

# 基于弹性体车身的驾驶室液压悬置动特性匹配\*

史文库<sup>1</sup>, 毛 阳<sup>1</sup>, 陈志勇<sup>1</sup>, 邬广铭<sup>1</sup>, 王世朝<sup>1</sup>, 翟来涛<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春, 130022) (2. 中国第一汽车集团公司技术中心 长春, 130011)

**摘要** 针对液压悬置特殊的非线性弹性特征及其动特性匹配的复杂性,建立了驾驶室的弹性体模型。在试验验证模型的正确性后导入多体动力学软件中,建立了以弹性体驾驶室为基础的液压悬置系统模型。通过驾驶室悬置系统的振动响应试验验证了系统模型的正确性,确定了系统的响应峰值,并在这些峰值频率下对悬置的动刚度和相位角曲线进行优化匹配。根据优化结果,调整液压悬置的结构参数,并试制了悬置样件,进行了整车试验验证。

**关键词** 驾驶室; 液压悬置; 弹性体; 动特性; 匹配

**中图分类号** U461.4; TH137

## 引 言

驾驶室悬置作为驾驶室的主要隔振系统<sup>[1-2]</sup>,是降低驾驶室振动、提高乘坐舒适性的重要部件。其主要作用表现为:降低路面激励向驾驶室的传递;降低发动机激励向驾驶室的传递;降低汽车转弯、加速、急停等工况下驾驶室的瞬态振动等。驾驶室悬置包括橡胶悬置、螺旋弹簧悬置、空气弹簧悬置和液压悬置等多种形式。目前,对于前 3 种悬置已有深入的研究并得到了广泛的应用,但对驾驶室液压悬置的研究却相对较少。驾驶室液压悬置由于其优良的外特性<sup>[3]</sup>,已经应用于国外高档的轻型卡车上。

液压悬置由于其特殊的非线性弹性特征<sup>[4-6]</sup>,相对于一般的螺旋弹簧悬置或橡胶悬置,匹配与优化更加困难。当前,对于驾驶室液压悬置的优化匹配多基于刚性体驾驶室模型,仅考虑驾驶室质心处的振动情况,无法考虑更为关键的驾驶员座椅处的振动,因此对优化匹配造成一定的约束。笔者建立了驾驶室的弹性体模型,并在此基础上建立驾驶室液压悬置系统模型,以驾驶员座椅导轨处振动加速度均方根值最小为目标,在多体动力学软件中对液压悬置的动态特性曲线进行优化。根据优化的结果,调整液压悬置的结构参数,并进行样件试制和装车试验验证。

## 1 驾驶室弹性体模态计算与试验

在多体动力学软件中建立弹性体驾驶室的前提是获得驾驶室的弹性体模态数据。

驾驶室车身钣金件由冲压成型钢板组成,钣金件之间大多通过点焊或者电弧焊的方式连接;驾驶室底部钣金与底部骨架的连接大多为螺栓连接或者铆接;驾驶室顶部钣金与骨架大多是点焊连接和铆接;驾驶室后部板件与骨架连接大多为焊接和粘接;驾驶室其他位置钣金件与车架大多通过焊接方式连接。利用有限元软件 Hypermesh 建立驾驶室的有限元模型,利用 reb2 和 cweld 单元模拟上述的连接关系<sup>[7-8]</sup>,并进行如下的几何修复<sup>[9]</sup>:

- 1) 消除几何曲面之间的重叠和错位等几何缺陷,调整曲面的几何拓扑关系;
- 2) 删除了对驾驶室整体模态影响很小的个别小质量零件,比如小型的螺栓、螺帽、垫圈和螺钉等;
- 3) 删除了半径小于 5 mm 的工艺圆孔以及少量尺寸很小的对整体模态影响较小的让位凸台和过渡圆角。

最终建立的有限元模型共有 327 577 个节点,321 049 个单元。其中壳单元有 317 629 个,包含 310 630 个四边形单元和 6 999 个三角形单元。四边形单元占壳单元总数的 97.80%,满足整车模型

