

考虑电动轮转矩波动的汽车悬架液压衬套设计

左曙光 孙晓华 吴旭东 李凯 冯朝阳 倪天心

(同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 悬架衬套作为汽车振动的重要传递部件对于衰减汽车振动有着重要作用,在轮毂电机驱动电动汽车中,电机的转矩波动会引起车身的宽频纵向振动,传统的橡胶衬套因在宽频范围内阻尼特性变化不大,无法在特定的频带上产生大阻尼来迅速衰减振动。引入液压衬套可以衰减电动轮悬架中特定频带的转矩波动激励,首先建立了能够准确描述液压衬套力学性能的有限元模型,然后对液压衬套进行了力学性能敏感因素分析,最后根据敏感因素分析结果和振动传递特性对液压衬套进行结构参数设计,结果表明通过合理设计液压衬套的橡胶剪切模量、惯性通道横截面积和通道数量等参数,可以显著减小驱动电机转矩波动对车身纵向振动的影响,使车身纵向力振动在0~120 Hz 范围内衰减13.4%。

关键词: 轮毂电机驱动; 电动汽车; 液压衬套; 液固耦合; 力学特性; 转矩波动

中图分类号: TH145; TB302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0354-07

Design of Hydraulic Bushings for Electric Wheel Suspension System Considering Torque Ripple

Zuo Shuguang Sun Xiaohua Wu Xudong Li Kai Feng Zhaoyang Ni Tianxin

(Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: As the important transmission part of the vehicle vibration, the suspension bushing has a significant effect on weakening the vehicle vibration. In the wheel drive electric vehicle, the broadband frequency longitudinal vibration of the vehicle body will be caused by the torque ripple of the hub motor. The traditional rubber bushing has small changes of damping characteristics in broadband frequency ranges and it will not generate high damping to weaken the vibration rapidly on specific frequency band as well. So the hydraulic bushings were used to attenuate the excitation of torque ripple in particular frequency band. Firstly, the accurate finite element model was established and applied to analyze the sensitive factors of mechanical properties of the hydraulic bushing. Then, the design of the hydraulic bushing was performed according to the results of the analyzed sensitive factors. The results illustrated that the hydraulic bushing could substantially decrease the influence on the vehicle body longitudinal vibration by 13.4% within the range of 0~120 Hz through the reasonable parameters design of rubber shear modulus of the hydraulic bushing, the cross section area of the channel and the numbers of channels, which also supplies the reference of the suspension structure design of the distributed driving electric vehicle.

Key words: wheel motor drive; electric vehicle; hydraulic bushings; liquid-solid coupling; mechanical property; torque ripple

引言

作为汽车悬架中重要的减振元件,衬套的力学

性能对汽车悬架系统振动特性有着重要影响。传统汽车衬套元件主要用来衰减40 Hz以下的振动激励,橡胶衬套即可较好地解决车轮振动的问题。随

着电动汽车的不断发展,电机带来的中高频激励已经成为电动轮悬架的一个重要激励源,使得宽频隔振逐渐成为研究的热点,可以在宽频范围内隔振的液压衬套也随之受到广泛关注^[1]。

传统的橡胶衬套在宽频范围内的阻尼特性变化不大,无法在特定的频带上产生大的阻尼来迅速衰减振动,而液压衬套可以利用内部液体流动产生的阻尼效果来实现特殊频率内振动的快速衰减^[2]。近年来,已有很多学者对液压衬套的建模和特性分析做了相关研究,主要应用集总参数法以及有限元软件,分析相对低频范围的衬套特性;LU等^[3-4]利用流体动力学方程来描述衬套内液室间的液体流动,用弹簧阻尼系统来描述橡胶主簧,不适用于高频范围;潘孝勇等^[5-6]、李林等^[7-8]针对径向、轴向液压衬套进行了试验,并建立了集总参数模型仿真计算,与试验结果对比仍发现高频下模拟误差偏大;马天飞等^[9-11]基于液压衬套集总参数模型在 AMESim 中建立了一维模型并进行动态仿真,然而未从理论上说明参数的具体意义;CHAI等^[12-14]研究了液压衬套的非线性特性,并用集总参数法建立考虑液体通道结构的衬套模型,讨论了低频范围内的力学特性。

