

# 车体响应与轨道不平顺的相干分析

\*刘玉标，张营营

(中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要：**本文采用傅立叶变换将京津实测轨道不平顺里程转换为轨道不平顺功率谱密度，分析了轨道不平顺在各个波长的分布以及它们所包含的周期性不平顺成分。同时通过车辆动力学仿真计算得到了车体振动的固有频率和模态及其对应的不平顺波长。并对车体振动横向和垂向加速度与轨道轨距、方向、水平、垂向不平顺进行相干分析，结合车体加速度功率谱分析以及车体系统固有振动频率分析，从频域方面研究了轨道不平顺与车辆动力学响应之间的关系。确定引起车体振动的主要振源以及其相应的不平顺波长，为轨道的维护、维修方案制定提供依据。  
**关键词：**轨道不平顺；功率谱密度；相干分析；车体振动加速度

## COHERENCE ANALYSIS BETWEEN THE VEHICLE VIBRATION RESPONSE AND TRACK IRREGULARITIES

\*LIU yu-biao, Zhang ying-ying

(Key Laboratory for mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The measured statistic samples of track irregularities for JingJin passenger railway line are transformed to its power spectrum density (PSD) mode using the Fast Fourier Transform (FFT) method. We analyze the track irregularity distribution on each wavelength and the periodic track irregularities. Through dynamic calculations we obtained the natural frequencies, the vibration mode and its corresponding track irregularity wavelength of the vehicle. According to the vehicle response, the coherence calculations are utilized to analyze the relationship between its horizontal, vertical acceleration and each track irregularity. Combination with the vehicle vibration acceleration PSD and its structural characteristic natural frequencies, the main vibration source and the sensitive wave length that brings about the vehicle vibration is studied. Hereby, some suggestions can be proposed to control and maintain the track irregularities.

**Key words:** track irregularity; PSD; coherence calculations; vehicle vibrate acceleration

轨道不平顺是列车振动的主要激励源,是引起列车车辆振动、轮轨作用力和轮轨噪声增大的主要因素之一,直接关系到列车运行的平稳性、舒适性和安全性<sup>[1]</sup>。随着列车速度的增大,轮轨动态相互作用增强,轨道不平顺对行车的影响更大,成为直接影响和控制行车最高运行速度的主要因素。因此,研究轨道不平顺与列车车辆振动的相关性具有重要工程实际意义。以往关于轨道不平顺对车辆响应的影响研究中往往将轨道不平顺作为一个确定性函数,如使用正余弦函数作为单一的激励输入,来研究轨道不平顺的几何限值和不平波长<sup>[2]</sup>。但是研究表明<sup>[3]</sup>,轨道不平顺是随里程变化的随机函数,用确定性函数表示具有局限性,要应用随机统计理论进行研究,以期在各种不平顺作用下进行车辆轨道随机振动响应分析。然而在这些研究中,并没有考虑车辆的结构特性,即车体振动的固有频率和模态<sup>[4-5]</sup>。因此本文研究中结合车辆动力学仿真,将京津实测轨道不平顺作为输入,分析车体振动加速度与轨道不平顺的相干函数,确定引起车体振动

基金项目：国家 973 计划(2011CB711100)