\* 国家自然科学基金资助项目(51205158);中国博士后科学基金资助项目(2013M541294)  
收稿日期:2013-06-01;修回日期:2013-07-21

中四边形单元占总单元数 95% 以上的工程计算的要求,如图 1 所示。

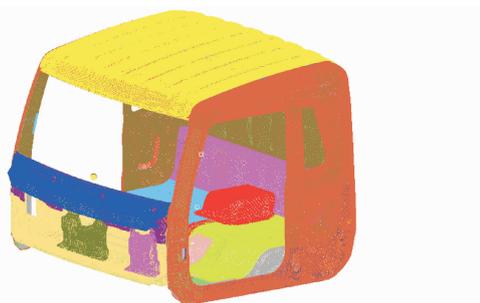


图 1 驾驶室有限元网格模型

Fig. 1 Finite element model of cab

在有限元模态建模过程中,由于对驾驶室模型进行了少量的简化,模型可能会与实际结构产生一定的偏差。为了确认模型的准确性,需要用试验的方法对驾驶室模态进行测试和识别,将试验测得的结果与模拟分析的结果作对比,用以校正有限元模型。

试验所使用的数据采集设备是比利时 LMS 公司的 Test. Lab 多通道数据采集系统,所使用的传感器为美国 KISTLER 公司的加速度传感器和力传感器。试验时,驾驶室采用弹簧悬挂的方式进行悬挂,激励通过美国 MB 公司的 MODAL 110 激振器进行施加。悬挂方式与激振器位置如图 2 所示。



图 2 驾驶室悬挂方式(左)与激振器位置(右)

Fig. 2 Cab lifting (left) and position of exciters(right)

为了降低工作量,提高测量精度,试验中把整体模态和局部模态分别测试,整体模态测量采用三向加速度传感器,局部模态测量采用单向加速度传感器。最终确定的驾驶室拾振点数为 368 个(其中局部模态为 344 个,整体模态为 24 个),如图 3 所示。

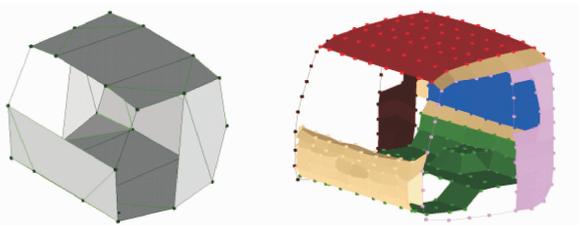
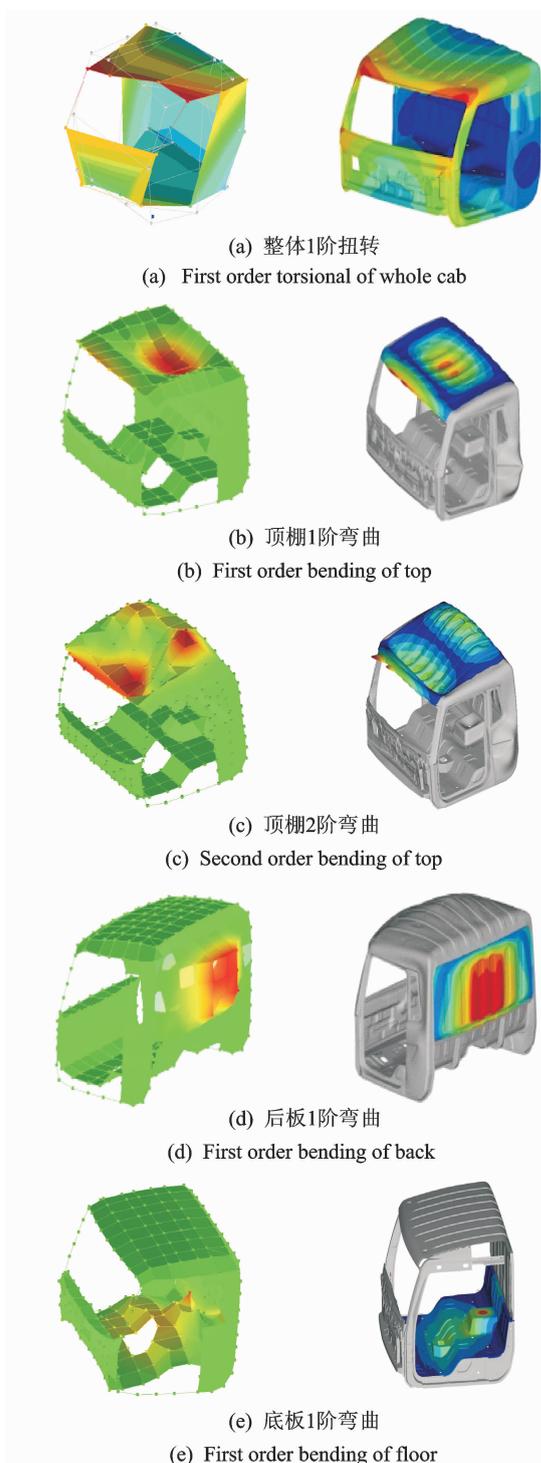


