

轻型载货汽车减振技术分析 & 优化设计*

黄雪涛, 顾亮, 吕唯唯
(北京理工大学机械与车辆学院 北京, 100081)

摘要 对某轻型载货汽车产生的低频振动现象进行了试验分析及优化设计研究。在对轻型载货汽车振动测试分析的基础上,利用有限元仿真和拓扑优化技术对样车进行了固有频率分析和优化设计。通过对样车的振动测试及有限元分析,找到了轻型载货汽车产生低频振动的主要原因:车辆系统的1阶固有频率与车轮动不平衡引起的激励频率接近,导致了车辆系统的共振。分析及试验结果表明,通过优化车架的结构和匹配驾驶室橡胶垫块的刚度能够提高车辆系统的1阶固有频率,明显改善轻型载货汽车产生的低频异常振动现象,提高了车辆的乘坐舒适性。

关键词 减振技术; 车辆系统; 固有频率; 拓扑优化
中图分类号 TH113; U461; TH87

引言

车辆的低频振动严重降低了汽车的乘坐舒适性和零部件的使用寿命,是影响车辆的质量和性能的关键因素之一。然而,影响车辆振动的因素较多,如地面的不平度、车轮的动不平衡、发动机的冲击激励等^[1],并且其内部的关系错综复杂,这些为车辆的减振技术研究带来了困难。

笔者以某轻型载货汽车为例,研究了车辆低频异常振动的减振技术。首先,借助于HyperWorks^[2]软件及整车振动道路测试技术,分析车辆系统低频振动产生的原因;然后,利用拓扑优化技术^[3]对车架结构进行拓扑优化设计,研究了提高车辆固有频率的途径;最后,分析了驾驶室橡胶垫块刚度对车辆系统固有频率的影响,寻找改善车辆系统低频异常振动的方法和途径,并通过整车道路试验检验了理论研究和有限元仿真结果的合理性。

1 车辆低频振动测试及振动异常原因分析

为了确定车辆异常振动的振动源及振动的传递途径,对满载工况下故障样车的振动情况进行了测试。测试采用压电式加速度传感器对驾驶室支撑、驾驶室、悬架及车架处的振动信号进行采集,对采集到的数据进

行分析,得到的驾驶室自功率谱如图1所示。

由振动测试结果及图1可知,故障样车以45~55 km/h的速度行驶时发生共振现象。在49 km/h时,驾驶室的自谱峰值频率为5.249 0 Hz,加速度均方峰值为0.065 1 g²/Hz。振动频率随着车速变化而变化,表明该异常振动与车轮的动不平衡激励有关。

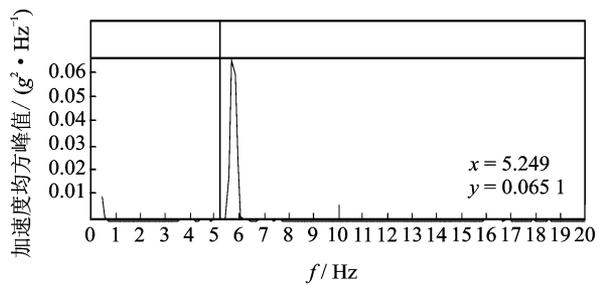


图1 速度为49 km/h时驾驶室的自功率谱

2 车辆系统固有频率分析

为了分析车辆系统的固有频率,可以用许多大小为10 mm的单元来逼近车架系统的几何形状,驾驶室及车厢总成采用质量及刚性单元来简化,建立的车辆系统有限元模型如图2所示。

通过假设每个单元的某一简单解,运用协调和平衡关系来求解车辆连续系统的某一近似解。这样车辆连续系统固有频率的分析可以用多自由度无阻尼保守系统来近似,则其运动微分方程可以采用矩阵的形式表示为

* 国家自然科学基金资助项目(1030020220707)

收稿日期:2012-05-01;修改稿收到日期:2012-06-30

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

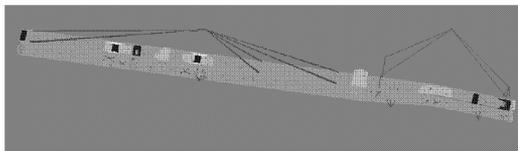


图2 车辆系统的有限元模型

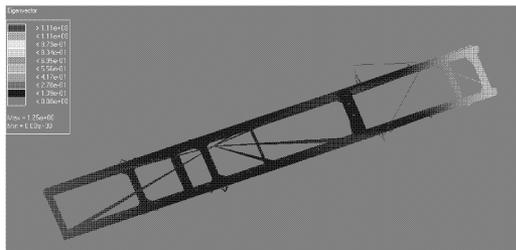


图3 车辆系统的1阶弯曲振型

其中： m 为车辆系统的质量矩阵； x 为车辆系统的位移矩阵； \ddot{x} 为车辆系统的加速度矩阵； k 为车辆系统的刚度矩阵。

假设

$$x_i(t) = X_i T(t) \quad (2)$$

其中： X_i 为常数； T 为时间 t 的函数。

式(2)表明两个坐标的振动位移之比与时间无关，即所有的坐标作同步运动。在运动过程中，系统的位形不能改变其形状但能改变其大小^[4]。系统的位形可以用矢量的形式表示为

