

文章编号: 1006-1355(2013)01-0108-06

汽车起步颤振的时频分析

倪 强¹, 刘海生¹, 田超峰²

(1. 同济大学 声学研究所, 上海 200092; 2. 上海英波声学工程技术有限公司, 上海 200434)

摘要: 汽车以不同的挡位和节气门开度在平路和坡路上起步时, 出现的颤振, 并会伴随传动系剧烈的扭转振动现象。这种失稳现象从产生到减缓的全过程中, 其振动加速度信号的频率分量和振幅具有显著的时变特征。由此, 在采用短时付里叶变换、Wigner-Ville 分布及连续小波变换三种时频分析方法的基础上, 选择合适的方法对实车坡道 M2 档小油门工况下车上不同位置的颤振加速度信号进行分析, 得到怠速、颤振和平稳行驶三个阶段的振动时频特性, 并结合 FFT 频域分析方法, 深入研究三个阶段的频率特性, 及其颤振的原因和控制传递路径的有效手段。

关键字: 声学; 起步颤振; 短时傅立叶变换; Wigner-Ville 分布; 连续小波变换; 频域分析

中图分类号:

文献标识码:

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2013.01.022

Time and Frequency Analysis of Vehicle's Launch Shudder

NI Qiang¹, LIU Hai-sheng¹, TIAN Chao-feng²

(1. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Impulse Acoustic Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Vehicle's launch shudder is an unstable phenomenon of severe torsional vibration of driveline under different gear and throttle opening while launching in different road conditions. The phenomenon undergoes three stages, i.e. vehicle's launching, severe shudder and smooth riding. In this procedure, frequency components and amplitudes of the vibration acceleration signal have significant time-varying characteristics. In this paper, three methods of time-frequency analysis, i.e. short time Fourier transform, Wigner-Ville distribution and continuous wavelet transform, were introduced. On this basis, the appropriate time-frequency method was chosen to analyze the acceleration signal at different positions in the car under the conditions of M2 gear and small throttle opening. Then, the vibration time-frequency characteristics of the three stages were revealed. Finally, the frequency characteristics of the three stages combined with the FFT analysis, the cause of launch shudder and control of its transmission path were studied.

Key word: acoustics; launch shudder; short time Fourier transform(STFT); Wigner-Ville distribution(WVD); continuous wavelet transform(CWT); frequency domain analysis;

随着汽车制造技术的发展和生活水平的提高, 汽车的 NVH 水平, 即噪声、振动和声振粗糙度越来越受到重视, 成为评价汽车品质的重要指标之一。本文所研究的汽车起步颤振是指汽车以不同的挡位和节气门开度在平路和坡路上起步时, 出现的传动系剧烈扭转振动的现象^[1], 是汽车 NVH 研究中比较重要的课题。

颤振是一种振动失稳现象, 由系统自身激发, 其振动规律不可控, 同时机理复杂, 在多种机械系统中都存在, 例如在金属切削加工过程中, 刀具与工件之间剧烈的自激振动; 风扇叶片的高频振动; 以及飞机飞行时不稳定的气动弹性现象。汽车起步颤振也是一种振动失稳现象, 其频率分量和振幅随时间有较大的变化, 振动的剧烈程度和道路的坡度、档位和节气门开度有关, 在坡道上表现得尤为显著。

汽车起步颤振产生的原因和传递路径比较复杂, 和车辆的动力系统、传动系统、车身等都有关系, 相关研究表明汽车起步颤振现象是普遍存在的^[1], 但起步颤振的机制尚不十分清楚。对颤振信号进行频谱分析是了解颤振频率特性、分析颤振原因和传

收稿日期: 2012-11-00

基金项目: 国家自然科学基金项目(10774114)

作者简介: 倪 强(1987-), 男, 安徽省巢湖人, 硕士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

通讯作者: 刘海生。

E-mail: 56614735@163.com

递路径的有效手段。

快速付里叶变换(FFT)是一种全局变换的频域分析方法,其优点是可以达到很高的频率分辨率,但却不能反映信号的时间特性,只适用于稳态信号的频谱分析。汽车起步颤振信号是一种时变信号,FFT分析并不适合于颤振信号的分析。因此,寻找合适的时频分析方法是对颤振信号进行正确分析的关键。目前比较成熟的时频联合分析方法有短时付里叶变换(STFT)、Wigner-Ville分布以及连续小波变换等。本文将通过对比研究,从中寻找合适的时频分析方法,对汽车起步颤振信号进行分析,揭示整个颤振阶段的时频特性。