本文通过研究橡胶材料粘弹塑性本构模型及其参数识别方法,将本构模型参数转换为 ADINA 软件可用的材料参数,从而在 ADINA 软件中建立液压衬套固体部分有限元模型,随后采用双向液固耦合的方法建立准确的宽频范围内适用的液压衬套模型,研究液压衬套的力学性能,最后结合电动轮悬架传递至车身的响应力特点,调整橡胶材料剪切模量、惯性通道横截面积和通道数量来设计合理的液压衬套,从而衰减转矩波动给车身振动带来的不良影响,为电动轮悬架中电机引起的车轮纵向振动控制提供参考。

1 电动轮悬架与衬套建模

本文研究对象为轮毂电机驱动电动汽车双横臂悬架系统,如图 1 所示。主要部件有电机、转向节、上下控制臂、转向横拉杆、弹簧减振器以及控制臂上的 4 个橡胶衬套。为体现液压衬套的优越性,分别建立橡胶衬套和液压衬套应用于电动轮悬架中进行隔振效果对比。

1.1 橡胶衬套建模

橡胶衬套模型如图 2 所示,内外钢圈之间填充有橡胶材料,并在橡胶中间嵌入了一层刚性环。

由于衬套的内外层钢圈刚度远大于中间的橡胶材料,在有限元软件中将其处理为解析刚体;内部填

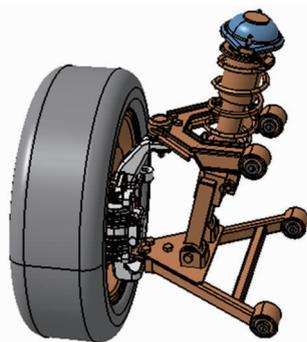


图 1 轮毂电机驱动电动汽车双横臂悬架系统
Fig. 1 Double wishbone suspension system of wheel drive electric vehicle

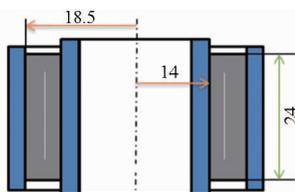


图 2 橡胶衬套剖面图

Fig. 2 Sectional view of rubber bushing

充的橡胶材料使用 Mooney - Rivlin 模型,其参数为: $C_{01} = 0.1964$, $C_{10} = 0.0491$;对于中间的刚性环采用 ABAQUS 中的 Embedded Element 来表达。

综上,建立橡胶衬套的有限元模型如图 3 所示。

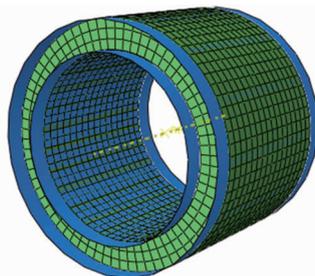


图 3 橡胶衬套有限元模型

Fig. 3 Finite element model of rubber bushing

1.2 液压衬套建模

本文通过橡胶材料特性试验得到其静态特性以及动态剪切模量和阻尼因子,在分析其频率相关性的基础上结合本课题组提出的橡胶材料粘弹塑性本构模型对其进行材料参数识别^[15],由于 ADINA 软件拥有强大的液固耦合功能,选择将橡胶材料参数转换为 ADINA 可用参数,为下一步橡胶材料与衬套内的流体耦合做准备。为验证此建模方法的准确性,根据某可购得液压衬套实物的尺寸在 ADINA 软件中建立了液压衬套液固耦合有限元模型,如图 4 所示。并对液压衬套实物进行力学性能特性试验,将试验结果与所建模型的力学特性仿真结果进行对比,验证该建模方法的正确性。

液压衬套力学特性试验所采用的试验设备为

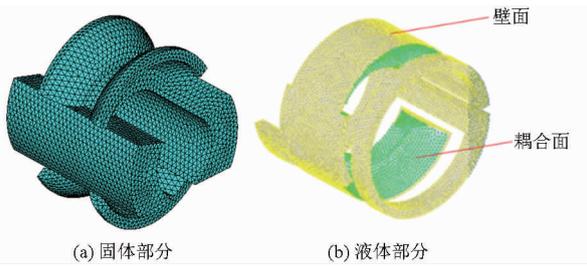


图4 液压衬套有限元模型

Fig. 4 Finite element model of hydraulic bushing

IST公司生产的振动加载油缸,数据采集系统为试验台集成的 Instron Structural Testing Systems。装夹方式为固定衬套外圈,对衬套内圈进行缓慢的位移加载,加载速度为 0.01 mm/s ,试验整体台架如图5所示。



