

基于小波变换的汽车平顺性研究

李 龙, 郑永安, 史忠科

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

摘 要:依据国际标准 ISO2631 和国家标准 GB/T4970《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》对某型轿车进行平顺性试验,采集了汽车座椅底板处三轴振动加速度值。以 Matlab 为软件开发平台,实现了评价标准中时域法和频域法计算加权加速度均方根值,并重点研究了小波变换方法在汽车平顺性评价中的应用,实现了小波变换方法计算加权加速度均方根值。对三种计算方法进行比较,结果表明:各种算法计算结果差距不大,时域法更简洁;频域法适用于 1/3 倍频程分析人体振动影响;小波变换方法结果更接近于时域法,并且其具有时频局部分析特点,可以较好地应用于汽车平顺性研究中。

关键词:汽车;平顺性;小波变换;时域法;频域法

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)04-0158-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.04.040

Research on Vehicle Ride Comfort Based on Wavelet Transformation

LI Long, ZHENG Yong-an, SHI Zhong-ke

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract:Based on the international standard ISO2631 and national standard GB/T4970 "Method of running test-automotive ride comfort", the ride comfort tests are conducted on a car and the triaxial vibration acceleration values of the car seat are collected. Time domain, frequency domain and wavelet transform algorithm which can calculate the weighted root-mean-square acceleration are implemented with the Matlab software development platforms. Wavelet transform algorithm is key research. The results show that the outcomes of calculation with different algorithms don't have significant differences, time domain method is more sample; frequency domain method is suitable for 1/3 octave analysis of the impact of human vibration; wavelet transform method results closers to the time domain, and because of the frequency characteristics of local analysis, it can be better used in the vehicle ride comfort.

Key words: vehicle; ride comfort; wavelet transform; time domain method; frequency domain method

0 引言

随着生活品质的提高,人们在选购汽车的时候不仅仅考虑汽车的驾驶性能方面,也更多地考虑汽车安全舒适性方面。汽车平顺性(即舒适性)被定义为汽车在行驶过程中将乘员承受的振动频率和幅度保持在一定界限内。目前,国外一些非常著名的汽车公司(如意大利的 Ferrari 公司、英国的 MIRA 公司)已依据 ISO 标准建立了适合自主车型的评价方法,并且很多学者也都进行了相关的研究^[1-4]。与国外汽车平顺性研究相比,国内汽车厂家都起步较晚,并且评价方法比较单一^[5-7]。文中在已有时域和频域的汽车平顺性评价方法的基础上,探讨了小波变换方法在汽车平顺性评价方法的应用。小波变换的分析精度可调,使其既能对信号中短时高频信号成分进行定位,又能对信

号的低频部分进行分析,能方便分析汽车振动的状况。通过该方法计算取得了与上述两种方法相一致的结果,因而小波变换方法可以应用于汽车平顺性分析中。

1 试验系统构成

该试验系统由加速度传感器采集板和数据分析系统构成。数据采集板包括 32 位的 ARM7 控制器(LPC2292)、三轴加速度传感器 ADXL345 和 SD 卡,数据分析系统包括上位机和 Matlab 分析软件。

三轴加速度传感器通过 IIC 总线与 LPC2292 进行通信,LPC2292 将采集到的三轴加速度值通过 SPI 总线存储到 SD 卡的文件中。该电路板固定于一块铝板上,再将铝板固定于汽车副驾的车底板处。汽车在校园外的沥青公路上行驶,数据采集板记录汽车行驶过

收稿日期:2013-07-02

修回日期:2013-10-13

网络出版时间:2014-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61134004/F0301)

作者简介:李 龙(1988-),男,硕士研究生,研究方向为振动噪声检测与分析;郑永安,教授,研究方向为交通运输工程。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140128.1133.010.html>