1 汽车颤振测量实验

选用某型轿车分别在平路和坡路上进行起步颤振实验,平路对应的工况是:M1档无油门和M2档小油门,坡路对应的工况是:D档无油门和小油门、M1档无油门和小油门和M2档小油门和大油门。测试部位有发动机、变速箱壳体、前悬副车架、助力转向机构外壳、驾驶员座椅底部、制动踏板、仪表盘和方向盘等位置,每个部位测量纵向(车辆前进方向)、横向(垂直车辆前进方向)和垂向(垂直路面方向)的振动加速度信号。

测量从车辆启动进入怠速状态开始,经过起步、颤振和车辆平稳行驶等阶段,整个测量时间约为42 s左右。测量时四位乘员对颤振的强烈程度和发生时间段分别进行主观评价,强烈程度分为不显著、一般和显著三个水平。

以座椅底部纵向振动加速度时域信号为例,见图1,说明测量过程和测量工况为坡路M2档小油门。0~7 s为车辆在坡道上怠速阶段,7~12 s完成挂档和油门开度。挂档对变速箱产生激励,传至整个车身,在时域信号上表现为持续约5 s的数个峰值;之后车辆开始起步,车身的纵向振动逐渐增大,15~25 s为颤振感觉最强烈的阶段,25~35 s为颤振感觉逐渐减弱的阶段,35 s以后车辆驶入平路,进入平稳行驶的阶段,至42 s刹车停止。整个颤振过程大致可以分为起步、剧烈颤振和过渡三个阶段。

值得注意的是主观感觉颤振最显著的时段并非加速度时域幅值最大的时段,这说明不同时段起主导作用的振动频率是变化的,振动幅值大的频率不一定引起人体主观上强烈的振动感。图2是该信号的FFT分析,从中可以看出整个颤振过程的频率分量是比较复杂的,但主要能量集中在50 Hz以下的频带上。

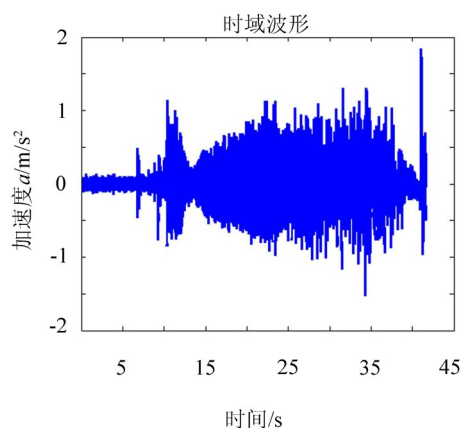


图1 座椅底部纵向加速度时域信号

Fig. 1 The acceleration in time-domain at the bottom of the seat in longitudinal direction

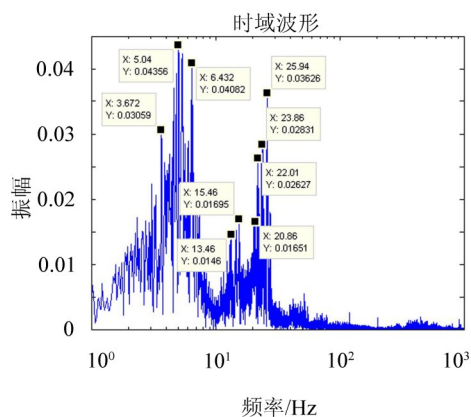


图2 座椅底部纵向加速度信号幅值谱

Fig. 2 The acceleration in frequency-domain at the bottom of the seat in longitudinal direction

2 时频联合分析

时频分析方法按照时频联合函数的不同可以分为线性时频表示和二次型时频表示,典型的线性时频表示有短时付里叶变换、连续小波变换等,典型的二次型时频表示主要有谱图、Cohen类时频分布和仿射类(Affine)时频分布^[2],其中最著名的就是Wigner-Ville分布。本文将用短时付里叶变换、Wigner-Ville分布及连续小波变换三种时频分析方法,对同一振动加速度颤振信号进行分析,对比其分析结果的优劣。根据图2的FFT的分析结果,我们希望所选用的时频分析方法满足以下要求:

