分组, 为每一组单元输入相应的黏弹性参数, 并基

于建立的有限元建模方法, 计算了一款橡胶悬置的动态特性; 最后, 测试并计算了该橡胶悬置在不同预载下的动态特性, 对比分析了计算与试验结果。

1 不同预应变下橡胶的动态特性试验

首先, 以橡胶试片为研究对象, 进行了橡胶试片在不同切向预应变下的动态特性试验, 从而识别得到多组橡胶材料的黏弹性参数。

本研究所有试验均在 M+P 公司的 HFDST-3000E 试验台上进行, 并参考《GB/T 13937—1992 分级用硫化橡胶动态特性的测定强迫正弦剪切应变法》制备了试样。该试样采用两个平行六面体橡胶件的双重夹层结构, 六面体的边长与厚度比为 5:1, 橡胶件的厚度为 3 mm。橡胶试片动态特性试验如图 1 所示。其中, 试样中与橡胶试片相连的上、下连接块均采用 6061-T6 铝合金材料。选用该材料的原因主要有: ①试样的一阶固有频率应尽可能地高, 以

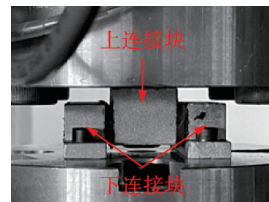


图 1 橡胶试片动态特性试验

Fig.1 Dynamic characteristic experiments of rubber specimen

避开动态特性频率范围,而铝合金材料密度相对较低;②铝合金的导热率较高,可以减小动态特性扫描时橡胶热累积对试验的影响。

笔者进行了橡胶试片在不同切向预应变下的动态特性试验,目的是获取橡胶材料在不同切向预应变下的黏弹性参数。试验中切向预应变分别为 0.0%, 16.5%, 32.2%, 46.4%, 58.8% 和 69.5%。当上连接块的位移为 2.5 mm 时,橡胶试片的切向预应变为 69.5%。如果增加上连接块的位移,上连接块与下工装之间的间隙过小,可能在动态特性试验中发生接触,因此上连接块最大位移为 2.5 mm。在进行橡胶试片动态测试之前,为了避免橡胶 Mullins 效应的影响,橡胶试片需进行 3 次加载-卸载预循环。载荷循环过程中上连接块承受的载荷最大值为 1 500 N,高于动态测试过程中的载荷最大值 1 125 N。

通过试验研究了橡胶的蠕变特性对橡胶动态特性试验的影响。当进行橡胶试片动态特性试验时,试片承受的载荷通过控制器维持在设定值,此时橡胶试片的应变会发生一定程度的变化。在完成 1 次 10 min 的动态特性试验后,橡胶试片的应变均发生了变化,具体体现在上连接块的位移变化上,位移变化分别为 0, 0.04, 0.02, 0.04, 0.04 和 0.02 mm。笔者通过连续 2 次动态特性试验来评估橡胶蠕变对橡胶试片动态特

性试验的影响,2 次试验的时间间隔为 20 min。蠕变对橡胶试片动态特性试验的影响评估如图 2 所示。可以看出,2 次试验的动态特性结果具备较好的一致性。完成 1 次试验的时间内,橡胶试片产生的蠕变对动态特性的影响极其微小,所以在本研究的动态特性试验中,橡胶蠕变的影响可忽略不计。

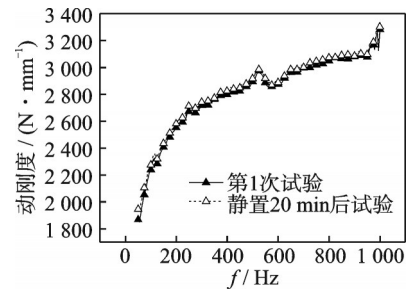


图 2 蠕变对橡胶试片动态特性试验的影响评估
Fig.2 Influence of creep on dynamic characteristics of rubber specimen

