

文章编号: 1005-0523(2008)05-0036-06

基于小波的列车加速度和轨道不平顺关系分析

曲 铭, 许玉德

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室 上海 201804)

摘要: 轨道不平顺是引起车辆系统振动的重要激振源。为适应现代铁路的发展, 提高旅客乘车的舒适性, 研究轨道高低不平顺与列车垂向加速度间的关系变得越来越重要。本文利用小波分析的方法, 对综合检测车采集到的轨道高低不平顺信号和垂向加速度信号进行处理, 将分析的重点集中在具体的某一频段上, 并对其进行了相关性分析, 确定了轨道高低不平顺和列车垂向加速度间的关系。

关键词: 小波分析; 垂向加速度; 高低不平顺; 相关性分析

中图分类号: U213.313

文献标识码: A

无论是普速列车还是提速列车, 轨道不平顺都是引起车辆系统振动的重要激振源。轨道的平顺性直接影响着列车运行的安全性和旅客乘坐的舒适性。随着社会的进步, 人民物质生活水平的提高, 旅客更注重乘车的舒适性, 所以, 现代铁路的发展对轨道几何形位的管理提出了新的要求。目前, 对轨道几何不平顺的评价方法主要有峰值管理和均值管理。峰值管理是通过设定一系列的限值对轨道几何状态进行评价, 按超限级别进行维修管理, 如我国采用的5级管理限值等; 均值管理包括对轨道局部不平顺的评价方法, 如扣分法, 对单元轨道区段整体不平顺幅值特征进行统计的方法, 如P值、TQI法等, 对不平顺幅值和波长结构的统计分析方法, 如不平顺功率谱(PSD)法^[1]。现有的方法虽然能满足目前的需要, 但也有其局限性。而小波分析的方法, 因其具有良好的时频域关联特性, 不仅能找出较大的不平顺幅值、分析轨道不平顺的波长结构, 而且能够在某一频段上对不平顺波长进行分析, 并且能确定其具体的位置, 对指导轨道的养修工作具有重大的意义。

1 小波分析方法

自1986年Y. Meyer, S. Mallat及I. Daubechies等人的奠基性工作以来, 小波分析作为一门新兴学科, 发展迅速, 无论是理论体系的建立还是应用的广泛深入, 都已经达到了一个新的水平。相对于经典的傅里叶分析, 小波分析作为新的时频分析方法, 具有显著的优点。它的基本思想是用一族小波基函数去逼近一信号, 来解决时间和频率分辨力的矛盾。不同于短时傅里叶变换, 它可以根据实际分析的需要, 自适应地调节时频窗口, 聚焦到信号时域和频域的任何细节, 即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率^[2]。

收稿日期: 2008-09-11

作者简介: 曲 铭(1982-), 男, 吉林柳河县人, 硕士研究生, 研究方向为铁路轨道管理。

1.1 小波分析的概念^[3]

设 $\psi(t) \in L^2(R)$ 其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$ 当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许性条件

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

称 $\psi(t)$ 为基本小波或母小波.

将基本小波 $\psi(t)$ 按式(2)伸缩和平移后得到的函数族 $\{\psi_{a,b}\}$ 称为分析小波或连续小波.

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子.

对于任意的函数 $f(t) \in L^2$ 的连续小波变换为:

$$(W_\psi f)(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

其中 “ $\langle \rangle$ ” 表示内积; $(W_\psi f)(a,b)$ 称为小波系数.

小波变换后的重构公式为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} (W_\psi f)(a,b) \psi_{a,b}(t) db da \quad (4)$$

对于连续小波变换来说,伸缩因子 a 、时间 t 和与时间有关的平移因子 b 都是连续的.如果把尺度因子 a 和偏移因子 b 按幂级数的形式离散化处理,就得到离散小波变换.即

$$a = a_0^j \quad b = k a_0^j b_0 \quad k \in Z$$

这里 $a_0 \neq 1$ 是固定值,假定 $a_0 > 1$,对应的离散小波为

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - k b_0) \quad (5)$$

信号 $f(t)$ 的离散小波变换系数为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (6)$$

重构公式为

$$f(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

取 $a_0 = 2$ $b_0 = 1$ 对尺度因子 a 和偏移因子 b 进行离散化,得如下的二进小波

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j} t - k) \quad (8)$$

1.2 多分辨分析和 Mallat 算法^[3]

1986年 Meyer 创造性地构造出具有一定衰减性的光滑函数,使得小波得到真正的发展.1988年 S. Mallat 在构造正交小波基时提出了多分辨分析(multi-resolution analysis)的概念,从空间的概念上说明了小波的多分辨频率特性,并在1989年给出了正交小波基的构造方法以及正交小波变换的快速方法,即 Mallat 算法.