(1) 在我们感兴趣的低频段内有较好的分辨率。从目前对汽车起步颤振的研究成果来看,引起颤振的频率一般在10~30 Hz之间^[1],因此这段频率是我们最关注的频率段;

(2) 在时间上也有较好的分辨率,对频率随时间

的变化过程反映得比较清晰;

(3) 分析结果和客观过程及主观评价有较好的对应关系,以便我们找出引起主观感觉颤振强烈的频率分量,或其变化过程。

2.1 短时付里叶变换

短时付里叶变换(STFT)的基本思想是用窗函数来截取信号,并假定信号在窗内是平稳的,采用付里叶变换分析窗内的信号,以确定窗内的频率成分,然后沿着信号时间方向移动窗函数,得到频率随时间的变化关系,即所需要的时频分布^[3]。

给定一信号 $x(t) \in L^2(R)$, 关于STFT的定义为

$$\text{STFT}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

其中 $x(\tau)$ 为被分析的信号, $g(\tau)$ 为窗函数且应取对称的实函数。不断地移动 t , 也即不断地移动窗函数 $g(\tau)$ 的中心位置, 即可得到不同时刻的付里叶变换, 这些傅里叶变换的集合, 即是 $\text{STFT}_x(t, f)$ 。

STFT的优点是计算简单, 不受二次型时频分布固有的交叉项影响, 其缺点是由于采用固定的时间窗函数, 导致时间和频率分辨率固定, 不能随着信号频率的变化而变化, 不具有自适应能力。

对图1的颤振加速度信号进行分析, 图3为其STFT时频谱。该结果是利用Matlab时频分析工具箱中的函数 $[\text{tfr}, t, f] = \text{tfrstft}(x, t, N, h, \text{trace})$ 计算得到的, 窗函数选取的是Hanning窗, 且移动步长取为128, 由于实测数据的采样率 $f_s = 12 \text{ k}$, 为达到更高的频率分辨率, 频率数 N 取为16 384, 频率分辨率 $df = f_s/N = 0.73$ 。

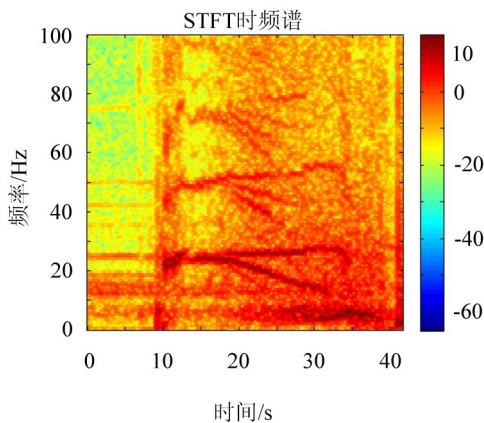


图3 座椅底部纵向加速度信号STFT时频谱

Fig. 3 The STFT spectrogram at the bottom of the seat in longitudinal direction

2.2 Wigner-Ville分布

Wigner-Ville分布简称WVD, 是一种最基本的二次型时频表示, 信号 $x(t)$ 的自Wigner分布定义为

$$\text{WVD}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] = x(t) + \frac{j}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

其中 $z(t)$ 为信号 $x(t)$ 的解析信号, $H[x(t)]$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换, z^* 为 z 的复共轭。

如果令 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ 则有

$$\text{WVD}_x(t, f) = \text{WVD}_{x_1}(t, f) + \text{WVD}_{x_2}(t, f) + \text{WVD}_{x_1 x_2}(t, f) + \text{WVD}_{x_2 x_1}(t, f) \quad (4)$$

$$\text{WVD}_{x_1 x_2}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t + \frac{\tau}{2}) x_2^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

$$\text{WVD}_{x_2 x_1}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_2(t + \frac{\tau}{2}) x_1^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

$$\text{WVD}_{x_1 x_2}(t, f) = [\text{WVD}_{x_2 x_1}(t, f)]^* \quad (7)$$

所以有:

$$\text{WVD}_x(t, f) = \text{WVD}_{x_1}(t, f) + \text{WVD}_{x_2}(t, f) + 2 \text{Re}[\text{WVD}_{x_1 x_2}(t, f)] \quad (8)$$

