

基于 Hilbert 变换的车辆过坎振动衰减评价方法

边 姜, 段向雷, 李 贝

(上海汽车集团股份有限公司 技术中心, 上海 201804)

摘 要: 汽车过坎平顺性是车辆性能开发的一个重要内容, 其中冲击强度和振动衰减是两个主要指标。单纯考虑车辆加速度大小并不能充分表征过坎振动衰减的优劣。基于一组对标车辆过坎的试验测量值以及主观评估等手段, 研究应用于整车过坎平顺性评估的振动衰减指标分析方法。分析表明, 基于权系数滤波和 Hilbert 变换的振动衰减指标分析方法, 能够从复杂的时域曲线中提取出振动的衰减特征, 由主、客观试验关联性验证了该指标的有效性, 为过坎平顺性的振动衰减目标的设定、分析优化提供支持。

关键词: 过坎平顺性; 残余抖动; 振动衰减; Hilbert 变换

中图分类号: U463.341

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2019.05.03

Evaluation of Vehicle Vibration Attenuation When Passing Over Speed Bumps Based on Hilbert Transform

BIAN Jiang, DUAN Xianglei, LI Bei

(SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China)

Abstract: The ride comfort plays a major role in vehicle performance. And the impact hardness and memory shake are the key analysis indexes of ride comfort. Only considering the vehicle acceleration is not sufficient to account for the ride comfort characteristics when a vehicle passes a speed bump. This paper presented a method to analyze the index of memory shake, considering both the vehicle bump test and the subjective assessment. It is shown that this method based on the Human Weighting and Hilbert Transform is suitable for the assessment of vibration attenuation in the bump test. The method extracts the characteristics of vibration attenuation from the complex time domain signals. The validity of memory shake index is verified by the good consistency between the objective and subjective assessments. This method could also support setting targets and optimization of the memory shake.

Keywords: ride comfort of speed bump; memory shake; vibration attenuation; Hilbert transform

汽车乘坐平顺性(舒适性)是评价车辆性能优劣的一个重要指标, 随着中国汽车市场竞争的不断加剧, 人们对舒适性的要求越来越高, 对车辆开

发提出了更高要求。一般车辆舒适性开发主要评估工况为随机激励和脉冲冲击, 由试验测得座椅、靠背的加速度响应, 根据加权滤波方法评估人体的

收稿日期: 2019-04-27 改稿日期: 2019-08-17

参考文献引用格式:

边姜, 段向雷, 李贝. 基于 Hilbert 变换的车辆过坎振动衰减评价方法 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(5): 327-331.

BIAN Jiang, DUAN Xianglei, LI bei. Evaluation of Vehicle Vibration Attenuation When Passing Over Speed Bumps Based on Hilbert Transform [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(5): 327-331. (in Chinese)

舒适程度^[1]。常用的评价方法有 NASA 指数法、ISO2631 评级法, 计算加权加速度均方根值 RMS 和振动剂量值 VDV^[2], 指标越小越好。

在国内道路环境中, 经常会遇到各种减速带、减速坎、破损坑、井盖等冲击路面, 一般运动型车辆的悬架偏硬, 过坎冲击较大; 而舒适型车辆悬架偏软, 冲击相对缓和。但是, 过坎冲击之后的衰减振动, 如果控制不好会导致残余抖动较多, 主观感知悬架比较散, 极大地影响对驾驶品质的评价。因此, 对于此类脉冲冲击工况, 单纯考虑车辆加速度大小并不能充分表征过坎舒适性的优劣, 本文主要讨论车辆过坎之后的振动衰减问题。

国内外针对过坎残余抖动方面有一定的研究。JANKOWSKI 等^[3]解释了在车辆低频振动中产生残余抖动的主要原因。杨万安等^[4]使用神经网络建立了过坎冲击和残余振动的主观评估与客观测量之间的关联性, 其中使用频域幅值比定义残余抖动。BENNUR 等^[5]使用多体动力学方法对过坎冲击和残余抖动进行了参数优化。李小龙等^[6]介绍了一种轮胎冲击的残余抖动指标处理流程, 通过响应衰减时间、响应包络等表征残余抖动大小; 陈龙等^[7]则采用修正的辅助评价方法评估冲击平顺性, 提取前轮过凸块的三向轴加权加速度均方根总值的最大值来评价综合平顺性。上述研究工作定义了不同的振动衰减计算方法, 但应用于整车的过坎平顺性评估, 特别是与主观驾驶车辆过坎评价的一致性关系, 则没有涉及。李晓雨^[8]以冲击和振动衰减的主观评价方法为基础, 采用悬架调试法提高车辆过坎评价水平, 但依赖于调试参数变化的手段缺乏必要的方向性客观目标。