作者简介：\*刘玉标(1961 )，男，湖南人，副研究员，主要从事结构动力学研究(E-mail: yubiao@imech.ac.cn)；

张营营(1988 )，女，山东人，博士生。主要从事结构动力学研究(E-mail: zhangying6971@126.com)。

的主要振源以及其相应的不平顺敏感波长，为制定高速客运专线轨道养护维修管理标准提供理论依据。

## 1 输入京津轨道不平顺功率谱分析

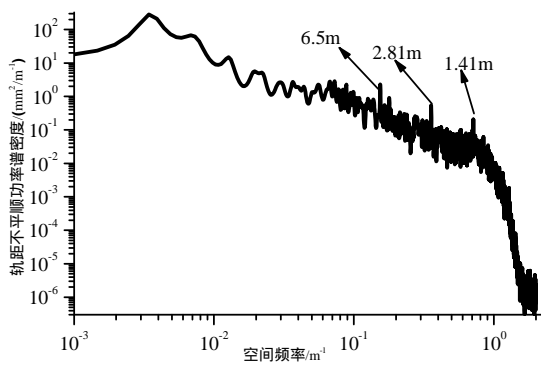


图1 轨距不平顺功率谱密度

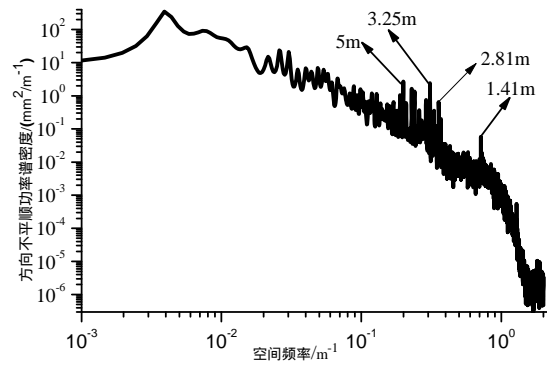


图2 方向不平顺功率谱密度

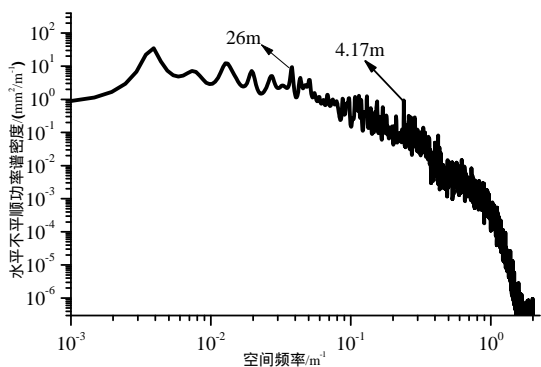


图3 水平不平顺功率谱密度

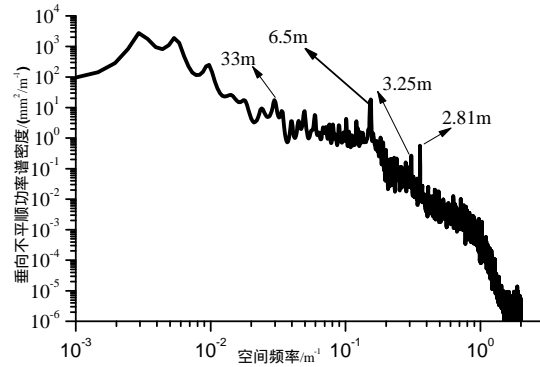


图4 垂向不平顺功率谱密度

功率谱图是以空间频率或波长为横坐标、功率谱密度值为纵坐标的连续曲线，可清楚的表示轨道不平顺随机波的波长和幅值的信息。采用傅立叶变换方法获得的京津轨距、方向、水平、垂向不平顺功率谱密度如图1~4所示。从图中曲线推断，轨道的轨距、方向、水平、垂直不平顺包含许多不同波长和幅值的谐波成分，长波成分的幅值较大，中波成分的幅值较小，且波长越短幅值越小。功率谱曲线下的面积越小，说明轨道不平顺的均方值越小，平顺状态越好。其中水平不平顺的谱线变化比较平缓，位置最低，面积最小，表明水平平顺状态良好。轨距不平顺在波长为6.5m、2.81m和1.41m的窄带范围内有较明显的凸形峰；方向不平顺在波长为5m、3.25m、2.81m和1.41m的窄带范围内有较明显的凸形峰；水平不平顺在波长为4.17m窄带范围内有较明显的凸形峰；垂向不平顺在波长为6.5m、3.25m和2.81m的窄带范围内有较明显的凸形峰，表明轨道不平顺在这些波长位置含有周期性不平顺。其中波长2m以下的周期成分与钢轨接头焊接不良、轨枕间隔弹性不均等综合因素有密切关系<sup>[6]</sup>；轨距不平顺在波长6.5m、方向不平顺在波长3.25m、垂向不平顺在波长6.5m和3.25m周期性成分与轨道板长度以及1/2轨道板长度有关，轨距、方向、垂向不平顺在波长2.81m附近的周期性成分与车轮圆周长相关；方向不平顺在波长5m、水平不平顺在波长4m附近的周期性成分表明钢轨本身在轧制与铺设过程中可能产生了硬弯<sup>[6]</sup>。水平不平顺在波长26m范围内有较明显的凸形峰；垂向不平顺在波长33m范围内有较明显的凸形峰，这些长波周期不平顺是由于轨道施工过程中的一些先天不平顺如桥涵洞等轨道刚度突变或桥梁挠度等形成的。