上式指出两个信号和的WVD并不等于它们各自WVD之和, 式中 $\text{WVD}_{x_1}(t, f)$, $\text{WVD}_{x_2}(t, f)$ 称为信号的自项, $2 \text{Re}[\text{WVD}_{x_1 x_2}(t, f)]$ 是 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互WVD, 称之为交叉项, 混杂于自项成分之间, 每两个信号分量之间就会产生一个交叉项^[4]。

WVD的优点是拥有很好的时频聚集性, 缺点是固有交叉项对分析的干扰, 因此WVD适合于频率分量少, 分散分布, 容易分辨出交叉项的信号。

为降低和消除WVD带来的交叉项干扰, 除了采用信号的解析形式来计算WVD外, 还可以采取对WVD计算结果在时域和频域上作平滑处理的方法, 即平滑伪Wigner-Ville分布(SPWVD)^[5]。

$$\text{SPWVD}_x(t, f) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(u) h(\tau) z(t - u + \frac{\tau}{2}) z^*(t - u - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \quad (9)$$

图4为图1颤振加速度信号的WVD时频谱, 该结果是利用Matlab时频分析工具箱中的函数 $[\text{tfr}, t, f] = \text{tfrwv}(x, t, N, \text{trace})$ 计算得到的, 其中时间步长取为128, 频率数 N 取为16 384。

图5则为该信号的SPWVD时频谱, 其结果是利用函数 $[\text{tfr}, t, f] = \text{tfrspwv}(x, t, N, g, h, \text{trace})$ 计算得到的, 其中 g 为时域平滑函数, h 为频域平滑函数, g 和 h 均为奇数长度的窗函数, g 的长度取为4 095, h 的长度取为16 383, 时间步长取为128, 频率数 N 取为16 384。

2.3 连续小波变换

给定平方可积的信号 $x(t) \in L^2(R)$, 则 $x(t)$ 的小波变换定义为

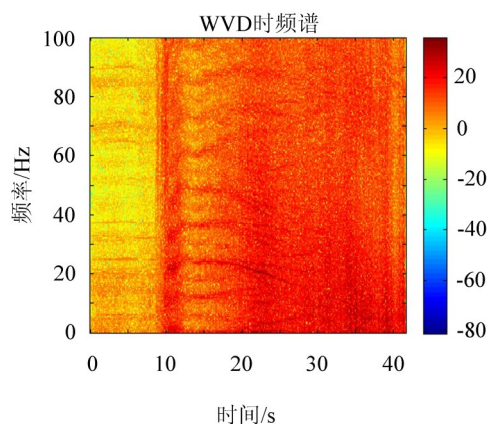


图4 座椅底部纵向加速度信号 WVD 时频谱
Fig. 4 The WVD spectrogram at the bottom of the seat in longitudinal direction

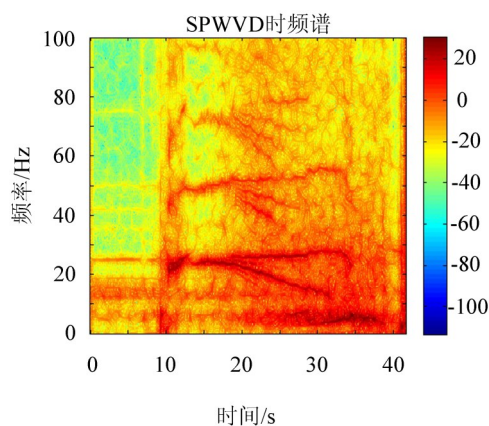


图5 座椅底部纵向加速度信号 SPWVD 时频谱
Fig. 5 The SPWVD spectrogram at the bottom of the seat in longitudinal direction

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle x(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle \quad (10)$$

式中 a, b, t 均是连续变量。因此,该式又称为连续小波变换(CWT), a 是尺度因子, b 是时移, $\varphi(t)$ 称为母小波, $\varphi_{a,b}(t)$ 是母小波经移位和伸缩所产生的一组函数,称为小波基。(10)式说明连续小波变换又可解释为信号 $x(t)$ 和一组小波基的内积。

连续小波变换本质上是一种时间尺度分析,它是一种随尺度 a 和时移 b 的能量分布,频率 f 与尺度因子 a 的对应关系见下式:

$$f = \frac{f_s f_c}{a} \quad (11)$$

上式中 f_s 为信号采样率, f_c 为母小波的中心频率,由(10)式可知尺度 a 间接对应频率(a 小对应高频, a 大对应低频),因此,尺度图实质上也是一种时频分布。