图 3 为橡胶试片在不同预应变下的动态特性试验结果,包含了橡胶试片在不同切应变下的动刚度与滞后角。由图可知:①在 50~1 000 Hz 的频率区间,橡胶试片的动刚度与滞后角具有明显的频率相关性,这与之前的研究结果^[9]吻合;②在 0.0%~69.5% 预切应变区间,橡胶试片的动刚度随切应变的增加呈现先下降后上升的趋势;在切应变为

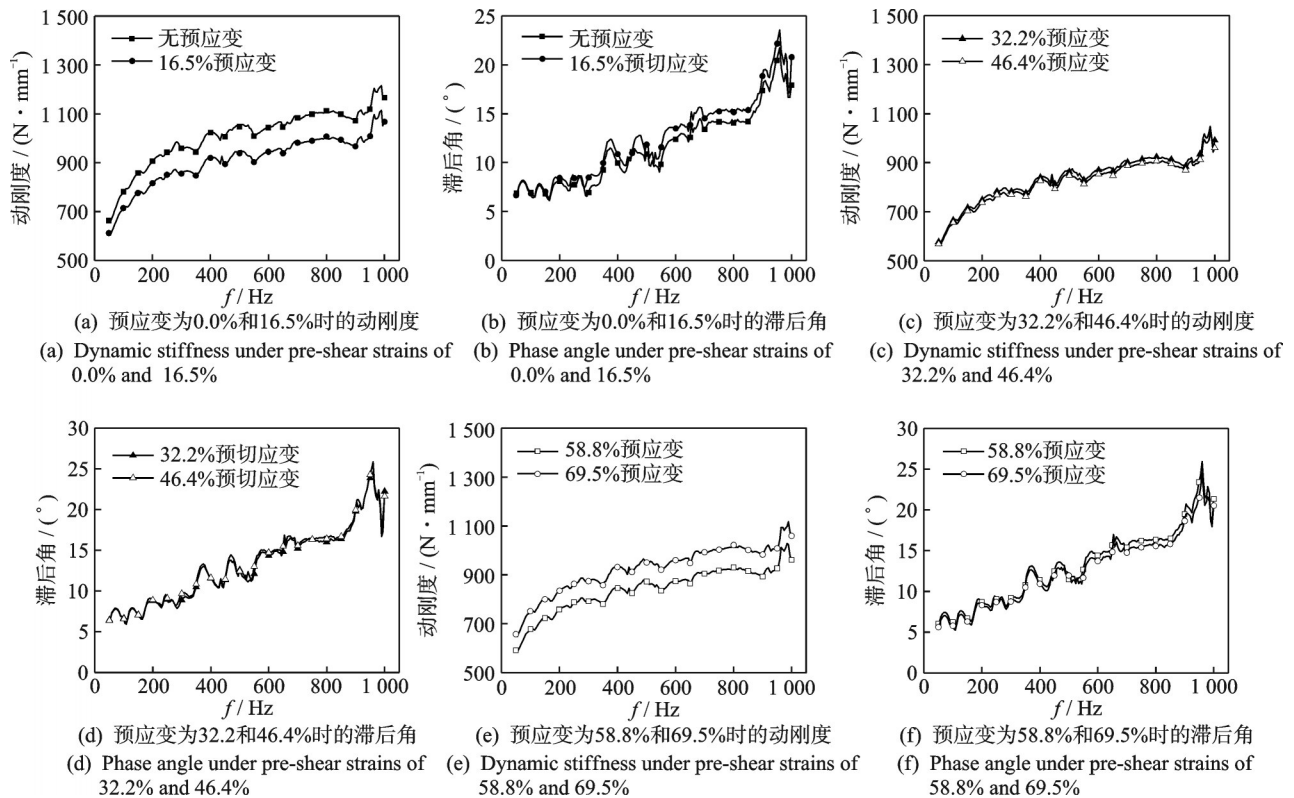


图 3 橡胶试片在不同切向预应变下的动态特性试验结果

Fig.3 Experiment results of dynamic characteristics of rubber specimen under different shear pre-strain