图5 整体试验台装夹图

Fig. 5 Test bench

有限元计算结果与试验结果对比如图6~8所示,对比液压衬套有限元仿真计算结果和试验值可知,当振幅为 0.2 mm 时,动刚度的平均误差为 1.06% ,阻尼因子的平均误差为 14.49% ;当振幅为 0.5 mm 时,动刚度的平均误差为 1.23% ,阻尼因子的平均误差为 12.62% 。表明建立的有限元模型对动刚度的描述较为精确,对阻尼因子的描述仍能控制在 15% 以内,符合工程计算的需求,为在有限元软件中设计可以衰减电动轮纵向振动的液压衬套提供了基础。

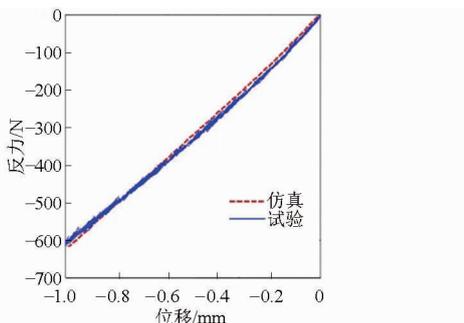
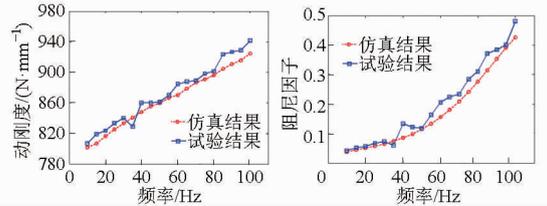
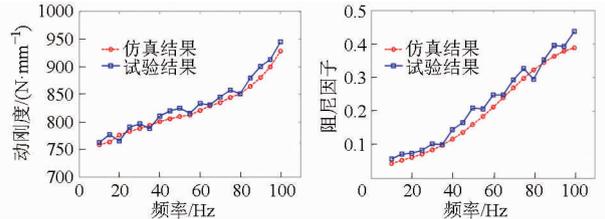


图6 液压衬套静态特性对比图

Fig. 6 Comparison of static characteristics of hydraulic bushing

1.3 悬架多体模型

合理简化后建立悬架非橡胶元件模型,悬架总

图7 液压衬套仿真结果与试验结果对比(振幅为 0.2 mm)Fig. 7 Comparison of hydraulic bushing simulation and experimental results (amplitude of 0.2 mm)图8 液压衬套仿真结果与试验结果对比(振幅为 0.5 mm)Fig. 8 Comparison of hydraulic bushing simulation and experimental results (amplitude of 0.5 mm)

体有限元多体模型如图9所示。其中弹簧减振器用连接下横臂弹簧下支点和全局坐标系弹簧上支点的弹簧阻尼单元来描述。

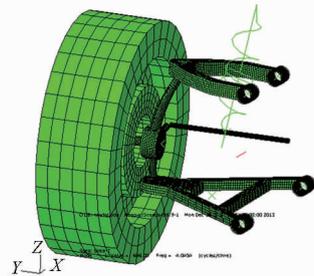


图9 多体悬架的有限元模型

Fig. 9 Finite element model of multi-body suspension

由于本文液压衬套的性能仿真是基于 ADINA 仿真平台液固耦合模块计算的,为了将液压衬套的性能特点应用于在 ABAQUS 多体环境中建立的电动轮悬架多体模型中,通过 ADINA 软件对液压衬套模型进行仿真,提取液压衬套频率相关的六向刚度和六向阻尼外特性,将其以 bushing 单元的方式赋予到 ABAQUS 多体模型中,来准确描述液压衬套的动态特性。

2 转矩波动下悬架特性分析

2.1 悬架固有特性分析

在有限元软件中选择线性摄动分析步计算电动轮悬架系统在 300 Hz 以内的自由模态,计算结果见表1。

分析悬架的各阶振型可以发现,其中2阶振型表现为车辆的纵向振动。由于转矩波动作用于车辆的方向也体现为纵向,可以预测车身纵向振动在二阶固有频率 33 Hz 处可能具有较大幅值。