多分辨分析实际上将信号分成低频部分 A_1 和 高频部分 D_1 ,再对低频部分 A_1 进行再次分解,高频部分 D_1 不予考虑,逐层分解,以达到获得信号特性的目的.待分析信号 S 进行 n 层分解后得到如下关系

$$S = A_n + D_n + D_{n-1} + \dots + D_1$$

Mallat 算法又称塔式算法,它在小波分析中的地位相当于快速傅里叶变换(FFT)在傅里叶分析中的地位.它是通过小波滤波器 H, G 和 h, g 对信号进行分解和重构,以获得所需要的信号特征.

2 实例分析

2.1 原始信号来源及处理方法

采用2008年1月京沪线上行线里程k1449+043至k1449+775的综合检测车数据,点号与里程的关系为4个点为1m,综合检测车的速度为230 km/h.应用小波分析方法分别对垂向加速度和左高低进行处理,采用db6小波进行6层分解.小波变换的方法是在MATLAB6.5环境下自编程序实现.

对轨道不平顺的分析主要集中在其低频部分,虽然小波分解的层数越多,低频部分的区分就越细致,但也并不是层数越多分析效果就越好.所以,分解的层数应该由采样频率和所关注的重点频率共同确定.针对本文采用的数据,并结合采样定理以及MALLAT算法在各子带上的频率范围,最终确定小波分解的层数.

2.2 垂向加速度信号的小波分析

垂向加速度的小波分析结果见图1.

