

路面不平度突变检测的研究

马俊福, 付 峰, 孙 麒

(浙江理工大学信息电子学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了更好地检测路面不平度的突变,提出了基于小波变换提取路面不平度突变的方法。利用小波变换检测路面不平度突变的基本原理和路面不平度不同尺度的最大重叠离散小波变换系数进行路面不平度突变区域的检测。结果表明:在消除边缘效应后,在两个突变区域内,W1、W2 和 W3 小波系数具有一致性,可以准确提取路面不平度突变。

关键词: 路面不平度; 突变; 检测; 最大重叠离散小波变换

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

0 引 言

路面不平度是道路表面对于理想平面的偏离,通常把路面相对基准平面的高度沿道路走向长度的变化称为路面纵端面曲线或不平度函数^[1]。

对于路面不平度的研究,各国学者提出了不同形式的功率谱密度表达式模型^[2-8]。对于路面不平度空间域(或时域)内的问题,早期的研究方法有谐波叠加法(或称三角级数合成法)。该合成模型适用于模拟具有任意形状谱密度的平稳随机过程,而且所得结果是连续的,但该模型涉及大量三角函数运算,计算机运行时间长、费用大。另外还有过滤泊松过程模型^[8]、ARMA 模型^[2]和 AR 模型^[3]。

1986 年,我国制定了路面不平度表示方法的国家标准 GB7031—1986^[9]作为路面不平度分级、试车场建设和路面不平度模拟的依据。但在一些实际工程中,还有一些带突变路面不平度,如越野路面不平度和试车场中的一些特殊路面不平度。这些特殊的路面不平度是车辆疲劳和平顺性等测试系统必不可少的数据来源,因此笔者根据小波变换检测的基本原理,利用最大重叠离散小波变换来实现路面不平度突变的定位检测。

1 路面不平度突变

1.1 路面不平度中的奇异性

越野路面等特殊路面不平度往往具有奇异性,表现为突变、尖点等不规则的瞬变结构^[10]。路面不平度的奇异性包含了路面不平度的重要特征信息,在路面不平度的模拟和车辆平顺性测试中具有重要的意义。

1.2 奇异性的定义

若函数在某处有间断点或某阶导数不连续,则称该函数在此处有奇异性,该点就是奇异点。信号的奇异性是由奇异点处的李氏指数(Lipschitz Exponents, LE)来度量的,LE 的定义是:若信号 $x(t)$ 在 t_0 附近满足

$$|x(t_0+h)-P_n(t_0+h)|\leq A|h|^\alpha, \quad (n<\alpha<n+1) \quad (1)$$

式(1)中: $h>0$ 是一个充分小的量, $P_n(t)$ 是过 $x(t_0)$ 点的 n 次多项式($n \in \mathbb{Z}$), A 为一个常数,称 $x(t)$ 在 t_0 处的 LE 为 α 。若将 t_0 点扩展到一段开区间 (t_1, t_2) ,当 t_0 和 t_0+h 都处在开区间 (t_1, t_2) 时,式(1)仍能满足,则称 $x(t)$ 在此区间为均匀 Lipschitz α ^[10]。

1.3 路面不平度的突变

突变是奇异性的一种形式。路面不平度的突变也有两方面的含义:一是位移的急剧变化(即峰值奇异),二是频率的急剧变化。如果路面不平度的频谱有时间局部性,就可以进行定时刻的频率分析,同时又可以随着时间的推移跟踪路面不平度频率的变化情况。这正是小波变换的重要特点^[11]。

1.4 小波变换检测路面不平度突变的基本原理

检测的基本原理是在不同尺度上平滑路面不平度,再由平滑后路面不平度的一阶或二阶导数检测原路面不平度的奇异点^[12]。

利用小波变换检测路面不平度时,从理论上讲,尺度越小,小波系数模极大值与突变位置的对应越准确,但会产生许多伪极值点。尺度越大,极值点相对稳定,但会带来定位偏差。因此,在用小波变换模极大值法判断路面不平度奇异点时,需要把多尺度结合起来综合分析判断^[13-14]。

2 路面不平度突变的检测

本文根据小波变换检测路面不平度奇异性的原理,采用基于最接近对称小波滤波器的路面不平度的 MODWT(maximal overlap discrete wavelet transform)小波系数对路面不平度的突变部分进行准确的定位检测。