图 3 整体模态拾振点(左)与局部模态拾振点(右)

Fig. 3 Measuring points for integral(left) and local modal(right)

试验中激振力信号源为猝发随机信号,每次测试的平均次数为 25 次。通过 LMS 前端,采集拾振点数据,计算处理得到驾驶室模态振型与数值。整体模态振型和典型局部模态振型的试验值、计算值对比如图 4 所示,模态数值对比如表 1 所示。



(a) 整体1阶扭转

(a) First order torsional of whole cab

(b) 顶棚1阶弯曲

(b) First order bending of top

(c) 顶棚2阶弯曲

(c) Second order bending of top

(d) 后板1阶弯曲

(d) First order bending of back

(e) 底板1阶弯曲

(e) First order bending of floor

图 4 典型模态试验振型(左)与计算振型(右)对比

Fig. 4 The comparison of typical modal between test (left) and calculation(right)

表1 驾驶室典型模态试验值与计算值对比

Tab. 1 The modal comparison between test and calculation

振型	试验值/ Hz	计算值/ Hz	误差/%
整体1阶扭转	23.29	20.02	14.0
顶棚1阶弯曲	37.41	36.96	1.2
顶棚2阶弯曲	52.20	54.09	3.6
后板1阶弯曲	29.64	30.04	1.3
底板1阶弯曲	53.74	50.93	5.2

对比结果表明,由有限元方法计算的模态频率与试验测得的频率吻合较好,从而验证了所建立的驾驶室弹性体模型是正确的,可以基于该模型进行下一步分析。

## 2 驾驶室液压悬置动特性匹配

在将弹性体驾驶室模型导入多体动力学软件前,应先建立外部节点,用于和悬置元件连接。根据驾驶室与悬置元件的连接方式,建立了具有12个外部节点的超单元模型。运用ADAMS/Flex模块将有限元软件生成的模态中性文件(.mnf)导入。在每个节点位置建立哑物体,通过哑物体将悬置元件与弹性体驾驶室连接。建立的驾驶室悬置系统刚弹耦合模型如图5所示。

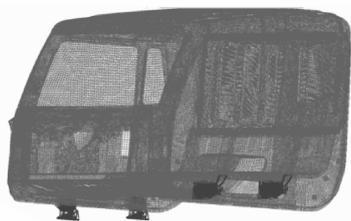


图5 基于弹性体驾驶室的液压悬置系统模型

Fig. 5 The system model of suspension based on elastic cab

为了验证悬置系统模型的正确性,对驾驶室悬置系统进行了振动响应试验。在悬置下施加激励,测量驾驶室内部座椅导轨处振动响应点的加速度信号,测得驾驶室悬置系统的振动响应特性。对比研究试验结果与仿真结果,以验证模型的准确性。