CWT 的优点是可以根据信号的频率成分对母小波进行伸缩以提供合理的窗口,具有很强的自适

应能力,在高频处有好的时间分辨率,而在低频处有好的频率分辨率。但 CWT 重建核说明了连续小波变换的冗余性且计算量很大,由于 CWT 不包含相位信息,因此根据小波系数就无法重建原始时域信号。

图6为图1加速度信号的CWT时频谱,结果是利用 Matlab 小波函数 `Coefs=cwt(x, scales, 'wname')` 计算得到的,尺度序列数 `Totalscal = 8 192`,母小波选用复 Morlet 小波(Cmor4-2),母小波的带宽为4,中心频率为2。

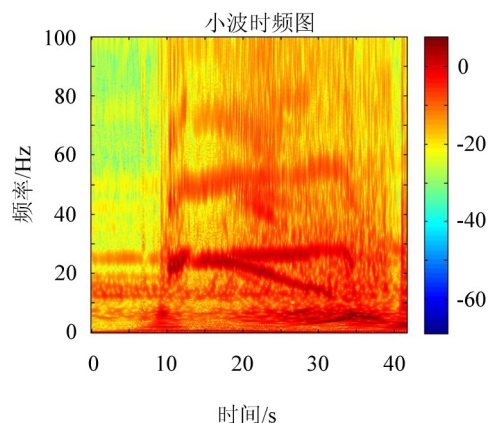


图6 座椅底部纵向加速度信号小波时频谱
Fig. 6 The CWT spectrogram at the bottom of the seat in longitudinal direction

2.4 三种时频分析方法的对比

对于同一个时域信号,三种时频分析的结果在特征上基本接近,而且都和客观过程及主观评价有较好的对应关系:0~7 s 的怠速、7~12 s 的挂档起步、12~35 s 的颤振、35~42 s 的平稳行驶等阶段在时频分析图上都有显著的特征。15~25 s 的主观颤振感觉显著,这1阶段 25 Hz 频率发生了分叉,而且幅值很大。

但三种分析结果有明显的差异,比较如下:

(1) 短时付里立叶变换:在高于 10 Hz 的频带内,时间分辨率尚可,低于 10 Hz 的频带内,频率分辨率较低;

(2) Wigner-Ville 分布:拥有很好的时频聚集性,但由于交叉项的干扰,很难分清哪些分量是实际存在的频率,因此该法不合适;

SPWVD 时频谱在高于 10 Hz 的频带内,时频分辨率很好,低于 10 Hz 的频带内频率分辨率尚可,总体结果优于 STFT 时频谱,而且同 STFT 的分析结果相比较,交叉项的干扰几乎可以忽略。因此这种方法最适合于颤振信号的分析;

(3) 连续小波变换:在低于 10 Hz 的频带内,时频

分辨率较好,高于10 Hz的频带内,时间分辨率很好,但频率分辨率较差。如果要在采样率 $f_s=12\text{ k}$,时程长度 $t=42.67\text{ s}$ 的数据前提下保持50 Hz以内都拥有小于1 Hz的频率分辨率,那么计算量将很大。

三种时频分析结果的特性比较见表1,根据比较的结果,我们选用SPWVD作为汽车起步颤振时频分析的方法。

由于SPWVD毕竟还是属于二次型时频表示,所以也会受到交叉干扰特性的影响,那么这时就可以利用STFT的分析结果作为参考,排除SPWVD时频谱多余的交叉干扰项。另外10 Hz以下的分析结果可以参考CWT分析。