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

称为系统的模态^[5]，所以

$$m\mathbf{X}\ddot{T}(t) + k\mathbf{X}T(t) = 0 \quad (4)$$

写成 n 个独立标量形式的方程，即

$$\left(\sum_{j=1}^n m_{ij} X_j \right) \ddot{T}(t) + \left(\sum_{j=1}^n k_{ij} X_j \right) T(t) = 0 \quad (5)$$

令

$$\omega^2 = - \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = \frac{\sum_{j=1}^n k_{ij} X_j}{\sum_{j=1}^n m_{ij} X_j} \quad (6)$$

则

$$(\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m})\mathbf{X} = 0 \quad (7)$$

所以

$$\Delta = |\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}| = 0 \quad (8)$$

式(8)为该运动微分方程的特征方程， ω 为系统的固有频率，车辆系统的前4阶固有频率见表1。

表1 车辆系统的前4阶固有频率

阶数	1	2	3	4
f/Hz	5.48	6.54	18.72	23.97

车辆系统的第1阶弯曲振型如图3所示。

由图3可知，车辆系统的1阶弯曲振型的频率为5.48 Hz，这与试验测得的共振频率基本相符，从而

证明车轮的动不平衡激励与车辆的固有频率产生的共振现象是故障样车产生低频振动的主要原因。

3 车架结构的优化设计

为了改善车辆的低频振动现象，必须消除车轮的动不平衡与车辆固有频率的共振现象。改善车轮的动不平衡需要严格控制车轮的生产质量，成本较高且操作困难，因此笔者通过优化车架结构，改变车辆系统固有频率来降低车辆的低频振动现象。借助于OptiStruct软件的优化设计平台，运用固态各向同性材料惩罚模型(solid isotropic material with penalization, 简称SIMP)变密度插值法^[6]，将提高车辆系统的1阶频率为优化目标，以车架各组件的厚度为设计变量(取值范围为3~20 mm)，进行车架的拓扑优化设计，得到的拓扑优化设计结果如图4所示。

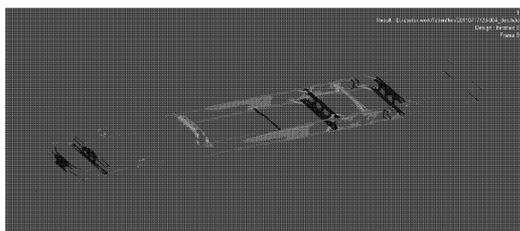


图4 车架的拓扑优化结果

由图4可知，要提高车架的1阶固有频率，主要应加强车架的纵梁和第1~6横梁的厚度。根据车架拓扑优化结果，结合车架的实际情况，优化设计方案采用加强纵梁和横梁的方式，第1~6横梁的尺寸由原来的4 mm增加到6 mm，同时，在第3横梁和第7横梁之间增加一个厚度为4 mm的衬梁，则优化后车架的前4阶固有频率如表2所示。

表2 优化后车架的前4阶固有频率

阶数	1	2	3	4
f/Hz	6.08	9.37	16.28	37.75

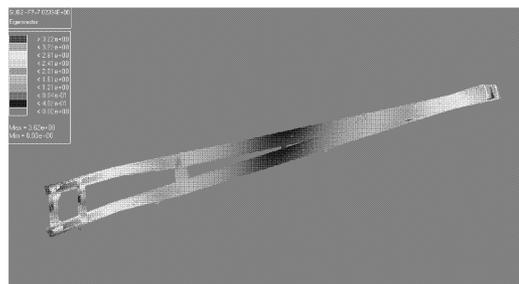


图5 优化后的车架结构

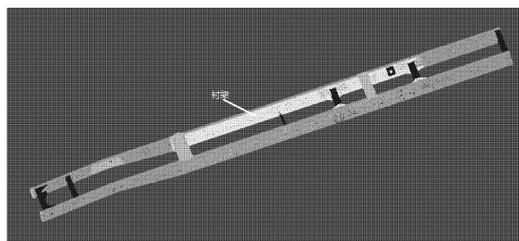


图6 优化后车架的一阶振型

优化后的车架模型及其1阶振型如图5、图6所示的5.48 Hz提高到6.08 Hz,1阶振型由原来的1阶弯曲振型转化为弯扭组合振型,车辆系统的1阶频率有所提高。经样车试验验证,整车的低频振动现象有所改善,但是效果不太明显。这主要是由于车辆系统发生低频异常振动的原因为车辆系统的固有频率与车轮的动不平衡引起的外部激励发生共振造成的,而车辆异常振动主要发生在车速为45~55 km/h时。在该速度下,车轮的动不平衡引起的激励频率在5.3~6.49 Hz之间,故优化后的车辆系统的1阶固有频率仍落在车轮动不平衡的激励区内,二者的共振现象仍然存在。