0.0%~32.2%的范围内,橡胶试片的动刚度随预切应变的增加而下降;在切应变为32.2%~58.5%的范围内,橡胶的动刚度变化趋于平缓;在切应变为58.5%~69.5%范围内,橡胶试片的动刚度随预切应变的增加而增加;③在0.0%~70.0%预切应变范围内,橡胶试片的滞后角曲线几乎重合。不同切向预应变下橡胶试片滞后角的试验结果极为相似,与切向预应变的数值无关。

2 橡胶本构模型及不同预应变下的本构模型参数识别

笔者选用Mooney-Rivlin超弹性-黏弹性叠加模型作为橡胶高频动刚度计算的本构模型。其中,Mooney-Rivlin超弹性本构能够较好地表征橡胶应变小于200%时的静态力学性能,即静刚度;黏弹性本构则表征橡胶材料的动态力学性能,即动刚度与滞后角等。

工程中常用的Mooney-Rivlin本构模型的应变能表达式为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + (J^{el} - 1)^2 / D_1 \quad (1)$$

其中: J^{el} 为弹性体积比; D_1 为材料模型常数。

基于单轴拉伸、平面剪切和等双轴拉伸等试验,通过最小二乘法拟合得到的Mooney-Rivlin本构参数^[10]见表1。

表1 拟合得到的Mooney-Rivlin本构参数

Tab.1 Mooney-rivlin constitutive parameters

本构参数	C_{10} / MPa	C_{01} / MPa
拟合数值	0.374 4	0.065 7

2.1 黏弹性参数的识别方法

在频域范围内,输入数据为橡胶试片的动态特性试验数据,需要识别的黏弹性参数为存储模量 G_s 与损耗模量 G_l 。通过线性插值的方法处理试验数据后,将试验测得的动刚度与滞后角代入式(2)可得到存储模量和损失模量,即

$$\begin{cases} G_s(\omega) = \frac{K_d}{2A} \frac{X_m(\omega)}{t_s} \cos(\varphi) \\ G_l(\omega) = \frac{K_d}{2A} \frac{X_m(\omega)}{t_s} \sin(\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_d 为试验测得的动刚度; φ 为试验测得的滞后角; $2A$ 为试片横截面的面积; X_m 为随频率变化的激励振幅; t_s 为试片的厚度。

归一化剪切松弛函数在频域的实部 $\omega \operatorname{Re}(g^*)$

和虚部 $\omega \operatorname{Im}(g^*)$ 的计算式为

$$\begin{cases} \omega \operatorname{Re}(g^*) = G_r(\omega) / G_\infty \\ \omega \operatorname{Im}(g^*) = 1 - G_r(\omega) / G_\infty \end{cases} \quad (3)$$

其中: G_∞ 为准静态剪切模量,由超弹性本构推得。

将参数 $\omega \operatorname{Re}(g^*)$ 和 $\omega \operatorname{Im}(g^*)$ 输入至商用有限元软件ABAQUS中表征黏弹性参数,以计算橡胶悬置的动态特性。部分黏弹性参数识别结果如图4所示。