表1 悬架固有频率及模态振型描述

Tab.1 Suspension natural frequency and mode shape

阶次	固有频率/Hz	振型描述
1	4.22	车轮上下跳动
2	33.34	车轮前后跳动
3	68.24	车轮绕Z轴方向偏转
4	142.30	车轮绕Y轴负方向扭转
5	205.64	车轮绕X轴方向偏转
6	291.45	上下横臂一起绕Z轴方向扭转

2.2 电动轮转矩波动响应分析

通过实验获得某直流同步电动机的电机转矩波动信号(100 r/min 转速工况下)如图10所示。

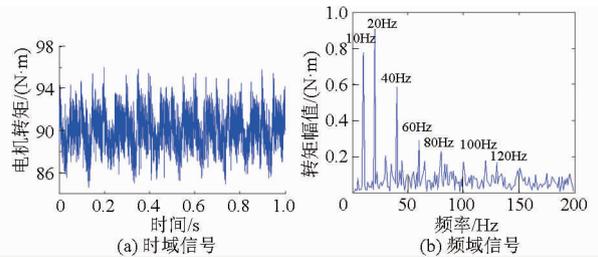


图10 电机转矩波动的时域信号和频域信号

Fig.10 Time-domain signal and frequency-domain signal of motor torque fluctuations

在多体悬架模型的轮心处施加如图10所示的转矩波动信号进行仿真,提取悬架中4个衬套内圈的纵向反力之和作为车身的纵向力响应,对该响应进行频谱分析,结果如图11所示。

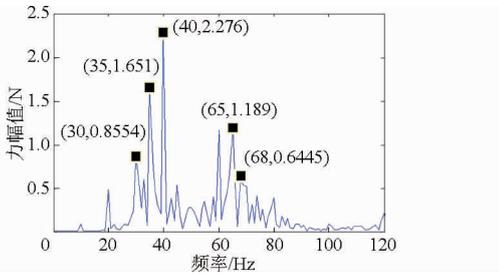


图11 车身纵向反力频谱图

Fig.11 Force spectrum of vehicle longitudinal reaction

分析车身响应可以看出,车身的纵向力响应中最大幅值所在的频率正是在悬架的二阶固有频率33 Hz附近,而从激励上看,此处频率对应的幅值并非最大,因此说明悬架纵向振动主要是由转矩波动中接近悬架二阶固有频率的激励成分产生。

2.3 衬套设计目标选取

分析悬架轮心到4个衬套的传递贡献量可以发现,对纵向力传递影响较大的衬套为上横臂前点衬套^[16],故针对上前衬套进行优化设计,使用设计后的液压衬套代替传统橡胶衬套来控制电动轮纵向振动。

为了确定合适的设计目标,首先对电动轮悬架

振动传递特性进行预分析,即在轮心处施加幅值为1 N·mm的驱动转矩标准白噪声信号,仿真计算得到轮心的转矩激励到车身的纵向反力传递函数如图12所示。悬架上横臂前点衬套在悬架的二阶固有频率33 Hz附近有较大的传递率。为衰减悬架二阶固有频率附近的纵向振动响应,以将上前衬套阻尼的峰值频率设计在33 Hz附近为目标,进行适用于电动轮悬架减振的液压衬套设计。

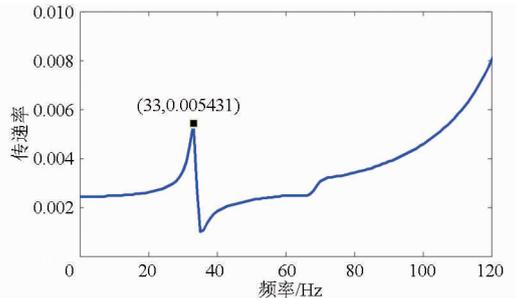


图12 轮心转矩到两敏感衬套纵向力传递函数

Fig.12 Longitudinal force transfer function from torque to two sensitive bushings

3 液压衬套设计变量分析

液压衬套相对于传统橡胶衬套的优势在于,液压衬套可以在宽频范围内的特定频率下产生大阻尼来快速衰减振动,本文正是利用此优势,通过调节液压衬套参数使其在悬架固有频率处产生较大的阻尼特性来衰减相应的振动能量。首先基于准确的液压衬套有限元模型研究液压衬套力学特性的敏感因素,并据此进行适用于轮毂驱动电动车的液压衬套力学性能设计。