2.1 小波滤波器

小波滤波器 $\{h_l: l=0, \dots, L-1\}$ 中, L 是滤波器的宽度,且 L 必须是偶数。对于宽度为 L 的 $\{h_l\}$,必须有 $h_0 \neq 0$ 和 $h_{L-1} \neq 0$ 。对于 $l < 0$ 和 $l \geq L$,定义 $h_l = 0$,因此 $\{h_l\}$ 实际上是一个至多有 L 个非零值的有限序列^[15]。

尺度滤波器是与 $\{h_l\}$ 相应的“正交镜像”滤波器 $\{g_l\}$:

$$g_l = (-1)^{l+1} h_{L-1-l} \quad (2)$$

常用的滤波器有 D(L) 和 LA(L) 尺度滤波器。D(L) 尺度滤波器又叫做“daubelets”,其中 $L=2, 4, \dots$ 。LA(L) 尺度滤波器叫做最接近对称尺度滤波器,其中 $L=8, 10, \dots$ 。

2.2 最大重叠离散小波滤波器

可以通过 $\tilde{h}_l = h_l / \sqrt{2}$ 来定义 MODWT 小波滤波器,通过 $\tilde{g}_l = g_l / \sqrt{2}$ 来定义 MODWT 尺度滤波器。

2.3 MODWT 系数的定义

MODWT 实质上是定义一个尽可能像 DWT 的变换,但是不受 DWT 对路面不平度起始点选择的敏感性的妨碍,并能利用最接近对称小波滤波器对路面不平度的突变进行准确地定位^[15]。

对于任意的采样大小 N ,定义 j 阶 MODWT 小波与尺度系数为 N 维向量 $\tilde{W}_j$ 和 $\tilde{V}_j$,其元素分别为:

$$\tilde{W}_{j,t} \equiv \sum_{l=0}^{L_j-1} \tilde{h}_{j,l} X_{t+l \bmod N} \text{ 和 } \tilde{V}_{j,t} \equiv \sum_{l=0}^{L_j-1} \tilde{g}_{j,l} X_{t+l \bmod N} \quad (3)$$

$t=0, \dots, N-1$, 其中 $\tilde{h}_{j,l} \equiv h_{j,l} / 2^{j/2}$, $\tilde{g}_{j,l} \equiv g_{j,l} / 2^{j/2}$ 。滤波器 $\{\tilde{h}_{j,l}\}$ 和 $\{\tilde{g}_{j,l}\}$ 为 j 阶 MODWT 小波与尺度滤波器。由于 $\{\tilde{h}_{j,l}\}$ 和 $\{\tilde{g}_{j,l}\}$ 的宽度为 $L_j \equiv (2^j - 1)(L - 1) + 1$, $\{\tilde{h}_{j,l}\}$ 和 $\{\tilde{g}_{j,l}\}$ 的宽度也是 L_j 。

2.4 路面不平度突变的检测

笔者采用最接近对称小波尺度滤波器 LA(8) 得到的路面不平度 MODWT 小波系数对路面不平度的突变部分进行准确的定位^[12]。

长度为 $2 \cdot N$ 的路面不平度 SR 突变检测的步骤如下:

a) 合理地选取最接近对称小波滤波器,本研究选取 LA(8) 小波尺度滤波器,对路面不平度进行 j (一般取 $j < N$) 层金字塔分解,得到 j 阶小波系数 $W_{j,k}$ 和尺度系数 $V_{j,k}$;

b) 计算非边界的小波系数 $W_{j,k}$ 的绝对值 $|W_{j,k}|$,并计算出其最大值 $|W_{j,k}|_{\max}$;

c) 当最大值 $|W_{j,k}|_{\max}$ 在几个连续的不同尺度上具有一致性时,才能作为突变点处的最大值;

- d)设置阈值 T ,取 $T=|W_{j,k}|_{\max}\times 30\%$;
- e)寻找 $|W_{j,k}|$ 中大于等于阈值 T 的 $W_{j,k}(k>1$ 且 $k<2\cdot N$,以尽量削弱边缘效应);
- f)确定突变区域:步骤 e)寻找到的只是孤立的突变点 k_i ,其中, t 为路面不平度的长度;现将每个突变点扩展为突变区域 $[(k_i-L/2),(k_i+L/2)]_i$,其中 i 为突变区域的个数, L 为小波滤波器的宽度;有交集的突变区域合并为一个区域后可得突变 $SR_S(i)$ 。