表1 4种时频分析特性的比较

Tab. 1 The comparison of four kinds of time-frequency analysis characteristic

	时频聚集性	交叉干扰	计算耗时
STFT	差	无干扰	短
WVD	很好	干扰严重	短
SPWVD	好	忽略不计	较长
WT	一般	无干扰	很长

3 起步颤振信号的时频特征分析

本文选取座椅底部、变速箱和前悬副车架等位置,对其纵向振动加速度信号进行时频分析,做个对比,工况为坡道M2档小油门。各测点的SPWVD时频分析结果见图5,7和8。

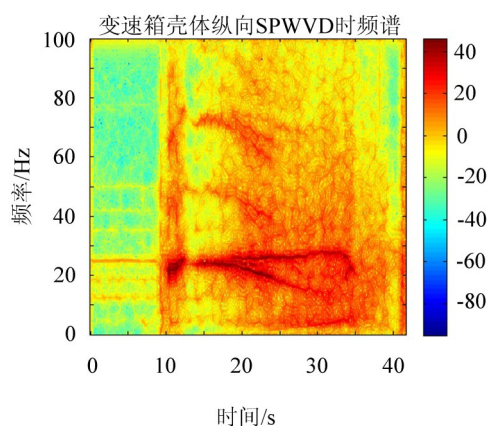


图7 变速箱壳体纵向加速度信号SPWVD时频谱
Fig. 7 The SPWVD spectrogram at the transmission in longitudinal direction

从分析结果可以得到如下结论:

(1) 各点信号的时频特征有较高的一致性,都表现出怠速、挂档起步、颤振和平稳行驶四个阶段;

(2) 各点0~7 s的怠速阶段都表现出典型的稳态振动特征,特征频率确定,振动幅值稳定。为了确定其主要频率分量,截取座椅底部纵向0~7 s的信号进行FFT分析,结果见图9怠速阶段。从图中可以看出12.57 Hz和25 Hz是重要的频率分量,在车辆的各个测量位置均出现;

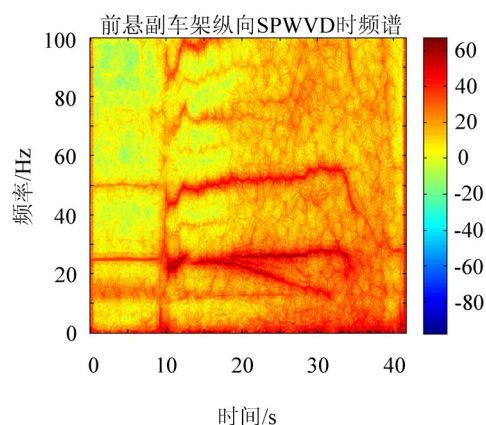


图8 前悬副车架纵向加速度信号SPWVD时频谱
Fig. 8 The SPWVD spectrogram at the front suspension subframe in longitudinal direction

(3) 各点12~35 s的颤振阶段都表现出典型的时变振动特征,振幅随时间有较大的变化,而且频率发生分叉现象,如25 Hz、50 Hz和75 Hz的频率分叉现象十分明显。为了确定主要的分叉,截取座椅底部纵向12~35 s的信号进行FFT分析,结果见图9颤振阶段。从图中可以看出主要的分叉是为25.9~12 Hz,近似连续缓慢扫频,在每个测点都有;

仔细分析整个颤振阶段的时频特征,可以发现12~15 s之间,25.9 Hz的振幅较弱,是颤振的初步阶段;15~25 s之间,频率分叉现象显著,且振幅较强,是颤振的剧烈阶段,25~35 s之间,发生分叉的频率振幅逐渐减弱,是颤振向平稳行驶状态过渡的阶段;

(4) 各点35~42 s平稳行驶至刹车停车阶段,振动信号类似于准稳态振动,频谱分量以10 Hz以内的低频为主,呈连续谱,3~5.5 Hz内出现密集的峰值,应当是路面噪声^[6];

(5) 座椅底部的时频分析图表明:30~38 s之间3~5 Hz的低频振动十分显著,幅值较大,导致时域上这一阶段的振动幅值很大,但是这一阶段人体主观对振动的感受不是最剧烈的,最剧烈的时段是15~25 s的时段。这说明人体对3~5 Hz的振动感觉不是很敏感(在实验所涉及的振幅范围内),对10~30 Hz的振动是比较敏感的,一些研究成果也表

明了这一点。由于在颤振过程中振动的频率分量一直随时间变化,所以仅仅根据时频分析图还很难确定导致颤振的具体频率分量,但根据主观评价对颤振时间的判断,与15~25 s阶段相对应的频率在12~25.9 Hz之间。