3.1 液压衬套力学性能影响因素分析

3.1.1 橡胶材料剪切模量的影响

分别将橡胶材料的剪切模量设定为0.4、0.8、1.6 MPa进行仿真,得到3种条件下的衬套动态特性如图13所示。可知橡胶材料的剪切模量直接影响衬套的静刚度和动刚度的稳定值,且剪切模量越大,阻尼因子的峰值频率越大、驼峰变宽,即衬套能在更宽的频率范围内提供大的阻尼,但高频段的阻尼因子会变大,因此需要高频隔振时应慎重考虑。在进行橡胶材料参数选择时应当首先根据应用场合

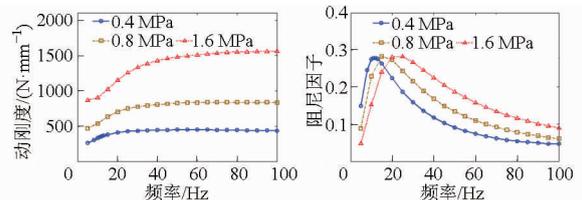


图13 橡胶材料剪切模量对衬套力学特性的影响

Fig.13 Effect of rubber material shear modulus to mechanical properties of bushing

保证静刚度以保证其承载需求,然后根据目标频带的范围选择合理的剪切模量。

3.1.2 惯性通道横截面积的影响

对3种惯性通道横截面积(24、32、40 mm²)的液压衬套进行仿真,得到动态特性如图14所示。

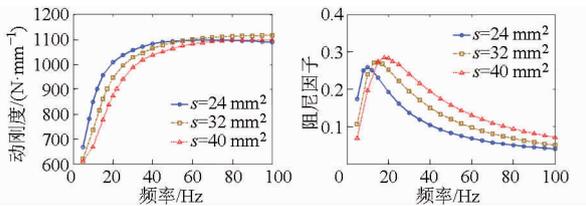


图14 惯性通道横截面积对液压衬套力学特性的影响

Fig. 14 Effect of inertia channel cross-sectional area to mechanical properties of bushing

分析图14可知,惯性通道的横截面积对衬套的动态特性有较为明显的影响,主要体现为:

- (1) 惯性通道的横截面积越小,动刚度随频率增加上升越快,越早达到稳定值,稳定前的动刚度越大。
- (2) 惯性通道的横截面积越小,阻尼因子的峰值频率越低,阻尼的峰值也有所减小;另外阻尼因子的驼峰变窄,阻尼因子上升快,下降也快,高频段的阻尼因子变小。

由于改变惯性通道横截面积的可操作性较强,且改变该面积能明显影响阻尼因子的频率分布,因此,惯性通道截面积是液压衬套结构优化设计中需要重点考虑的一个变量。

3.1.3 双惯性通道的影响

为了讨论单惯性通道与双惯性通道液压衬套性能的区别,设计了惯性通道总横截面积与单通道模型惯性通道面积相同的双通道模型,横截面积为24 mm²。图15为仿真用双惯性通道液压衬套结构。

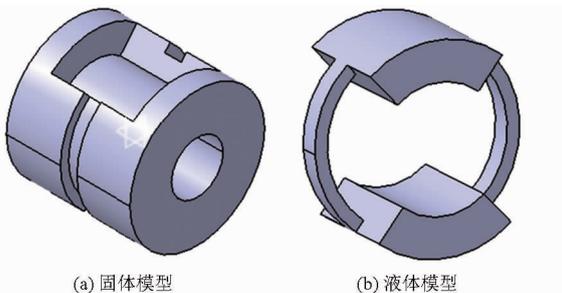


图15 双通道液压衬套结构模型

Fig. 15 Structural model of dual-channel hydraulic bushings

两种液压衬套的仿真结果如图16所示,双通道结构的动刚度随频率增加上升较快,较早达到稳定值,且稳定值相对较低;同时双通道结构的液压衬套阻尼因子的峰值频率比单通道结构略有左移,且峰值也有所减小,此特性可以应用于衬套的高频隔振。