## 2 车体加速度功率谱分析

运用多体系统理论建立高速列车的多体系统动力学模型。假定车体、构架和轮对均为刚体，不考虑其弹性变形。车辆系统动力学模型由1个车体、2个转向架、4个轮对和8个转臂等15个刚体组成。其中车体、构架、轮对考虑横向、垂向、侧滚、摇头、点头、纵向6个自由度。转臂为1个自由度，即点头。每辆车共

有50个自由度。

本文只针对车辆行驶速度为300Km/h的情况下进行分析。根据建立的车辆系统模型，计算出车体系统振动的主要频率和模态及速度为300Km/h下对应的共振波长如表1所示。在这里选取车体前部横向和垂向振动作为分析对象，其加速度功率谱密度如图5~6所示。车体前部横向加速度表现为车体侧滚、横移和摇头的耦合振动。图5中横向振动加速度功率谱的第一主峰值出现在 $0.0249\text{m}^{-1}$ （波长在40m附近），对应表1中车辆系统以车体摇头为主，车体横移车体侧滚以及轮对横移，构架横移相互耦合的第七阶固有频率2.2048Hz。横向振动加速度功率谱的第二主峰值为 $0.0132\text{m}^{-1}$ （波长在76m附近），对应表1中车辆系统以车体侧滚为主，车体横移相互耦合的第5阶固有频率1.0965Hz。。车体前部的垂向振动表现为车体的沉浮、点头的耦合振动，其加速度功率谱的第一主峰值出现在波长120m附近，对应车辆系统以车体浮沉振动为主的第三阶固有频率0.6887Hz。

表1 车体系统振动的主要频率和模态

模态号	频率/Hz	模态	速度300Km/h对应的波长/m
1	0.4587	车体横移(主)+车体侧滚	181.66
2	0.54	车体摇头	154.31
3	0.6887	车体浮沉	121
4	0.8431	车体点头	98.84
5	1.0965	车体侧滚(主)+横移	76
6	2.1946	第一二位轮对横移+第三四位轮对横移+第一位转向架横移(主)+ 第二位构架横移+车辆侧滚	37.97
7	2.2048	第一二位轮对横移+第三四位轮对横移+第一位转向架横移+第二 位构架横移+车辆横移+车体侧滚+车体摇头(主)	37.79

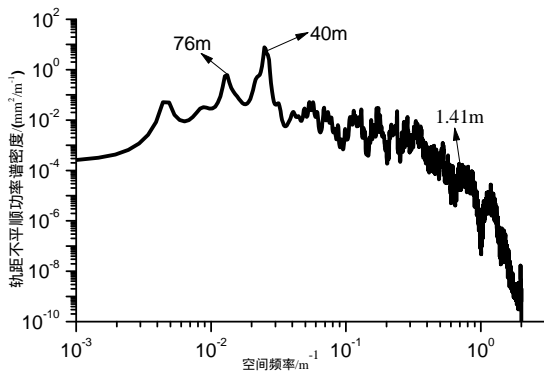


图5 车体前部横向振动加速度功率谱密度

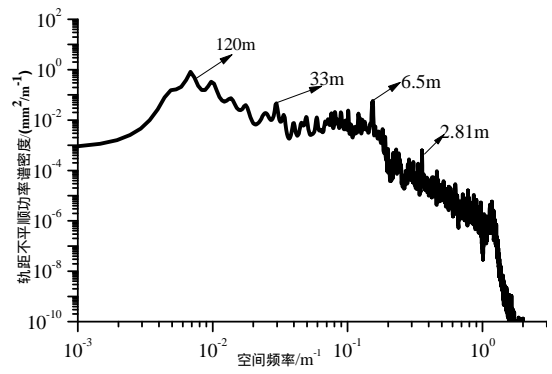


图6 车体前部垂向振动加速度功率谱密度

### 3 车体振动加速度与轨道不平顺相干分析

轨道不平顺功率谱图中可以反映出输入轨道激励幅值和波长的关系。由于轨道不平顺激励所产生的输出车辆动力响应结果具有非常丰富的频率成分，要从中分析引起车辆振动能量的来源，则必须对所得的车辆动力响应结果进行进一步的定量分析。相干函数又称作凝聚函数，它从频域范围反映两信号之间的相关程度，用来评价测试系统中其输入信号与输出信号之间的因果性，即输出信号的功率谱中有多少是被测输入信号引起的。相干函数的定义为：