本文在上述研究的基础上, 针对上汽某车型开发中的过减速坎振动衰减的评估问题, 研究应用于整车过坎平顺性评估的振动衰减指标分析方法, 通过主、客观试验关联验证此方法, 为过坎平顺性的振动衰减目标的设定、分析优化提供支持。

1 车辆过减速带试验采集

首先进行了实车加速度试验, 测量不同车辆过

坎加速度响应, 测点包括轮心、减振塔、车身纵梁、悬置、门槛、座椅导轨等关键传递路径。如图 1 所示, 试验场地为城市道路中常见的减速带, 在测点布置三向加速度传感器, 分别进行 20 km/h、30 km/h 等不同车速的过坎测试, 采样频率为 1 000 Hz。为了对比不同车辆的差异, 同时进行了包含对标车在内的 7 台试验车辆的加速度测量。



图1 实车过减速带加速度测量

其中, 车速为 20 km/h 时, 2 号车和 6 号车过减速带的座椅加速度, 如图 2 所示。由图可知, 座椅纵向 (x)、垂向 (z) 加速度在轮胎驶过减速带的第 1 个最大波峰波谷之后, 有比较明显的振动衰减过程。此外, 两台车的加速度响应曲线在衰减阶段也有较大差异, 6 号车的衰减速度较快。

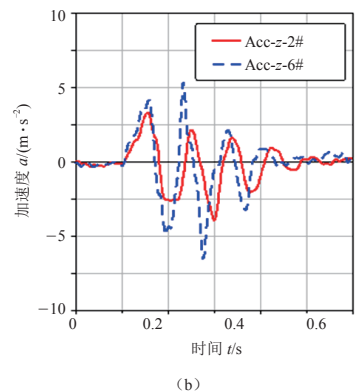
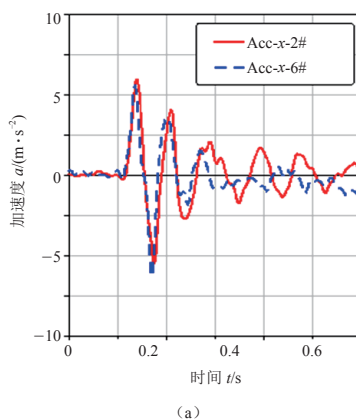


图2 座椅导轨 x 、 z 向加速度变化曲线

对于评价瞬态冲击的四次方振动剂量法，如式（1）所示，需要计算时域历程的加速度加权值的四次方振动剂量值（Vibration Dose Value, VDV）与均方根值（Root Mean Square, RMS）类似，反映的是振动的平均能量和强度。图 2 中两台车的 VDV、RMS 指标差异不大，说明基于时域均方根值的统计方法无法判断振动衰减。

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中： $a_w(t)$ 为经过权系数滤波后的加速度时域曲线； t 为时间； T 为采样周期。

2 主观评价

在获取 7 台车时域加速度响应之后，某些近似车型的过坎响应曲线特征很接近，如图 3 所示，从曲线上无法判断“最优”的振动衰减响应，所以需要研究振动衰减的目标如何设定。为此，本文考虑采用主观评价的方法得出评价结果。主观评价需要考虑驾驶员和乘员的主观感受，然后进行统计分析。由于个体差异性，最终得出的评价数据差异可能较大，通过统计平均值能够在一定程度上反映多数客户的主观感知程度。

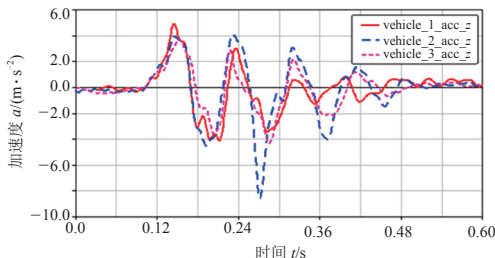


图 3 某 3 台车 z 向加速度时域曲线对比

本研究组织了上汽日常驾驶经验较为丰富的 12 名工程师，对过坎振动衰减进行主观评估。从客户对实车过坎的主观评价角度出发，寻找车辆过坎评价中对于振动衰减方面较好的一般性规律。测试车辆分别以 20 km/h 和 30 km/h 的速度依次驶过减速带，并依据图 4 中的主观评价打分方法对 7 台车的

过坎平顺性进行主观评估，此方法综合了 SAE 和德国的打分方法。评价项目是冲击过后的振动衰减，关注测试车辆在驶过单次激励后，悬架是否存在持续的振颤或跳动^[8]。