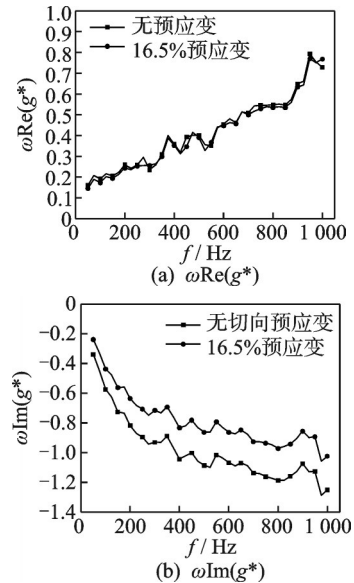


图4 部分黏弹性参数识别结果
Fig.4 Viscoelastic parameter identification results

2.2 本构模型的验证

基于有限元软件对橡胶试片试验工装进行有限元建模,均采用六面体网格对模型进行划分。橡胶试片有限元模型如图5所示。橡胶部分的网格类型设置为C3D8H,上、下连接块部分的网格类型设置为C3D8,设置耦合约束关联螺栓法兰面区域与点集1。针对不同预应变下橡胶试片的动态特性试验,设置如下两个分析步:①静力分析步,其作用为模拟橡胶试片的加载,在集合1施加指定的载荷,同时约束集合2的六向自由度;②谐响应分析步,其作用为计算橡胶试片的动态特性,约束集合1的六向自由度,同时在集合2施加 z 向的激振。

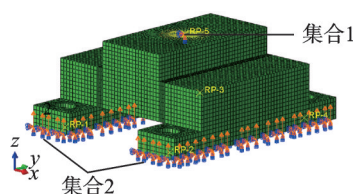


图5 橡胶试片有限元模型
Fig.5 Finite element model of rubber specimen

图 6 为橡胶剪切试片在不同切向预应变下的试验与计算结果。在 50~1 000 Hz 的频率范围内,橡胶试片预应变为 0.0%~46.4% 时,橡胶试片的动刚度与滞后角的计算结果与试验结果的误差均小于 10%;当预应变为 46.4% 时,橡胶试片动刚度在 500 Hz 以后的计算与试验结果(d 组)

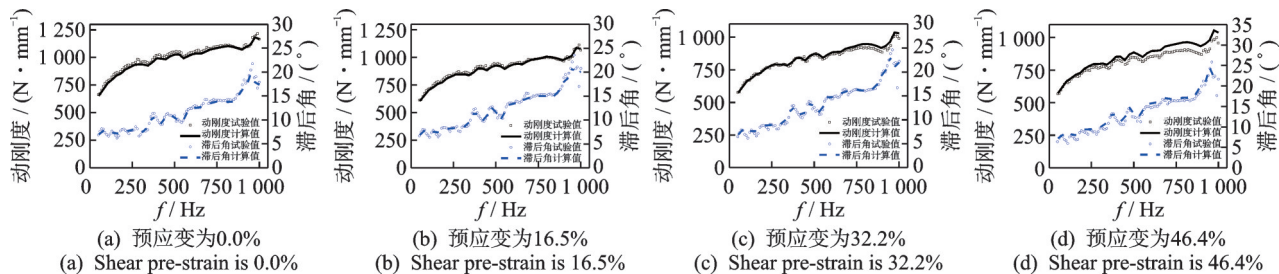


图 6 橡胶剪切试片在不同切向预应变下的试验与计算结果

Fig.6 Experimental and calculation results of rubber specimen under different shear pre-strain

3 不同预载下橡胶悬置的高频动刚度计算

笔者以某款橡胶悬置在不同工况下的动态特性为研究对象,提出一种新的建模方法,计算橡胶悬置在静态设计位置下(z 向载荷为 370 N)和全油门加速工况下(z 向载荷为 3 080 N)的动态特性,同时测试该橡胶悬置在对应预载下的动刚度,并分析计算结果的准确度。

基于有限元软件对橡胶悬置进行有限元建模,采用六面体网格对模型进行划分。图 7 为某款橡胶悬置有限元模型。橡胶部分的网格类型设置为 C3D8H,设置耦合约束关联橡胶内壁区域与点集 1。针对不同预载下橡胶悬置的动态特性试验,设置以下分析步:①经历分析步,其作用为模拟橡胶悬置的缩径;②静力分析步,其作用为模拟橡胶试片的加载,在集合 1 施加指定的载荷,同时约束集合 2 的六向自由度;③谐响应分析步,其作用为计算橡胶试片的动态特性,约束集合 2 的六向自由度,同时在集合 1 施加 z 向的激振。