程中的汽车振动情况。采集完后将数据下载到上位机中进行数据分析,评估汽车行驶过程中的舒适性。整个试验过程如图 1 所示。

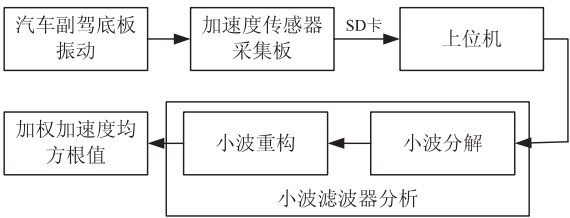


图 1 试验过程图

2 汽车平顺性评价标准

2.1 人体对振动的反应

由于振动的频率、强度、持续时间、作用方向和每个人的身体与心理素质不同,人体对振动的敏感反应程度差异很大。因此 ISO 组织在总结了大量有关人体全身振动研究成果的基础上,制定了国际标准 ISO2631:《人体承受全身振动评价指南》^[8]。其中规定了各轴向的 0.5 ~ 80 Hz 的频率加权函数(渐近线) $w(f)$,可用式(1)、(2)表示。

垂直 Z 方向:

$$w_k(f) = \begin{cases} 0.5 & (0.5 < f < 2) \\ f/4 & (2 < f < 4) \\ 1 & (4 < f < 12.5) \\ 12.5/f & (12.5 < f < 80) \end{cases} \quad (1)$$

水平 X、Y 方向:

$$w_d(f) = \begin{cases} 1 & (0.5 < f < 2) \\ 2/f & (2 < f < 80) \end{cases} \quad (2)$$

ISO2631 标准中规定垂直方向 z_s 的频率加权函数最敏感频率范围为 4 ~ 12.5 Hz,其中 4 ~ 8 Hz 这个频率范围内,人体的内脏器官容易产生共振,而在 8 ~ 12.5 Hz 频率范围内对人体的脊椎系统危害很大;水平方向 x_s 、 y_s 的频率加权函数最敏感频率范围为 0.5 ~ 2 Hz,大约在 3 Hz 以下,水平振动比垂直振动对人影响更严重,并且在此频率范围下汽车车身部分容易产生共振,因而工程师们也应该重视水平方向的振动^[9]。2.2 评价标准

ISO2631-1:1997(E) 标准规定,如果振动波形峰值系数<9 时,采用基本的评价方法—加权加速度均方根值来评价汽车振动对人体舒适性和健康的影响。加权加速度均方根值的计算方法有两种:频域法和时域法。

频域法计算加权加速度均方根值是通过记录加速度时间历程 $a(t)$ 进行频谱分析得到功率谱密度 $G_a(f)$,按式(3)计算得到的。

$$a_w = \left[\int_{0.5}^{80} w^2(f) G_a(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

时域法计算加权加速度均方根值是通过记录的加速度时间历程 $a(t)$,经相应频率加权函数 $w(f)$ 的滤波网络得到加权加速度时间历程 $a_w(t)$,按式(4)计算得到的。

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

若同时考虑座椅前方地板处 x 、 y 、 z 三个方向振动时,三个方向的总加权加速度均方根值按式(5)计算。

$$a_v = \left[(0.25 \cdot a_{xw})^2 + (0.25 \cdot a_{yw})^2 + (0.4 \cdot a_{zw})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

按照 ISO2631 标准, a_v 与人的主观感觉之间的关系如表 1 所示。

表 1 总加权加速度均方根值与人的主观感觉之间的关系

加权加速度均方根值 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	人的主观感觉
<0.315	没有不舒服
0.315 ~ 0.63	有一些不舒服
0.5 ~ 1.0	相当不舒服
0.8 ~ 1.6	不舒服
1.25 ~ 2.5	很不舒适
>2.0	极不舒服

3 小波变换评估汽车平顺性

3.1 小波变换基础

小波变换是一种窗口大小(面积)固定但其形状可改变的时频局部化工具,它可以把数据、函数、算子分成不同频率的组成部分,然后应用与它相适应的分辨率研究每一组成部分,从而有效地从信号中提取信息。处理信号的低频成分,可以使用宽时窗,使得时域分辨率低而频域分辨率高;处理信号的高频成分,则可使用窄时窗,使得时域分辨率高而频域分辨率低。从而解决了 Fourier 变换中时、频域分辨率相互矛盾的问题,实现了多分辨率分析。