评分	车型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	备注
性能评价		不合格			及格		良好			优秀		20 km/h、 30 km/h 各跑两次
存在的问题		很严重不可接受			有明显不适感		很小			几乎感觉不到		
车型	1#											
	1#											

图 4 主观评价打分方法

表 1 为 12 位驾驶员对 7 台车的主观评估结果，统计方法为去掉每台车不同驾驶员给出的最高分和最低分之后的平均值。所有评估车辆均为轿车，其中 6 号、7 号车为中高级轿车，打分也相对较高，其余 1~5 号车均为紧凑型家用轿车。由表 1 可知，不同车辆的主观评估分值有明显差异。可据此研究与此打评分值对应的客观评价方法，从而为过坎平顺性开发确定用于振动衰减评估的目标曲线。

表 1 振动衰减的主观打评分值

车号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
分值	5.3	4.5	4.5	5.9	6.7	6.8	8.5

3 过坎振动衰减评价方法

3.1 振动衰减评价方法

杨万安等^[4]将振动时域信号进行快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT），并将因此所得的衰减幅值 A2、A3 与 A1 组合起来以表征残余抖动特性，如图 5 所示。由于 FFT 频谱变换的影响因素较多，选择求解包络面积的方法，根据面积的无量纲指标^[6]，进行不同车辆的横向对比，如图 6 所示。座椅加速度原始数据 $x_0(t)$ 经带通滤波、Human Weighting 权系数滤波，求解 Hilbert 变换和绝对包络的面积。

$x(t)$ 为经过 Human Weighting 权系数滤波后的时域信号，与 $h(t)=1/\pi t$ 函数的卷积，得到如式（2）所示的 Hilbert 变换，即包络曲线。

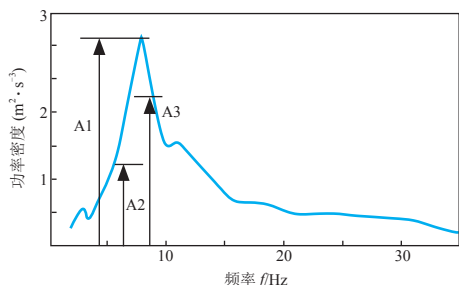


图5 基于FFT幅值比的振动衰减指标提取

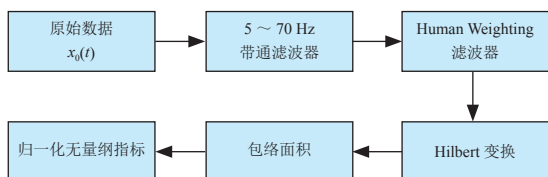


图6 基于Hilbert变换的振动衰减指标计算流程

$$\hat{x}(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau. \quad (2)$$

式中： $x(t)$ 表示原始信号 $x(t)$ 的包络； $*$ 表示卷积。

积分求取式(2)的包络面积求解，得到无量纲的残余抖动指标 Y_{shake} ，如式(3)所示。

$$Y_{\text{shake}} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{x}(t)| dt \right) \times A_0. \quad (3)$$

式中： A_0 为归一化因子； $\hat{x}(t)$ 是式(2)计算所得的原始加速度曲线的包络信号。

3.2 客观试验的指标评价

基于上述流程，以评估车速 20 km/h 为准，选取所有车型座椅导轨加速度数据，计算过坎振动衰减指标。图7为某车型座椅导轨垂向加速度的时域响应曲线和包络曲线。

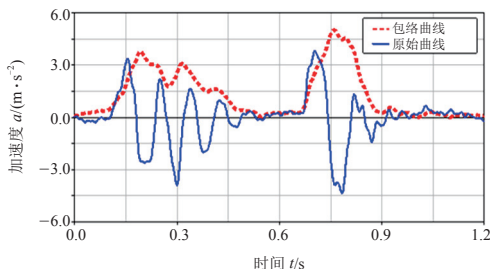


图7 加速度数据求解系数包络

根据计算得到的纵向 x 和垂向 z 的振动衰减值，取 x 向和 z 向轴间权系数为 1，得到综合的振动衰减客观试验计算指标。基于各组试验曲线的时域统计指标，无量纲化后得到 7 台车的一组比例关系。

将得分最高的 7 号车指标取为 8.5，根据上述比例关系列出其余 6 台车的客观试验分值，并与表 1 的主观得分进行对比，如图 8 所示。对比后发现，上述振动衰减指标计算方法，其得分值与主观评估的规律基本一致。除了 1 号车的客观试验值比 4 号车略高，排序有颠倒，其余从高到低的排序与主观评估得分规律完全一致，说明了用此方法评价的振动衰减特征能够较好地代表客户的实际主观感知。