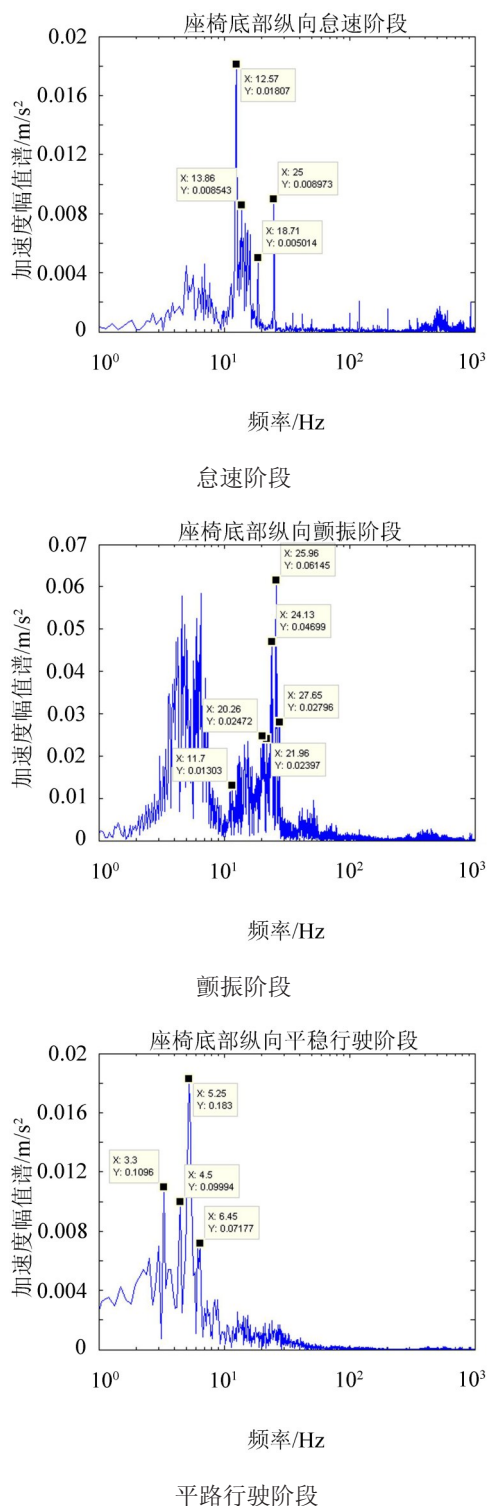


图9 座椅底部纵向加速度信号不同阶段FFT频谱对比

Fig. 9 The comparison of accelerations in frequency-domain of different stages at the bottom of the seat in longitudinal direction

4 结 语

根据上述分析结果,本文得到如下结论:

(1) SPWVD 适合于汽车起步颤振的时频分析,其时频聚集效果优于 STFT 和 WT,特别是在 10~100 Hz 的频带内,能够清晰地反映频率分叉现象,即信号的时变特性。其交叉项产生的干扰可以忽略不计,优于 WVD;

(2) 怠速阶段:振动信号呈现典型的稳态特征,频率分量明确。主要频率分量是 12.57 Hz 和 25 Hz,在车辆的各个测量位置均出现;

(3) 颤振阶段:振动信号呈现典型的时变特征,振动幅值随时间变化显著,频率分叉现象比较明显,主要的分叉是从 25.9 Hz 到 12 Hz,近似连续扫频,在每个测点上都有。整个过程可分为起步、剧烈颤振和过渡三个阶段;

(4) 平稳行驶阶段:振动信号类似于准稳态特征,频谱分量以 10 Hz 以内的低频为主,呈连续谱,3~5.5 Hz 内出现密集的峰值,应当是路面噪声;

(5) 不同位置振动时频特征都十分一致。进一步的研究表明怠速和运行阶段以垂向振动为主,而颤振阶段以纵向振动为主。

参考文献:

- [1] Thomas Wellmann, Kiran Govindswamy. Development of a multi-body systems approach for analysis of launch shudder in rear wheel driven vehicles[J]. SAE, 2009-01-2073.
- [2] 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [3] 董建华, 顾汉明, 张 星. 几种时频分析方法的比较及应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 312-316.
- [4] 邹红星, 戴琼海, 李衍达. 不含交叉项干扰且具有 WVD 聚集性的时频分析之不存在性[J]. 中国科学, 2001, 31(4): 348-354.
- [5] Auger F, Flandrin P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method[J]. IEEE, 1995, 43(5): 1068-1089.
- [6] 舒红宇, 张伟伟, 雷宝云. 路面激励下汽车传动系统的随机扭转振动分析[J]. 自然科学报, 2009, 10(1): 87-91.