4 橡胶垫块的刚度优化

为了进一步优化车辆系统的固有频率,结合车辆系统的有限元模型,对驾驶室橡胶垫块的刚度进一步优化。经试验及有限元模型的验证分析,驾驶室橡胶垫块的刚度对车辆系统1阶固有频率影响明显,增加橡胶垫块的刚度能够提高车辆系统的固有频率^[7]。笔者采用增加30%橡胶垫块刚度的方法来

进一步提高车辆系统的固有频率,优化前、后橡胶垫块的刚度变化如表3所示。

刚度优化后,车辆系统的固有频率由原来的6.08 Hz提高到7.02 Hz,有效地避免了车辆系统的固有频率与常用车速下车轮的动不平衡激励引起的共振现象,降低了车辆的低频振动。

5 试验验证

为了检验优化方案的减振效果,对优化后的故障样车进行了整车振动道路试验,并记录驾驶室在49 km/h时的振动数据,优化后的驾驶室的自功率谱如图7所示。

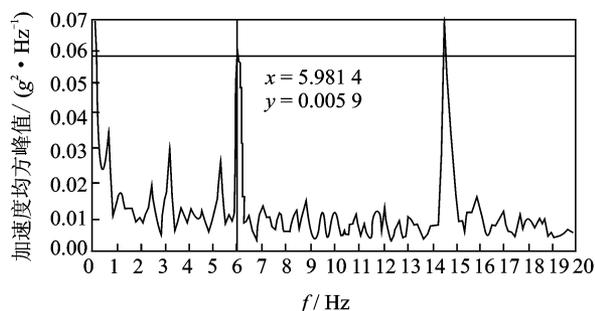


图7 优化后驾驶室的自功率谱

由图7可知,采用优化方案后,驾驶室的低频异常振动现象得到明显改善,驾驶室处的加速度均方峰值由原来的0.0651 g^2/Hz 降低到0.0059 g^2/Hz ,比优化前降低了91%,整车的低频异常振动现象基本得到解决。在5.98 Hz及14.6 Hz附近出现的加速度均方峰值可能含有优化后的倍频成分,也可能是其他外部激励造成的整车振动响应,但振动的幅值较小,不会对车辆的乘坐舒适性产生大的影响。

6 结束语

笔者主要研究了轻型载货汽车低频异常振动产生的原因,并结合计算机仿真技术探讨了降低故障样车低频振动的方法,采用车架结构优化及匹配驾驶室橡胶垫块刚度的方法,整改成本低,可操作性强。经整车振动道路试验验证,该方法能够明显改善

表3 优化前、后驾驶室橡胶垫块的刚度

刚度	驾驶室前软垫			驾驶室后软垫		
	$x/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$y/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$z/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$x/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$y/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$z/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
优化前	533	109	533	368	368	251
优化后	700	150	700	480	480	330

车辆的低频振动现象,提高了车辆的平顺性和乘坐舒适性。

参 考 文 献

- [1] Hou Shuzhan, Sun Xiaoduan, He Yulong, et al. Vehicle's shock absorbing capacity and roadway rumble strips[C]//10th International Conference of Chinese Transportation Professionals-Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, ICCTP 2010. Beijing, China: American Society of Civil Engineers, 2010: 585-590.
- [2] 于国飞. HyperWorks 在汽车白车身模态分析中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 138-140, 168.
Yu Guofei. Modal analysis of body-in-white of multi-purpose vehicle car based on HyperWorks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 138-140, 168. (in Chinese)
- [3] 茅志颖, 陈国平, 张保强. 运用拓扑优化的结构损伤定位[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 42-45, 160.
Mao Zhiying, Chen Guoping, Zhang Baoqiang. The structure damage localization using topology optimization method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 42-45, 160. (in Chinese)
- [4] Sakai T, Daimaruya M, Shi J, et al. Development of an air spring engine mount system for a medium duty truck[J]. Noise Control Engineering Journal, 2010, 58: 176-186.
- [5] Blood R P, Dennerlein J, Lewis C, et al. Evaluating whole-body vibration reduction by comparison of active and passive suspension seats in semi-trucks[C]//55th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Las Vegas, NV, United States: Human Factors and Ergonomics Society Inc., 2011: 1750-1754.
- [6] Chen Jing, Li Zhengmao, Wang Dengfeng, et al. Weight-reduction design on mounting bracket of commercial vehicle cab[C]//2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, ICCET 2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 195-199.
- [7] Mehta C R, Tewari V K. Damping characteristics of seat cushion materials for tractor ride comfort[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47: 401-406.



第一作者简介:黄雪涛,男,1978年6月生,博士研究生。主要研究方向为计算机仿真及车辆的振动与噪声控制。曾发表《Research of frame optimization technology based on SIMP》《In 3rd International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2012》等论文。

E-mail: xuetaohuang@163.com