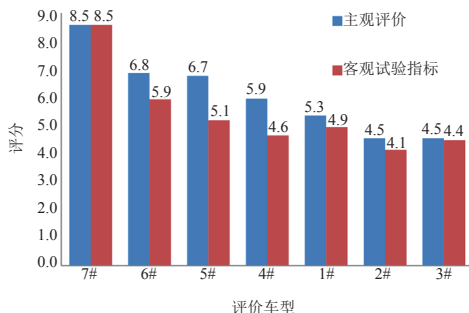


图8 振动衰减的客观试验与主观评价对比

4 结论

针对上汽某车型开发中的过减速坎振动衰减评估问题，本研究应用于整车过坎平顺性评估的振动衰减指标分析方法，有以下结论：

(1) 实车测量直观地获取不同车辆的过坎加速度响应，但不便于评价振动衰减。由主观评价得到真实客户对过坎振动衰减的评价，由统计指标获取评价分值，给出过坎评价的方向性规律。

(2) 通过考虑人体频率敏感性的权系数滤波和 Hilbert 变换，得到衰减振动过程中的曲线包络面积和统一的过坎振动衰减评价指标。分析发现，此方法与主观评价得到的分值规律基本一致，说明了此振动衰减评价指标的有效性，能够较好地代表客户的实际主观感知。

本研究通过客观测量、主观评价, 以及采用基于客观试验的振动衰减指标分析方法, 得到与主观评价较为一致的客观打分方法, 能够为平顺性开发中针对过坎振动衰减的评价分析提供有效支持, 可

以对不同的响应曲线进行客观打分对比, 并针对当前的过坎响应, 通过客观指标进行动力学参数优化, 具有较高的工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 唐传茵, 张天侠, 李华, 等. 汽车振动舒适性评价研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 27(9): 158-161, 166.
TANG Chuanyin, ZHANG Tianxia, LI Ha, et al. Study on Vehicle Vibration Comfort Evaluation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 27(9): 158-161, 166. (in Chinese)
- [2] 夏均忠, 马宗坡, 方中雁, 等. 汽车平顺性评价方法综述 [J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4): 1-5.
XIA Junzhong, MA Zongpo, FANG Zhongyan, et al. Review for the Current Evaluation Methods of Vehicle Ride Comfort [J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] JANKOWSKI K P, DODD P G, PERIAM D, et al. Analytical Investigation of Light Truck Low Frequency Vibration [C]// SAE Technical Papers, 981170, 1998.
- [4] 杨万安, 王强, 王峰. 车辆过坎冲击及残余抖动主客观评估关联性分析 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 82-86.
YANG Wan'an, WANG Qiang, WANG Feng. Correlation of Subjective Evaluation and Objective Tests for Impact Hardness/Memory Shake When Vehicles Passing Speed Bumpers [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 82-86. (in Chinese)
- [5] BENNUR M, HOGLAND D, ABBOUD E. Multi-Disciplinary Robust Optimization for Performances of Noise & Vibration and Impact Hardness & Memory Shake [C]// SAE Technical Papers, 2009-01-0341, 2009.
- [6] 李小龙. 轮胎冲击性能的数值分析方法与研究 [J]. 上海汽车, 2017(8): 34-38.
LI Xiaolong. Numerical Analysis Method and Research of the Tire Impact Performance [J]. Shanghai Auto, 2017(8): 34-38. (in Chinese)
- [7] 陈龙, 方彦腾, 何家兴, 等. 车辆冲击平顺性客观评价方法研究与设计优化 [J]. 机电工程技术, 2018, 49(10): 109-115.
CHEN Long, FANG Yanteng, HE Jiaying, et al. Vehicle Ride Impact Objective Method Research and Design Optimization [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 49(10): 109-115. (in Chinese)
- [8] 李晓雨. 某车型冲击舒适性优化的底盘调校 [J]. 汽车工程师, 2016(5): 40-43.
LI Xiaoyu. Chassis Tuning Based on the Optimization of the Vehicle Impact Comfort [J]. Auto Engineer, 2016(5): 40-43. (in Chinese)

作者介绍



责任作者: 边姜 (1977-), 男, 黑龙江五大连池人。硕士, 高级工程师, 主要从事整车产品与性能开发研究。

Tel: 021-61388572

E-mail: bianjiang@saicmotor.com



通讯作者: 段向雷 (1986-), 男, 河南洛阳人。博士, 主要从事车辆动力学研究。

Tel: 021-61385462

E-mail: duanxianglei@saicmotor.com