当 $\psi(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 为能量有限的信号空间)时,若其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

则称 $\psi(t)$ 为一基本小波函数或母小波函数,其表达式^[10]为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R; a > 0$$

式中, ψ 为基小波; a 、 τ 分别为伸缩因子和平移因子。

3.2 小波分析

在 Matlab 环境中应用 wavelet 工具箱,采用 Mallat

快速算法对采集的汽车副驾座底板处的振动加速度信号进行 8 层小波分解,采用 db25 小波基^[11]。

参照 GB/T4970《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》^[12]对某型轿车进行行驶平顺性试验,采集了汽车副驾座椅底板的各轴向振动加速度信号。试验样本采集时间为 150 s,采样频率为 200 Hz,试验路面为高等级沥青路面,试验工况的车速为 30、40 和 50 km/h。

图 2 为汽车副驾底板处的振动加速度信号的 8 层小波分解结果, $b_1 \sim b_8$ 分别为第一层到第八层高频系数重构的信号。从图中可以看出,第三、四层细节信号的幅值最大,占振动信号中的主要部分,第八层细节信号的幅值最小。图 3 为各层所对应的功率谱图, $b_1 \sim b_8$ 分别对应的频率为 50 ~ 100 Hz、25 ~ 50 Hz、12.5 ~ 25 Hz、6.25 ~ 12.5 Hz、3.125 ~ 6.25 Hz、1.5 ~ 3.125 Hz、0.75 ~ 1.5 Hz 和 0.375 ~ 0.75 Hz。从图中看出能量主要集中在 b_3 和 b_4 ,进一步分析可以看出主要在 10 Hz 到 20 Hz 之间。使用小波分析方法,能够很好表现出汽车振动信号各个频段的能量集中程度,方便分析汽车振动的状况,并且能计算各个频段的功率大小,使每个频段乘以不同的权重,计算出汽车的加权加速度均方根值,把小波分析应用于汽车平顺性评估中。

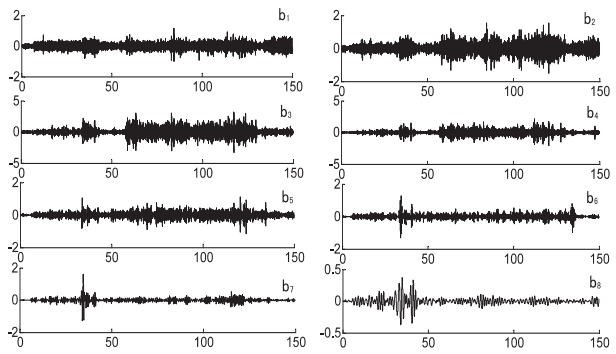


图 2 振动加速度 8 级小波分解

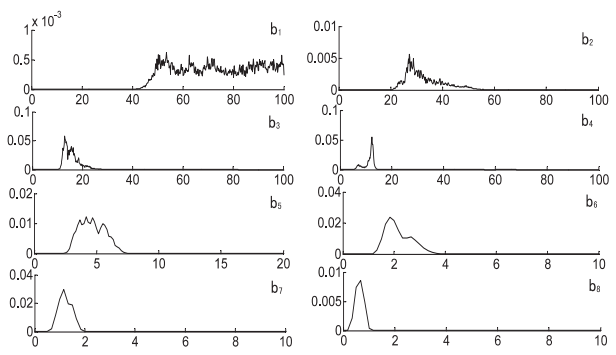


图 3 振动加速度 8 级小波分解功率谱

3.3 加权加速度均方根值计算

振动信号的加权加速度均方根值计算主要通过三个步骤进行:

- a. 通过小波对振动加速度信号进行滤波处理,分解出不同频带信号;
- b. 通过功率谱密度函数计算出不同频带内加速度

- 的均方根值;
- c. 对不同频带的均方根值进行加权求和,求得加权加速度均方根值。

计算流程图如图 4 所示。

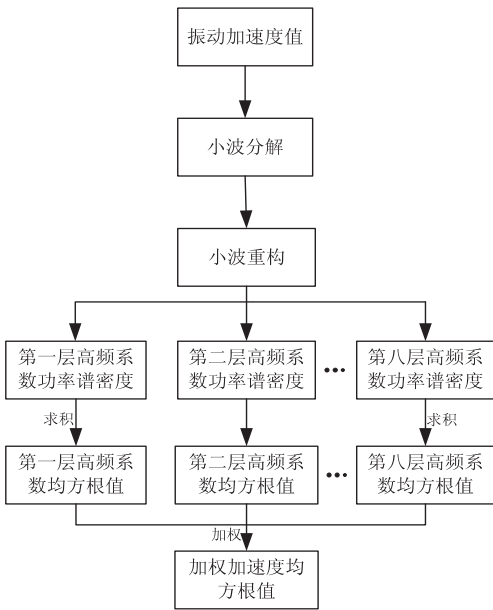


图 4 加权加速度均方根值计算流程图

其中小波分解采用 Mallat 快速算法,使用 db25 小波基进行 8 层小波分析,功率谱求取使用 Welch 算法,加权系数根据 ISO2631 标准中 1/3 倍频带加权系数的不同频带的均值求得,第一层到第八层加权系数分别取值为 $[-14.16, -7.72, -3.04, 0.31, 0.46, -4.12, -6.02, -6.02]$ dB。

4 试验结果对比分析

应用标准中时域法、频域法和小波变换方法分别计算上述采集的加速度值,各自得出加权加速度的均方根值,比较计算的加权加速度均方根值,结果如表 2 所示。

表 2 时、频域法和小波变换法计算
加权加速度均方根值结果对比

车速	轴向	时域法 均方根值 /(m/s ²)	Welch 法 均方根值 /(m/s ²)	小波变换法 均方根值 /(m/s ²)	小波与时 域偏差/%	小波与频 域偏差/%
30 km/h	x 轴	0.212	0.203	0.226	6.2	11
	y 轴	0.185	0.186	0.197	6.1	5.6
	z 轴	0.287	0.283	0.288	0.3	1.7
40 km/h	x 轴	0.255	0.240	0.262	2.7	8.3
	y 轴	0.212	0.207	0.219	3.2	8.4
	z 轴	0.407	0.406	0.407	0	0.3
50 km/h	x 轴	0.233	0.227	0.237	1.7	4.2
	y 轴	0.244	0.239	0.249	2	4
	z 轴	0.544	0.541	0.544	0	0.6

由表 2 可知,小波变换方法计算的加权加速度均

方根值和采用时域法计算的加权加速度均方根值基本一致,与采用频域法计算的加权加速度均方根值有一些误差;在振动的垂直方向上,三种方法计算的结果误差都很小。且随着速度的增加,小波变换方法与时域法计算的结果越来越相近。如 30 km/h ~ 50 km/h 的 x 轴计算的加权加速度均方根值的小波变换法和时频法的偏差分别为 6.2%、2.7% 和 1.7%。总体来说,小波变换法可以应用于汽车的平顺性评估。

5 结束语

文中研究了汽车行驶平顺性试验方法和相关标准,在 Matlab 中实现了时域法和频域法计算加权加速度均方根值的算法,并使用了全新方法即小波变换方法计算加权加速度均方根值。通过试验验证了:小波变换方法计算的加权加速度均方根值与时域法相一致,与频域法有一定误差;并且小波变换的分析精度可调,使其既能对信号中短时高频信号成分进行定位,又能对信号的低频部分进行分析,因此能方便地分析汽车振动的状况。因而,该小波变换方法可以应用于汽车平顺性研究中。

参考文献:

[1] Griffin M J. Discomfort from feeling vehicle vibration[J]. Vehicle System Dynamics,2007,45(7-8):679-698.