在计算橡胶悬置的动态特性时,通常只输入一组橡胶黏弹性材料参数,此时橡胶悬置在预载为 3 080 N 时动刚度的计算与试验结果如图 8 所示。输入的黏弹性参数分别通过橡胶试片无预应变、预应变为 46.4% 和 69.5% 的试验数据识别得到。由图可知,橡胶悬置动刚度的计算值与试验值存在较大的偏差。当预应变为 0.0% 时,计算值远高于试验值;当预应变为 46.4% 时,计算值略高于试验值;当预应变为 69.5% 时,计算值低于试验值。虽然当

的误差较大。分析其原因,可能是橡胶材料超弹性本构的精确度不够,导致橡胶变形较大时静刚度与实际值有一定的差别。因此,通过本研究方法识别出的黏弹性参数能够较好地还原橡胶试片的试验结果,但是受到橡胶超弹性本构参数的制约。

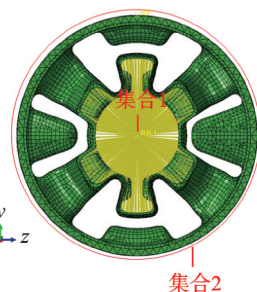


图 7 某款橡胶悬置有限元模型

Fig.7 Finite element model of a rubber mounting

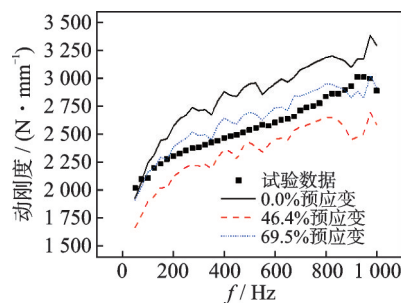


图 8 橡胶悬置在预载为 3 080 N 时动刚度的计算与试验结果
Fig.8 Experimental and calculation results of dynamic stiffness of rubber mount under 3 080 N preload

预应变为 46.4% 时的计算值接近试验值,但是在计算橡胶悬置不同预载下的动刚度时,无法确定输入的是哪一组黏弹性参数,因此当橡胶悬置的预载较大时,只输入一组黏弹性参数计算橡胶悬置的动态特性的方法效果有限。

笔者提出了一种新的橡胶悬置在不同预载下动态特性的建模方法,其计算动刚度的有限元建模流程如下:

- 1) 进行橡胶悬置的静力分析,根据静力分析结

果提取出橡胶悬置所有单元的八面体切应变；

2) 根据橡胶悬置单元的八面体切应变,将橡胶悬置的所有单元分为数组；

3) 赋予不同的单元组对应的黏弹性参数,计算橡胶悬置的动刚度。

3.1 不同预应变下橡胶试片单元的应变

首先,进行橡胶试片的静力分析。根据橡胶试片的静力分析结果,提取出橡胶试片所有单元节点的主应力 σ_1, σ_2 和 σ_3 , 并计算单元节点的八面体切应力 τ_{oct}

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \frac{1}{9}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2} \quad (4)$$

八面体切应变 γ_{oct} 计算式为

$$\gamma_{oct} = \tau_{oct} / G_{\infty} \quad (5)$$

其中: G_{∞} 为准静态剪切模量,在本研究中 $G_{\infty} = 2(C_{01} + C_{10}) = 0.8802$ 。

在简单剪切时胡克定律是适用的,这是 Mooney 本构模型的两个前提之一。通常,八面体切应变又可以视为三维应变场中的最大切应变^[11]。

笔者分别提取了橡胶试片在切向预应变为 16.5%, 32.3%, 46.4% 和 58.8% 下橡胶试片有限元模型所有单元的八面体切应变,发现橡胶试片单元的八面体切应变值主要集中在一个区间,这个区间的上下限在对应的预应变的 ± 0.1 之内。据此,确定了后续橡胶悬置单元分组的切应变区间。