试验中在驾驶员座椅导轨处布置加速度传感器,左前悬置下方布置激振器,如图6所示。在仿真模型中同样在左前悬置下施加垂直力,其大小与试验中激振器的输入力相同。驾驶员座椅导轨处的加速度功率谱密度(PSD)曲线试验与仿真结果对比如图7所示。

通过与振动响应试验曲线的对比,仿真数据的



图6 振动响应试验传感器与激振器布置

Fig. 6 The location of the vibration sensors and exciters

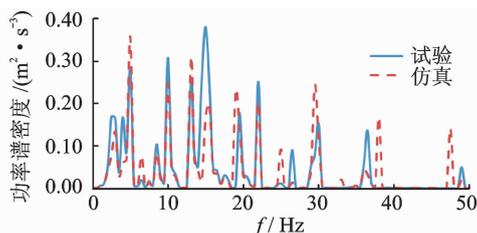


图7 驾驶员座椅导轨处加速度功率谱密度

Fig. 7 Acceleration power spectral density of seat rail

主要峰值频率和幅值与试验曲线较为吻合,证明了模型的准确性。座椅导轨振动响应试验曲线的主要峰值频率为2.5, 4.8, 7.3, 10.3, 13, 15.5, 20.8, 24.3, 26.7, 30.1, 37.7和49.1 Hz。

因为驾驶室悬置系统采用左右对称设计方式,且液压悬置在横向和纵向主要表现传统橡胶悬置的弹性特性,不是本研究关注的重点,所以优化变量为前后悬置的刚度和阻尼,共4个设计变量。优化目标是驾驶员座椅处振动加速度均方根值(RMS)最小。优化过程中,设定约束条件为悬置优化动刚度和相位角的变化范围相对于原悬置为-30%~30%。优化方法采用动力响应法,因为驾驶室液压悬置的非线性很强,因此选取关键频率点进行优化。笔者根据振动响应试验座椅导轨处的振动峰值频率选取了14个频率点,如表2所示,优化后的频率点刚度和相位角是一系列离散的点。以频率10Hz动特性优化为例,优化后前悬置动刚度为275 N/mm,相位角为19 deg;后悬置动刚度为588 N/mm,相位角为22 deg。图8为优化前后的测点时域响应。

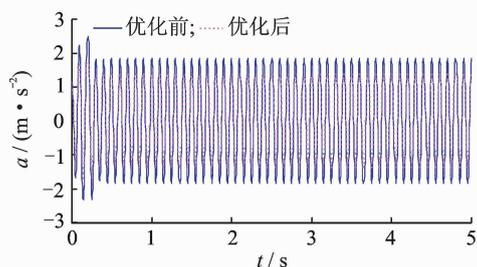


图8 优化前后测点时域响应

Fig. 8 Time domain response on measurement points

表2 不同频率下优化前后测点的加速度RMS值

Tab. 2 The acceleration RMS value on measurement points in different frequencies

频率点/Hz	优化前 RMS	优化后 RMS	降低幅度/%
1.0	215.7	182.2	15.5
5.0	923.3	798.9	13.5
10.0	1 336.7	997.3	25.4
13.8	1 746.6	1 469.8	15.8
15.0	1 986.1	1 597.6	19.6
16.5	2 177.5	1 698.4	22.0
18.0	2 289.6	1 810.4	20.9
19.5	2 366.5	1 944.7	17.8
20.0	2 471.2	1 976.9	20.0
23.0	3 114.1	2 403.9	22.8
26.0	3 745.4	2 798.8	25.3
30.0	4 476.5	3 581.2	20.0
38.0	5 197.6	3 998.6	23.1
50.0	6 535.8	5 186.5	20.6