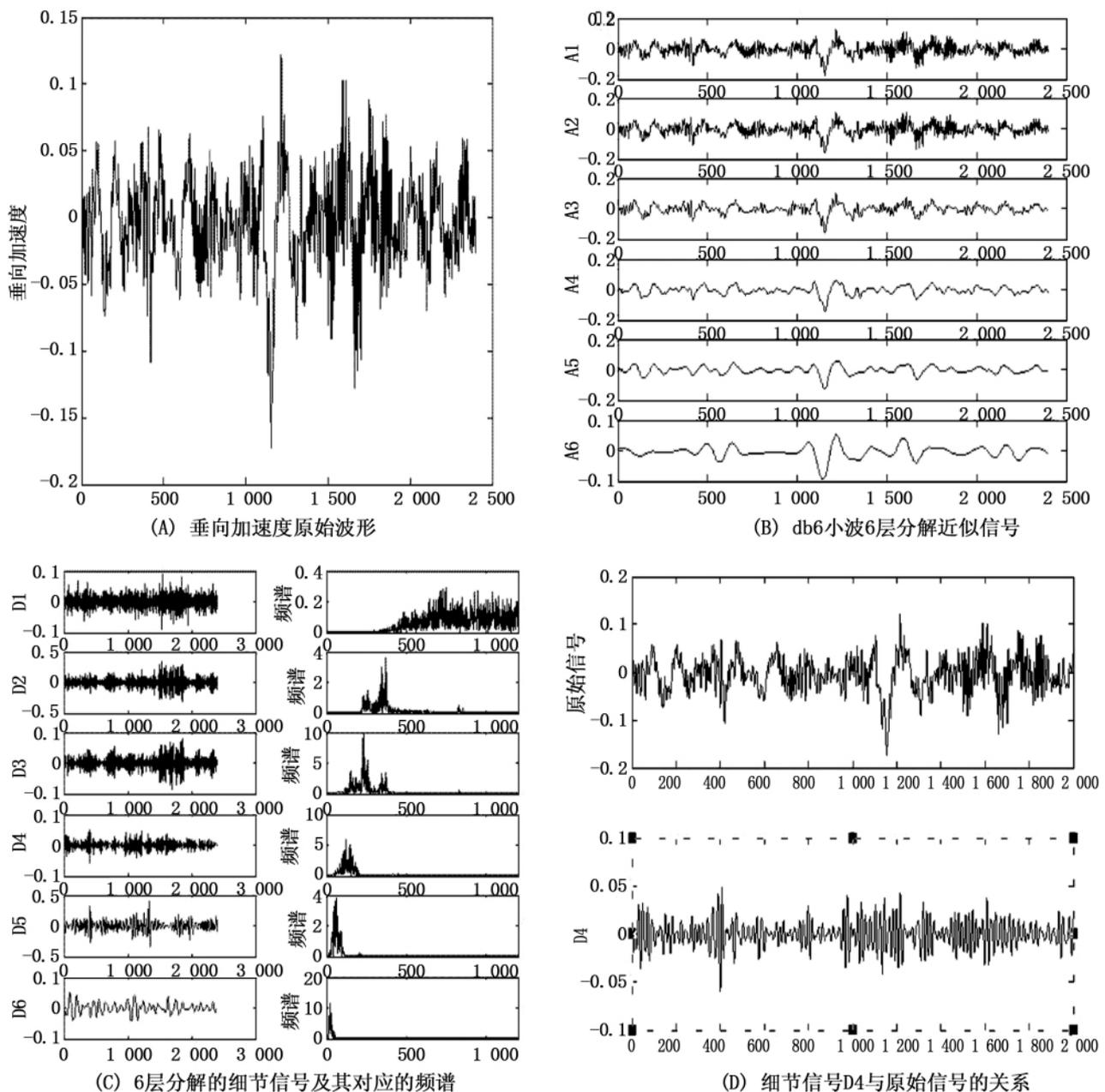


图1 垂向加速度的小波分析结果

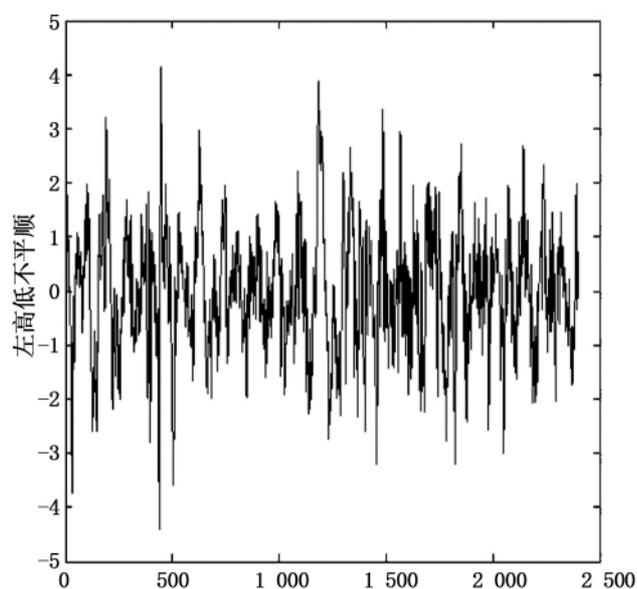
(A) 图为垂向加速度原始信号; (B) 图为6层近似信号,从图上可以看出:6层小波分解可以满足对加速度分析的要求; (C) 图为6层细节信号及其对应的频谱.可以看出:D1可以看作为高频噪声,而能量主要集

中在 D4 和 D6 上,其对应的频率范围在 100 ~ 160 和 15 ~ 30,波长范围为 0.4 ~ 0.6 和 2.1 ~ 4.2;(D) 图为 D4 和原始信号的关系,比较后发现 D4 可以具体的确定产生较大垂向加速度的位置,如在第 400 个点左右(k1449 + 143 左右)、第 1 000 ~ 1 200 个点间(k1449 + 293 ~ k1449 + 343 间)都产生了较大的垂向加速度。