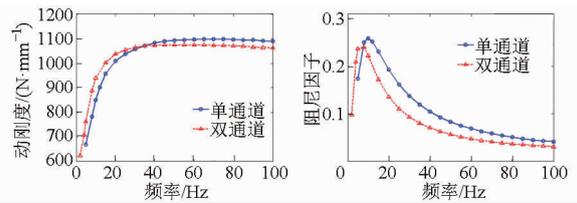


图16 单、双通道动态特性对比

Fig. 16 Dynamic feature contrast of single- and dual-channel

3.1.4 液体材料参数敏感度

液体材料是液压衬套重要的组成部分,图17、18为不同液体密度和不同液体粘度对衬套动刚度和衬套阻尼因子影响的有限元仿真结果。由图可以看出液体粘度对衬套力学性能的影响较小,但密度较大的液体可以使衬套动刚度在频率更低时即达到稳定值,同时阻尼因子的最大值也向低频方向移动。

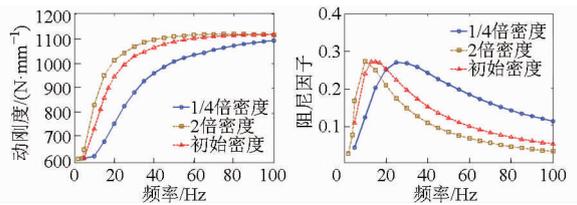


图17 液体密度对衬套力学特性的影响

Fig. 17 Effect of liquid density to mechanical properties of bushing

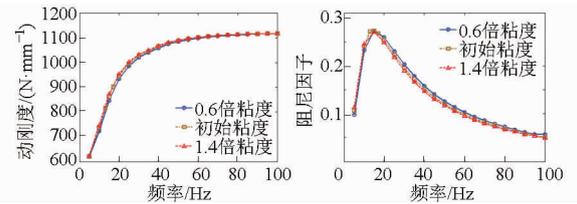


图18 液体粘度对液压衬套动态特性的影响

Fig. 18 Effect of liquid viscosity to mechanical properties of bushing

3.1.5 惯性通道长度敏感度

因受衬套空间结构限制,衬套惯性通道长度无法发生大范围变化,故采用如图19所示的内壁光滑过渡,长度分别为1.2倍、1.4倍、1.6倍原惯性通道长度的液压衬套模型。对其进行力学性能仿真,仿真结果如图20所示。



图19 不同惯性通道长度衬套 CAD 模型

Fig. 19 CAD model of different channel lengths of bushings

由图20可知,当惯性通道的长度受到结构形状的限制无法发生较大的变化时,改变惯性通道长度对衬套力学特性的影响较小,同时也说明液压衬套

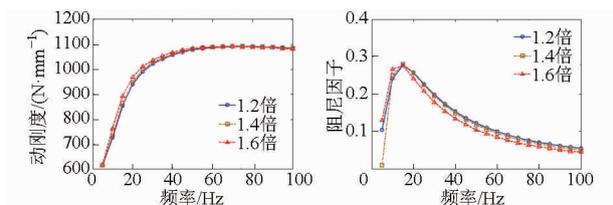


图 20 惯性通道长度对液压衬套力学特性的影响

Fig. 20 Effect of different channel lengths to mechanical properties of bushing

中阻尼作用主要来源于局部损失而并非流经通道产生的沿程损失。

3.1.6 惯性通道直拐角数量敏感度

针对衬套惯性通道中直拐角的数量对衬套力学性能的影响做相应的探究分析。图 21 为在保证通道长度不变的基础上拥有 2 个、4 个和 6 个直拐角的结构形式,对此模型进行有限元仿真的结果如图 22 所示,从图中可以看出通道中直拐角的数目对液压衬套力学特性基本没有影响。

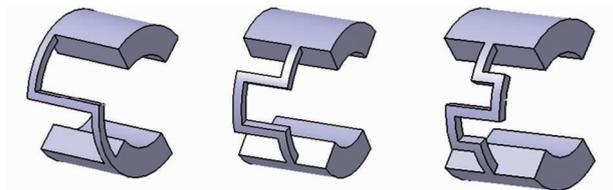


图 21 不同通道直拐角的液体部分 CAD 结构图

Fig. 21 Liquid portion's CAD model of different corner structures

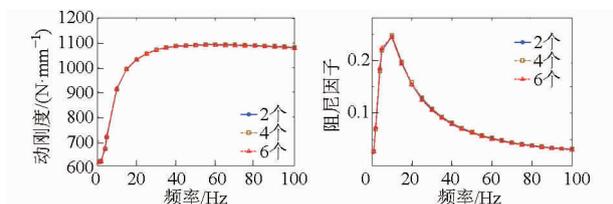


图 22 通道直拐角数对液压衬套力学特性的影响

Fig. 22 Effect of channel corner count to mechanical properties of the bushing

3.2 力学性能影响因素分析及设计变量选择

根据液压衬套的力学性能分析结果可知,通过合理设计液压衬套的材料特性和结构特征可以实现液压衬套阻尼峰值频率的人工设定。利用这一特点进行针对电动车转矩波动控制的液压衬套设计。