3 检测结果及分析

图 1 为带突变实测路面不平度、实测路面不平度的 W1 小波系数、W2 小波系数、W3 小波系数以及突变区域的定位。由图 1 可知,在两个突变区域内,其 W1、W2 和 W3 小波系数具有一致性。考虑到边缘效应,因此图 1 的实测路面不平度的 W1、W2 和 W3 分量的最右边虽然出现了超过阈值 T 的点,但由于它是边界,所以不将其作为突变处理。图 1 左边的突变虽然取值取到边界,但是由于在路面不平度 SR 突变定位的步骤 f)中将孤立点扩展为突变区域的结果。

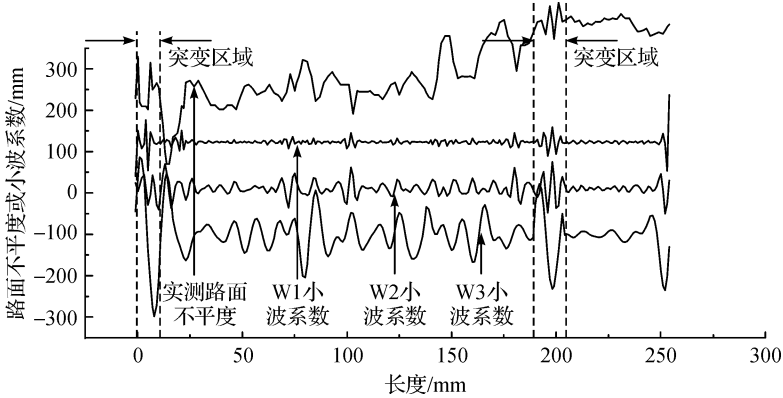


图 1 带突变路面不平度及其 MODWT 分解的小波分量

4 结 论

本文提出的路面不平度突变检测方法采用了基于最接近对称小波滤波器 LA(8)的路面不平度的 MODWT 小波系数进行突变检测。该方法首先寻找孤立的突变点,然后将相邻孤立点连接为突变区域,从而消除了突变的边缘效应。同时该方法利用 j 阶小波系数 $W_{j,k}$ 提取突变区域的一致性提高了路面不平度突变检测的准确性。

参考文献:

[1] 余志生. 汽车理论[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2000: 173-178.

[2] 唐光武, 成思源. 一维 ARMA 路面模型的稳定性研究[J]. 公路交通技术, 2002(2): 57-60.

[3] 王百益, 吴业森. 路面不平度的 AR(P,0)序列模拟法[J]. 武汉工学院学报, 1987(2): 60-68.

[4] 马俊福, 周晓军. 路面不平度模拟及其可视化系统的研究[J]. 机床与液压, 2006(4): 187-189, 192.

[5] Demi M, Diligenski D. New design of a road profiler[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(6): 801-808.

[6] Sudib K, Samir R. Wavelet based identification of dominant scales for self-affine road roughness in context of riding comfort in vehicles[J]. Geotech Geol Eng, 2009(26): 473-484.

[7] Dodds C J, Robson J. The description of road surface roughness[J]. Sound and Vibration, 1973, 31(2): 175-183.

[8] 张湘伟, 何正友. 二维泊松过程的数值模拟及其在道路模型中的应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1994, 17(4): 12-16.

[9] GB 7031—1986 车辆振动输入—路面平度表示方法[S].

[10] 何正嘉, 瞿艳阳. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 132-136.

[11] 朱洪俊, 秦树人. 小波变换对突变信号峰值奇异点的精确检测[J]. 机械工程学报, 2002(12): 11-15.

[12] 马俊福. 基于 VR 的车辆振动虚拟测试系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[13] 王 忠, 韵 湘. 基于小波的奇异信号检测[J]. 武汉化工学院学报, 2003, 25(2): 71-73.

[14] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 115-132.

[15] Percival D B, Walden A T. Wavelet Methods for Time Series Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 56-204.