笔者仅以前悬置为例来介绍不同频率下动特性的优化结果,如图9,10所示。为了便于与原动特性曲线对比及根据优化结果进行悬置设计,添加了优化后动特性离散点的趋势线。根据文献[10]研究结果,调整不同的结构参数可以对液压悬置的动特性产生相应的影响。对比原悬置与优化后悬置的动特性曲线,重新设计调整了液压悬置主簧刚度与液室体积刚度,并试制样件,进而进行台架试验测得其动特性。从图中可以看出,改进后的悬置样件动特性基本符合优化设计要求。

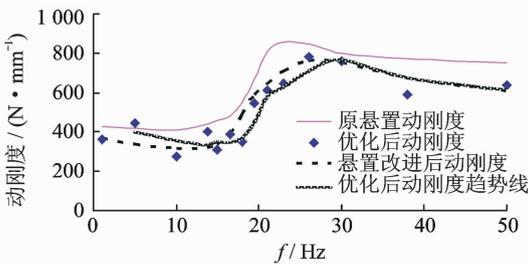


图9 悬置动刚度

Fig. 9 Dynamic stiffness of suspension

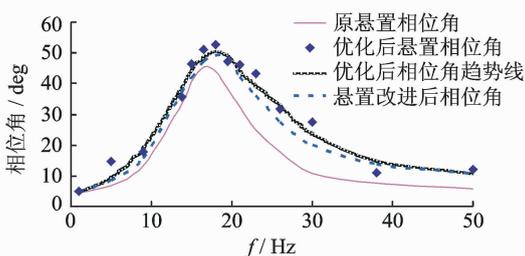


图10 悬置相位角

Fig. 10 Phase angle of suspension

### 3 悬置匹配整车试验验证

为了验证悬置匹配的合理性,对改进后的悬置样件进行了整车试验验证。试验工况分为定置定转速工况和道路试验匀速工况,测量了悬置改进前后的振动传递率与驾驶员座椅导轨的振动加速度均方根值,并进行了对比。

图11所示为驻车发动机定转速工况下悬置的振动传递率。从图中可以看出,改进后的悬置在各个转速下的振动传递率均下降,新悬置较原悬置有更好的隔振性能。

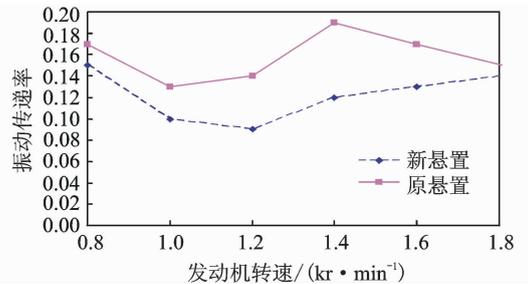


图11 定置定转速工况悬置z向振动传递率

Fig. 11 Vibration transmissibility in z-direction of suspension in engine speed-set parking conditions

图12,13所示为上述4种工况下驾驶员座椅导轨的振动幅值。从图中可以看出,优化匹配后的液压悬置能够更好地衰减驾驶室内部的振动,提高驾驶舒适性。

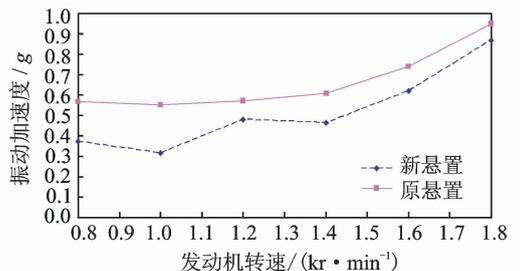


图12 定置定转速驾驶员座椅导轨z向振动加速度均方根

Fig. 12 Vibration acceleration RMS in z-direction of driver's seat track in engine speed-set parking conditions