基于上述电动轮悬架转矩激励特点及悬架纵向振动传递特性的研究,根据液压衬套的力学特性影响因素分析结果,选取橡胶材料的长效剪切模量和通道横截面积为设计变量来调节液压衬套力学性能。

考虑到双通道形式的液压衬套在保证阻尼峰值频率与单通道接近的前提下可以使得高频段的阻尼和动刚度相对较低,符合电动轮悬架隔振的需求,将采用双通道结构形式的液压衬套进行电动机转矩激

励振动控制。

4 液压衬套优化设计

4.1 衬套参数设计

基于前文确定的液压衬套设计目标,通过合理设计液压衬套橡胶材料长效剪切模量和惯性通道截面积,并采用双通道衬套结构,获得利于衰减电动轮悬架纵向振动的上前液压衬套橡胶材料剪切模量为 1.2 MPa,惯性通道截面积为 42 mm²。基于上述参数建立的液压衬套模型的阻尼特性曲线如图 23 所示,其阻尼的峰值出现在电动轮悬架的二阶固有频率 33 Hz 附近。

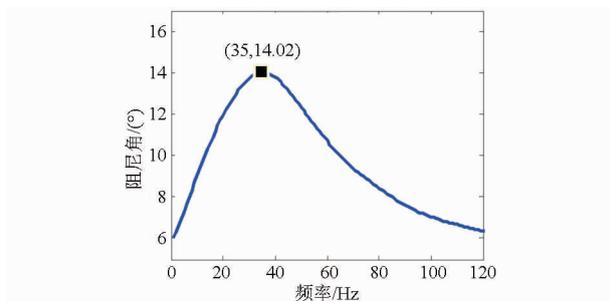


图 23 上前衬套的阻尼特性曲线

Fig. 23 Damping characteristics of front upper arm bushing

4.2 优化结果对比

通过 ADINA 软件计算得到优化设计后的液压衬套动态特性参数,将其赋予 ABAQUS 多体悬架上前衬套模型中后,对轮心施加转矩波动激励信号,将悬架连接车身的 4 个衬套内圈的纵向反力之和作为车身纵向振动响应评价指标,获取该响应结果并对其进行频谱分析,与优化前的车身纵向力响应对比,如图 24 所示,使用液压衬套之后,悬架在二阶固有频率 33 Hz 附近的振动明显变小,分别统计优化前和优化后悬架纵向响应力在 120 Hz 以内的能量值,得优化前总能量为 24.212 J,优化后的总能量为 20.969 J,较优化前减小了 13.4%。

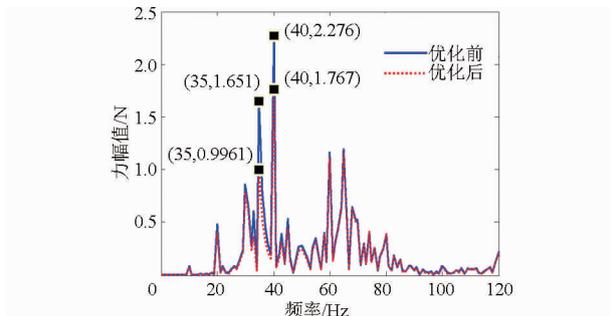


图 24 优化前后车身纵向力响应的对比

Fig. 24 Contrast of longitudinal force response before and after optimization

分析可知,利用液压衬套可以在宽频范围内的特定频率下产生大阻尼来迅速衰减振动的特性,通过合

理设计液压衬套参数,使其在 35 Hz 附近获得较大阻尼,最终可以使悬架纵向激励中 33 Hz 附近的两个响应峰值(35 Hz 和 40 Hz)处的振动响应得到极大衰减,并且在 0 ~ 120 Hz 的宽频范围内振动能量得到明显衰减。因此设计与悬架相匹配的液压衬套来替换普通橡胶衬套,对于衰减轮毂驱动电动汽车中转矩波动激励下悬架产生的纵向振动是可行有效的。