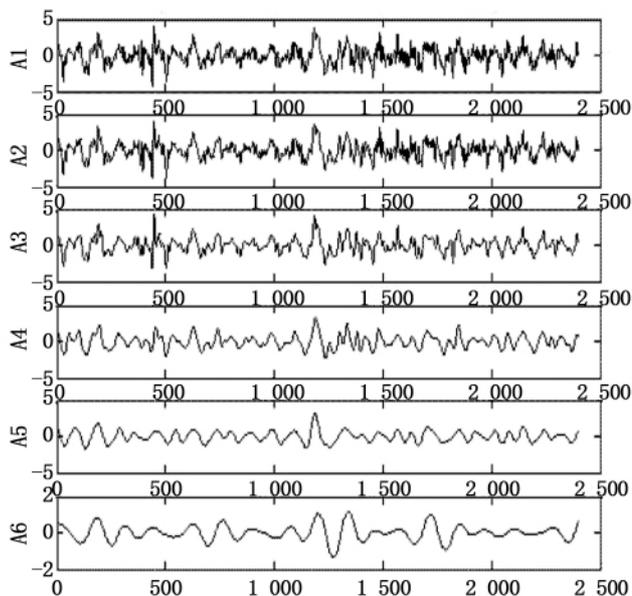
2.3 高低不平顺信号的小波分析

左高低不平顺信号的小波分析见图 2。

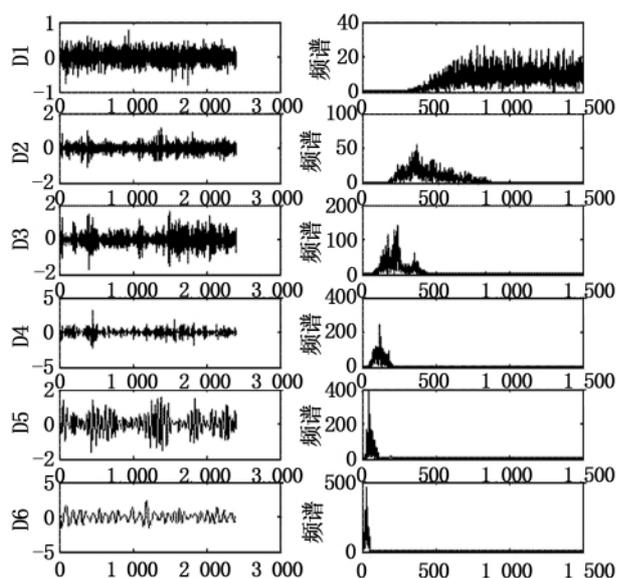
(A) 图为左高低不平顺的原始信号;(B) 图为 6 层近似信号,从图上可以看出:6 层小波分解可以满足对高低不平顺信号分析的要求;(C) 图为 6 层细节信号及其对应的频谱,D1 和 D2 可以看作是噪声,分析发现能量主要集中在 D4 和 D6 上,其对应的频率范围在 90 ~ 150 和 20 ~ 30,波长范围为 0.4 ~ 0.7 和 2.1 ~ 3.2;(D) 图为 D4、D6 和原始信号的关系,比较后发现可以通过 D4、D6 确定产生较大高低不平顺的具体位置,如在第 400 个点左右、第 1 000 ~ 1 200 个点间都产生了较大的高低不平顺,较大高低不平顺的里程确定为 k1449 + 143 和 k1449 + 293 ~ k1449 + 343;(E) 图为分析细节信号 D6 时发现的周期波不平顺。



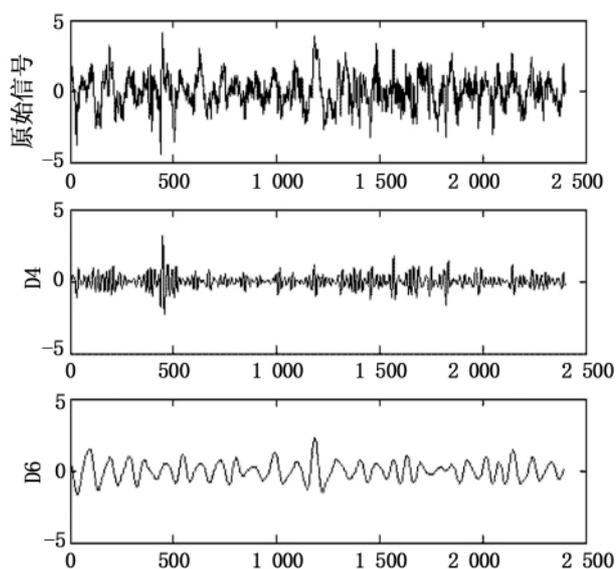
(A) 左高低不平顺波形



(B) 近似信号



(C) 细节信号及其对应的频谱



(D) 细节信号与原始信号的关系

2.4 垂向加速度信号和左右高低不平顺信号的比较分析

对比垂向加速度信号以及相应的高低不平顺信号,可以发现两者存在着一定的相互关系,即当高低不平顺出现较大变化时会引起较大的垂向加速度。

对垂向加速度和左高低中能量集中的 D4 信号(见图 3)进行相关性分析,采样点数为 2 400,得到它们的相关系数为 0.526 3,以显著性水平 $\alpha = 0.01$ 判断,相关性较显著。同时发现加速度信号相对于左高低不平顺信号滞后 48 个采样点,即垂向加速度相对于高低不平顺滞后 12 m,以列车运行速度为 230 km/h 计算,垂向加速度的滞后时间为 0.19 s。