3.2 橡胶悬置有限元模型的分组

在有限元模型中,每个单元由 8 个单元节点构成,8 个单元节点的八面体切应变互不相同。本研究选取 8 个八面体切应变的最大值作为该单元的切应变值,这是橡胶悬置有限元模型单元分组的依据。笔者基于 ABAQUS 二次开发提取出橡胶悬置 117 484 个单元的八面体切应变值,并根据橡胶试片的试验结果将橡胶悬置的单元分组,如表 2 所示。橡胶悬置单元的分组结果如图 9 所示,其中单元的颜色不同,表示单元的组别不同。

3.3 橡胶悬置动刚度的计算

不同工况下橡胶悬置动态特性的试验与计算结果如图 10 所示。其中,图 10(a)为橡胶悬置在静态设计位置下即预载为 z 向 370 N 时的结果,图 10(b)为橡胶悬置在全油门加速下即预载为 z 向 3 080 N 时的结果。由图可知:

表 2 橡胶悬置的单元分组

Tab.2 Group of mount element

切应变范围	采用的黏弹性本构参数来源	单元数量
0 ~ 0.04	0% 试片试验	31 193
0.04 ~ 0.12	0% 与 16.5% 的线性插值	15 453
0.12 ~ 0.20	16.5% 试片试验	10 244
0.20 ~ 0.28	16.5% 与 32.2% 的线性插值	10 971
0.28 ~ 0.40	32.2% 试片试验	18 722
0.40 ~ 0.52	46.4% 试片试验	7 944
0.52 ~ 0.68	58.8% 试片试验	6 365
> 0.68	69.5% 试片试验	16 592

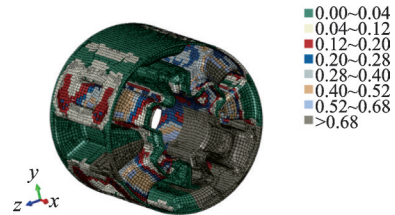
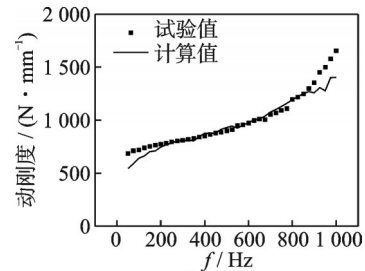
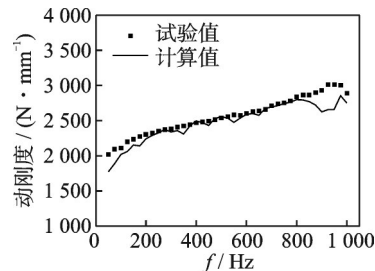


图 9 橡胶悬置单元的分组结果

Fig.9 Grouping results of rubber mounting elements



(a) 预载为 370 N
(a) Pre-load is 370 N



(b) 预载为 3 080 N
(b) Pre-load is 3 080 N

图 10 不同预载下橡胶悬置动刚度的试验与计算结果

Fig.10 Experimental and calculation results of dynamic stiffness of rubber mount under different preloads

1) 当橡胶悬置承受的预载为 370 N 时,计算结果与试验结果的数值与趋势都相当吻合,且整体误差均在试验的 $\pm 10\%$ 以内;

2) 当橡胶悬置承受的载荷为 3 080 N 时,计算结果的误差在试验的 10% 以内,且 100~800 Hz 频率段数值与趋势都与试验相当吻合,但在 900 Hz 附近有一定的偏差,这是因为橡胶试片的动刚度与滞后角在 900 Hz 附近存在一定的波动;

3) 在进行橡胶试片的动态特性试验时,该频率段的动态特性试验结果受到了1 000 Hz后共振的影响,但是后期可对黏弹性参数进行一定的修正,即可更好地预测不同预载下橡胶悬置的动态特性;