(上接第 157 页)

4 结束语

通过以上的研究与应用发现,该心理运动能力测验软件具有良好的内容效度,可以有效地对相关的心理运动能力进行准确的测量。通过对不同层次的测试对象进行有效测试,可以明确显示他们之间的注意力分配能力差异,同时也说明了并不是所有的人都具有飞行员的潜质和优良的心理运动能力,充分验证了该软件的有效性,以及检测飞行员候选者心理运动能力的必要性。因此,为了提高飞行安全系数,减少人员和经济损失,使用该心理运动能力测验软件进行飞行员心理选拔是一种最经济的手段和方法。

参考文献:

[1] 皇甫恩,苗丹民. 航空航天心理学[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2000.

[2] 高翠翠,朱丽娟,李春燕. 中国民航飞行员心理选拔存在问题及改进措施[J]. 考试周刊,2009(11):238-239.

[3] 郭为民,罗晓利,杨 虎. 国内外飞行人员心理选拔研究述评[J]. 国际航空,1995(2):28-31.

[4] 武国城. 中国空军飞行员心理选拔研究概况[J]. 民航医学,2005,15(1):8-10.

[2] Griffin M J. Evaluation of vibration with respect to human response[C]//Proceedings of SAE international congress of exposition. Warrendale, PA:SAE,1986.

[3] Els P S. The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles[J]. Journal of Terramechanics,2005,42:47-64.

[4] Meada S, Mansfield N J, Shibata N. Evaluation of subjective response to whole-body vibration exposure:Effect of frequency content[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008,38(5/6):1-7.

[5] 徐中明,周小林,余 烽,等. 汽车平顺性分析中时域法和频域法的对比[J]. 汽车工程,2012,34(4):306-310.

[6] 宗长富,陈 双,冯 刚,等. 基于频率加权滤波的汽车平顺性评价[J]. 吉林大学学报(工学版),2011,41(6):1517-1521.

[7] 徐中明,张志飞,贺岩松. 对汽车平顺性评价方法的探讨与建议[J]. 汽车工程,2010,32(1):73-76.

[8] ISO2631-1:1997(E). Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements[S]. 1997.

[9] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[10] 葛哲学,沙 威. 小波分析理论与 Matlab R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.

[11] 王 济,胡 晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[12] GB4970-2009 汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[5] 张 序,张檬檬. 飞行训练中的机组配合[J]. 中国民用航空,2009(1):60-62.

[6] 罗晓利. 飞行中人的因素[M]. 成都:西南交通大学出版社,2002.

[7] 孙景泰,李 珠. 我国现役飞行员心理品质模型的研究[J]. 健康心理学杂志,2001,9(3):217-219.

[8] Gertman D I,Blackman H S. Human reliability and safety analysis data handbook[M]. New York:John Wiley & Sons, Inc.,2007.

[9] Leen J R,Goldberg D. Adaptive level of autonomy for UAV supervisory control[R]. [s.l.]:Air Force Research Laboratory,2005.

[10] David B,Lawrence J. Workload-matched adaptive automation support of air traffic controller information processing stage[R]. Virginia:Langley Research Center,2002.

[11] Dearden A,Harrison M,Wright P. Allocation of function:Scenarios context and the economics of effort[J]. International journal of human-computer studies,2000,52(2):289-318.

[12] 徐胜平,李华明. 81 起民航等级飞行事故的机组资源管理分析[J]. 中华航空航天医学杂志,2003,14(3):174-175.

[13] 王 丹. 基于游戏引擎 3D GAMESTUDIO 的虚拟校园系统设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2010.

基于小波变换的汽车平顺性研究

作者：[李龙](#)，[郑永安](#)，[史忠科](#)，[LI Long](#)，[ZHENG Yong-an](#)，[SHI Zhong-ke](#)

作者单位：[西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安, 710129](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

Computer Technology and Development

ISTIC

年，卷(期)：

2014(4)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201404040.aspx