### 4 结束语

驾驶室液压悬置由于其较强的非线性弹性特征,难于对其进行优化匹配。笔者建立了驾驶室的

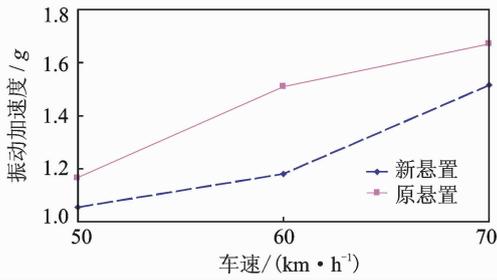


图13 稳定车速工况座椅导轨 $z$ 向振动加速度均方根值  
Fig. 13 Vibration acceleration RMS in  $z$ -direction of driver's seat track in steady speed condition

弹性体模型,并通过模态试验验证了模型的正确性。在多体动力学软件中建立了基于弹性体驾驶室的液压悬置系统模型,并在多个频率下对悬置的动刚度和相位角进行优化。根据优化结果重新设计并试制了液压悬置样件,进行了整车试验验证。结果表明,优化后的悬置隔振性能有所提高,验证了所提优化匹配方法的正确性,为驾驶室或发动机液压悬置动特性匹配提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 陈静,曹晓林,王登峰,等. 重型商用车驾驶室空气悬置系统的匹配优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(5): 1125-1129.  
Chen Jing, Cao Xiaolin, Wang Dengfeng, et al. Matching and optimization of heavy commercial vehicle cab air suspension system[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(5): 1125-1129. (in Chinese)
- [2] Pang Hui, Li Hongyan, Fang Zongde, et al. Test research for effects of the cab suspension system on heavy vehicle ride comfort[C]//2010 2nd International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Wuhan: IEEE Computer Society, 2010: 113-116.
- [3] Christopherson J, Nakhaie Jazar G. Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 1 Mathematical analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,290: 1040-1070.
- [4] Wang Lirong, Wang Jiakai, Hagiwara I. An integrated characteristic simulation method for hydraulically damped rubber mount of vehicle engine[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005,286:673-696.
- [5] Fan Ranglin, Lü Zhenhua. Fixed points on the nonlinear dynamic properties of hydraulic engine mounts and

parameter identification method; experiment and theory [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305: 703-727.

- [6] Christopherson J, Nakhaie Jazar G. Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 2 finite element analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,290(3): 1040-1070.
- [7] 周长路,范子杰,陈宗渝,等. 微型客车白车身模态分析[J]. 汽车工程,2004,26(1):78-80.  
Zhou Changlu, Fan Zijie, Chen Zongyu, et al. Modal analysis for body-in-white of a mini bus[J]. Automotive Engineer, 2004,26(1):78-80. (in Chinese)
- [8] 王海霞,汤文成,钟秉林,等. CJ6121GCHK型客车车身骨架有限元建模及结果分析方法研究[J]. 汽车工程,2001,23(1): 33-36.  
Wang Haixia, Tang Wencheng, Zhong Binglin, et al. A study on finite element modeling and result analysis for bus body structure [J]. Automotive Engineer, 2001,23(1): 33-36. (in Chinese)
- [9] 陈志勇,史文库,沈志宏,等. 轻型客车车身车架整体结构有限元模态分析[J]. 振动与冲击,2010,29(10): 244-246.  
Chen Zhiyong, Shi Wenku, Shen Zhihong, et al. Modal analysis for body and frame of a light-type bus[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(10): 244-246. (in Chinese)
- [10] 陈志勇,史文库. 基于液固耦合有限元分析的驾驶室液压悬置结构参数[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(S2): 98-103.  
Chen Zhiyong, Shi Wenku. Structure parameter of light vehicle cab's hydraulic mount based on fluid-structure interaction finite element analysis[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011,41(S2): 98-103. (in Chinese)



**第一作者简介:**史文库,男,1960年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为汽车系统动力学与控制。曾发表《多级非线性双质量飞轮参数设计和优化》《《振动与冲击》2009年第28卷第5期》等论文。

E-mail: shiwk@jlu.edu.cn

**通信作者简介:**陈志勇,男,1980年10月生,博士、讲师。主要研究方向为汽车系统动力学与控制。

E-mail: chen\_zy@jlu.edu.cn