4) 由于橡胶悬置动刚度的计算与试验的误差小于10%,且大部分频率段的动刚度都与动刚度试验数据相当吻合,证明了本研究计算橡胶悬置动态特性方法的可行性和有效性。

4 结 论

1) 进行了橡胶剪切试片在不同预切应变下的动态特性测试。试验结果表明,橡胶的动态特性呈现明显的频变特性。在预切应变为0.0%~69.5%的范围内,橡胶试片的动刚度呈现先下降后上升的趋势,滞后角几乎不变。通过公式将试验数据转换为多组橡胶黏弹性参数,采用剪切试片有限元模型验证黏弹性参数的有效性。橡胶试片的动刚度与滞后角的计算结果与试验结果的误差在10%以内,验证了该参数识别方法的可行性。

2) 计算了一款橡胶悬置的动态特性,并且进行了试验验证。通过有限元计算橡胶悬置在电机自重工况(载荷为370 N)和全油门加速工况(载荷为3 080 N)下的动态特性,其频率范围为50~1 000 Hz。在计算中等驾驶工况下橡胶悬置的动态特性时提出了一种新的建模方法,并基于该方法计算了橡胶悬置在不同预载下的动刚度。计算结果表明,在不同预载下橡胶悬置的计算误差均在10%以内。该结果证明了本研究建模方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 康强,顾鹏云,左曙光. 纯电动汽车电驱动总成悬置设计原则研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(11): 1235-1242.
KANG Qiang, GU Pengyun, ZUO Shuguang. A research on design principles for electric drive assembly mounts of pure electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(11): 1235-1242.(in Chinese)
- [2] LENNSTRÖM D, JOHNSSON R, NYKÄNEN A, et al. Determination of radiated sound power from an electric rear axle drive in-situ and its contribution to interior noise [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2013, 6(3): 1554-1563.
- [3] 潘孝勇,上官文斌,柴国钟,等. 橡胶隔振器动态特性计算方法的研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 345-351.
PAN Xiaoyong, SHANGGUAN Wenbin, CHAI Guozhong, et al. An investigation of calculation methods for

the dynamic characteristics of rubber isolator[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(4): 345-351. (in Chinese)

- [4] FENG X, XU P, ZHANG Y. Filled rubber isolator's constitutive model and application to vehicle multi-body system simulation: a literature review[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH, 2018, 2(2): 101-120.
- [5] 左曙光,李凯,吴旭东,等. 一种新型橡胶衬套理论模型及其参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3): 433-438.
ZUO Shuguang, LI Kai, WU Xudong, et al. A novel theoretical model of rubber bushing and parameter identification[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 433-438.(in Chinese)
- [6] 唐安特,上官文斌,潘孝勇,等. 橡胶隔振器高频动态特性的计算方法[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 230-238.
TANG Ante, SHANGGUAN Wenbin, PAN Xiaoyong, et al. Computational method for the dynamic properties of rubber isolators[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 230-238.(in Chinese)
- [7] HAZRA S. Study of dynamics stiffness and shape factor of rubber mounts to address high-frequency resonance issue in electric powertrain mounting system[J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2020, 3: 773-779.
- [8] XIA E L, CAO Z L, ZHU X W, et al. A modified dynamic stiffness calculation method of rubber isolator considering frequency, amplitude and preload dependency and its application in transfer path analysis of vehicle bodies[J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107780.
- [9] SHOYAMA T, FUJIMOTO K. Direct measurement of high-frequency viscoelastic properties of pre-deformed rubber[J]. Polymer Testing, 2018, 67: 399-408.
- [10] 胡小玲. 炭黑填充橡胶黏弹性力学行为的宏观研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [11] MCGARRY M D J, VAN-HOUTEN E E W, PER-RINEZ P R, et al. An octahedral shear strain-based measure of Snr for 3D Mr elastography[J]. Physics in Medicine and Biology, 2011, 56(13): N153-N164.



第一作者简介:李兴泉,男,1981年12月生,博士、高级工程师。主要研究方向为汽车振动噪声设计及控制。
E-mail: lixq3@changan.com.cn

通信作者简介:吴健翔,男,1997年6月生,硕士。主要研究方向为汽车底盘。
E-mail: mezhyn@scut.edu.cn