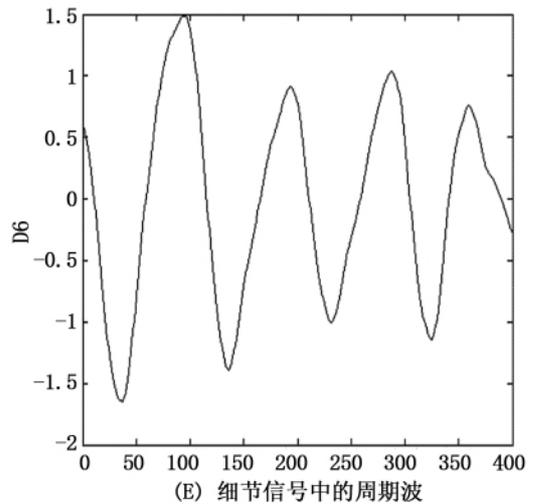


图2 左高低不平顺信号的小波分析

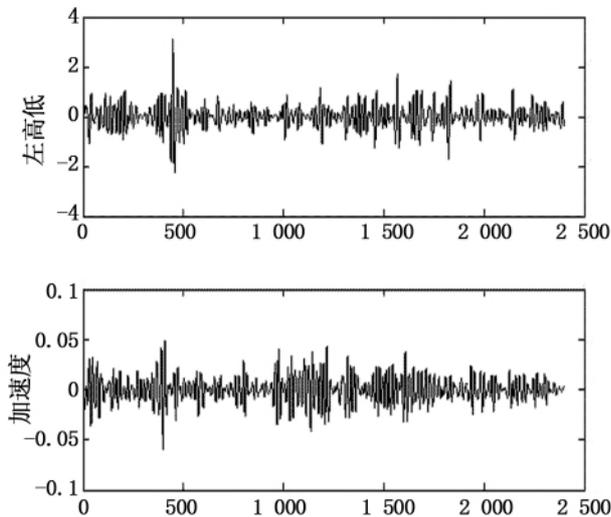
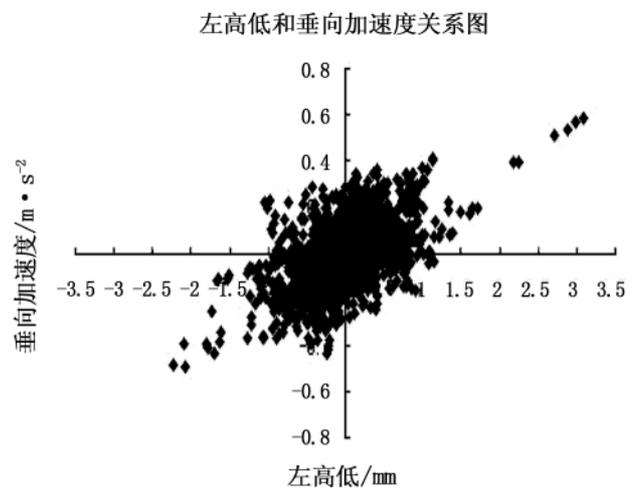


图3 加速度和左高低不平顺细节 D4 对比



3 结论

本文应用小波分析的理论对列车垂向加速度信号和轨道左高低不平顺信号进行分析处理,得到以下结论:

(1) 通过小波分析的方法可以确定不平顺波形中幅值较大处的位置,对于指导轨道几何形位的养修具有重大意义;

(2) 通过小波分析的方法,可以辨识轨道随机不平顺中隐含的比较有规律的典型波形,很好的解决了轨道不平顺波形的辨识问题;

(3) 应用小波分析的方法可以具体分析某一频段轨道高低不平顺与列车垂向加速度间的关系,得到当列车以 230 km/h 的速度运行时,垂向加速度相对于高低不平顺 0.19 s,并证明了它们之间存在线性相关性,为分析列车-轨道相互关系提供了可行的方法。

参考文献:

- [1] 许玉德,李海锋,戴月辉. 轨道交通工务管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.

- [2] 刘 涛,曾祥利,曾 军. 实用小波分析入门[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 杨建国 等. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 刘秀波. 基于经验模式分解的钢轨波浪弯曲不平顺提取方法[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 26-29.
- [5] 植木基晴, 上浦正树, 竹泽晋一. 利用小波模型分析轨道不平顺和列车摇晃的关系[J]. 铁道总研, 2006, 62(1): 113-120.

An Analysis of the Relationship of Acceleration and Track Irregularity Based on Wavelet

QU Ming ,XU Yu - de

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education ,Tongji University ,Shanghai 201804 ,China)

Abstract: Track irregularity is an important excitation source which can cause vibration of the Traffic - Track system. In order to adapt to the modern railway development ,improve the comfort of passengers ,it is increasingly important to research the relationship between track irregularity and vertical acceleration. In this paper ,the signals of the longitudinal level and vertical acceleration collected by high - speed track inspection car are processed by using wavelet analysis method. The key points are focused on the specific frequency band ,and correlation analysis is made ,then the relationship between track longitudinal level irregularity and vertical acceleration is ascertained.

Key words: wavelet analysis; vertical acceleration; longitudinal level irregularity; correlation analysis

(责任编辑: 刘棉玲)