5 结论

(1)通过橡胶材料试验及粘弹塑性本构模型参

数识别,最终转换为有限元可用的参数,建立了准确的液压衬套有限元模型。

(2)使用有限元法对液压衬套进行了力学特性的影响因素分析,经过大量仿真发现,对力学特性影响较为敏感的因素为橡胶剪切模量、通道横截面积和通道数量,通过合理调整这 3 个参数,设计合适的液压衬套应用于电动轮悬架中,可以改善转矩波动激励下的车身纵向力的振动响应,使车身纵向振动能量在 0 ~ 120 Hz 范围内减小 13.4%。

参 考 文 献

- 张立军,李刚. 悬架橡胶件对汽车平顺性影响的多体动力学分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 16-19.
ZHANG Lijun, LI Gang. Multi-body dynamics analysis for the effectiveness of suspension rubber elements on ride comfort[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 16-19. (in Chinese)
- 上官文斌,徐驰. 汽车悬架控制臂液压衬套动态特性实测与计算分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(9): 7-10.
SHANGGUAN Wenbin, XU Chi. Experiment and calculation methods for analyzing dynamic performances of hydraulic bushings used in control arms of a suspension [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(9): 7-10. (in Chinese)
- LU M, ARI-GUR J. Study of dynamic properties of automotive hydrobushing [C] // ASME Design Engineering Division Proceedings, DE, 2000(106): 135-140.
- LU M, ARI-GUR J, GARETY J. Prediction of automotive hydrobushing resonant frequency [C] // Noise Control and Acoustics Division, ASME Proc., NCA, 1999(26): 157-159.
- 潘孝勇. 橡胶隔振器动态特性计算与建模方法的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
- 潘孝勇,上官文斌,柴国钟,等. 基于超弹性、分数导数和摩擦模型的炭黑填充橡胶隔振器动态建模[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10): 6-10.
PAN Xiaoyong, SHANGGUAN Wenbin, CHAI Guozhong, et al. Dynamic modeling for carbon-filled rubber isolators based on hyper elasticity, fractional derivative and a generalized frictional model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10): 6-10. (in Chinese)
- 李林. 液压衬套动态特性实测分析及集总参数模型研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 83-88.
LI Lin. Test and lumped parameter modeling analysis for dynamic characteristics of a hydraulic bushing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 83-88. (in Chinese)
- 李林,曾祥坤. 液压衬套集总参数模型动态特性液-固耦合有限元分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 139-149.
LI Lin, ZENG Xiangkun. Dynamic characteristics analysis of a hydraulic bushing based on LP model and FSI finite element analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 139-149. (in Chinese)
- 刘亚川. 悬架液压衬套有限元分析与基于 AMESim 的隔振性能优化[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- 马天飞,刘亚川,乔雪冰,等. 悬架液压衬套的液固耦合建模及动态特性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 857-861.
MA Tianfei, LIU Yachuan, QIAO Xuebing, et al. Fluid-structure-interaction modeling and dynamic behavior analysis for hydrobushing of suspension[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 857-861. (in Chinese)
- 乔雪冰. 乘用车悬架系统液压衬套的建模与分析[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- CHAI T, DREYER J T, SINGH R. Nonlinear dynamic properties of hydraulic suspension bushing with emphasis on the flow passage characteristics[J]. IMech E, Part D:Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(10): 1327-1344.
- CHAI T, DREYER J T, SINGH R. Frequency domain properties of hydraulic bushing with long and short passages: system identification using theory and experiment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56-57: 92-108.
- CHAI T, DREYER J T, SINGH R. Time domain responses of hydraulic bushing with two flow passages[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(3): 693-710.
- 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)
- 秦民,蒋永峰,马天飞. 悬架液压衬套液固耦合有限元分析[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2014, 28(7): 5-10.
QIN Min, JIANG Yongfeng, MA Tianfei. Fluid-structure interaction finite element analysis of hydrobushing used in suspension [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 28(7): 5-10. (in Chinese)
- 胡竞. 电动车悬架橡胶衬套隔振特性分析与优化设计[D]. 上海:同济大学, 2014.
HU Jing. Analysis and optimization of suspension rubber bushing vibration characteristics in electric vehicle [D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)