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{G_{xy}^2(f)}{G_x(f)G_y(f)} \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1 \quad (1)$$

$G_{xy}(f)$  为系统输入和输出的互谱， $G_x(f)$ ， $G_y(f)$  分别为系统输入和输出的单边谱，相干分析可确

定在某个频段内输出响应与输入激励之间的因果关系。若在某个频率上  $\gamma_{xy}^2 = 0$ ，则响应与激励在此频率上是不相干的；若  $\gamma_{xy}^2 = 1$ ，则响应与激励在此频率上完全相干，即响应完全由激励引起。一般情况下  $0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1$ ，表示输入和输出部分相干。采用相干理论对轨道不平顺与所引起车辆的垂横向振动加速度进行分析,研究车辆的振动与轨道不平顺的相干程度,并以此来确定哪一种不平顺波长范围对车辆振动的影响最大。如果找到相干函数,就可以求出各个输入对输出贡献的大小,进而求出在此频率下的主要振源,次要振源等,最终确定影响振动的主要输入等。本文通过计算车体前部转向架中心处所对应横向和垂向振动加速度与轨道轨距、方向、水平、垂向不平顺的相干函数,来分析轨道不平顺对车辆系统响应的影响。

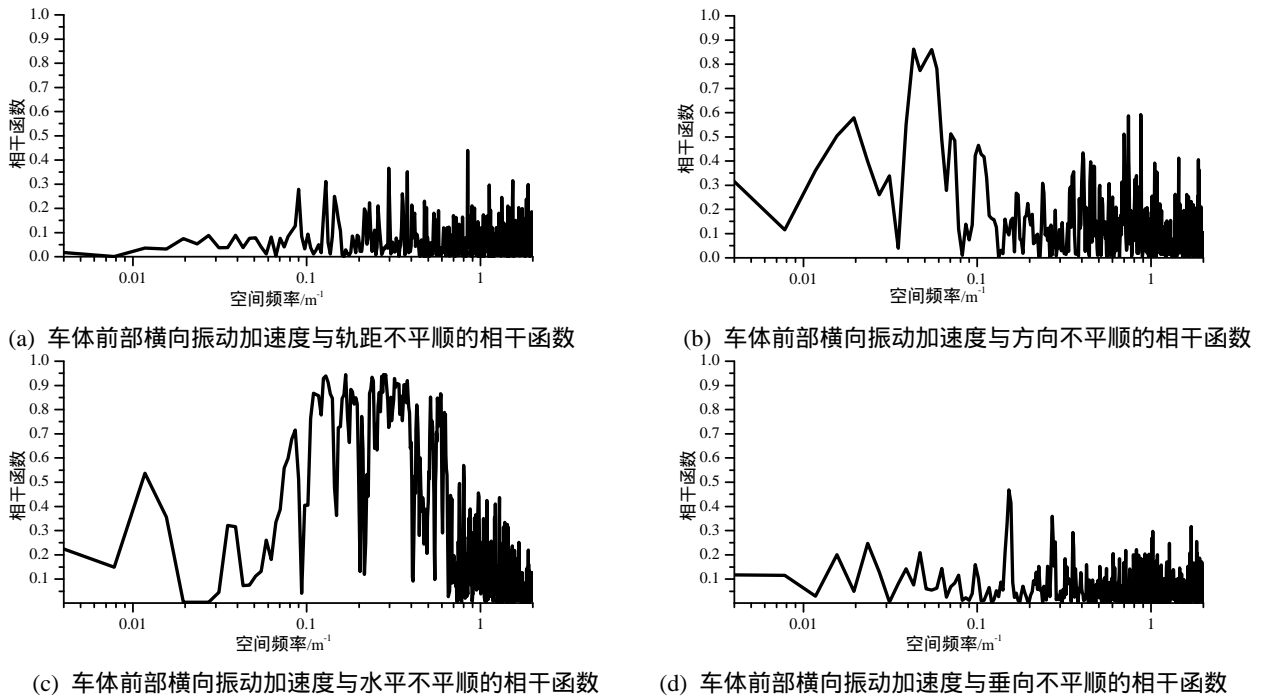


图7 车体前部横向振动加速度与轨距(a)、方向(b)、水平(c)以及垂向(d)不平顺的相干函数

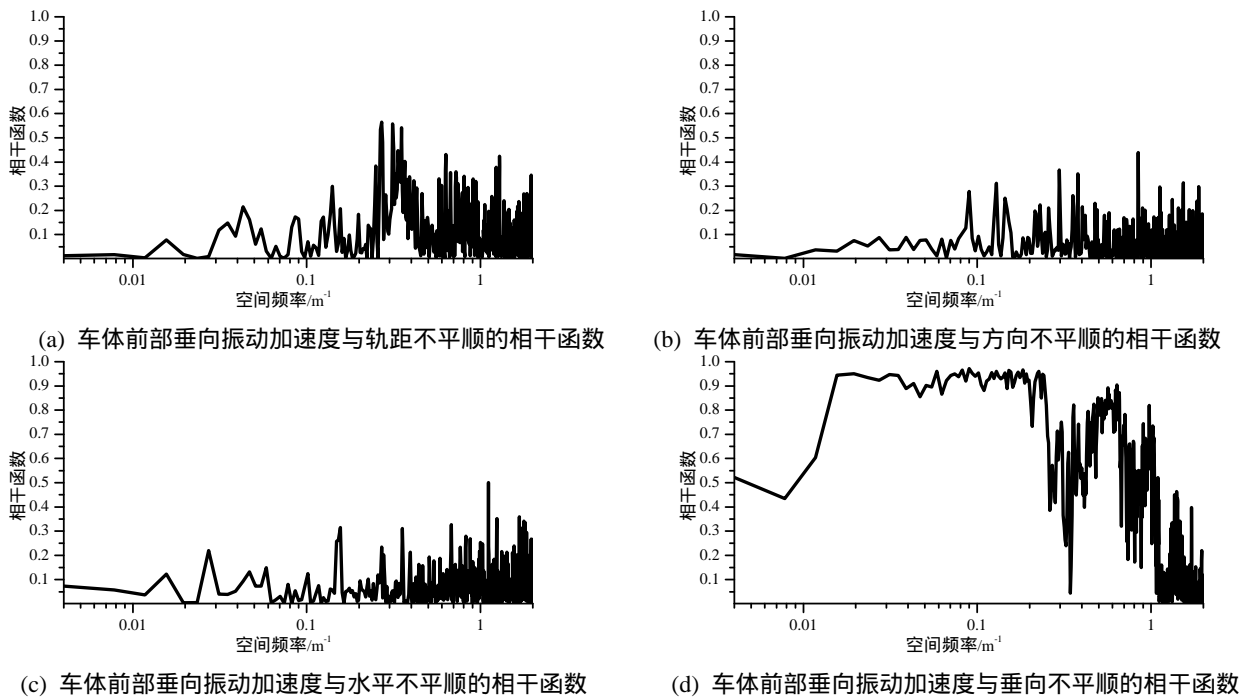


图8 车体前部垂向振动加速度与轨距(a)、方向(b)、水平(c)以及垂向(d)不平顺的相干函数

图7的相干分析结果可知,车体前部横向振动加速度与轨道轨距、垂向不平顺的相干函数值接近于0,与水平和方向不平顺的相干函数值在某些频段内超过0.8。在频率 $0.0429\text{--}0.0586\text{m}^{-1}$ 范围内,车体前部横向振动加速度与方向不平顺相干函数值达到0.8以上,因此在此频率范围内车体前部横向振动主要是方向不平顺引起的。在频率 $0.1093\text{--}0.3867\text{m}^{-1}$ 范围内,车体前部横向振动加速度与水平不平顺相干函数值达到了0.8以上,在此频率范围内车体前部横向振动主要是由水平不平顺引起的。图5中车体前部横向振动加速度功率谱的第一主峰值出现在波长40m附近,此频率处与轨距、水平、垂向不平顺的相干函数值接近于为0,与方向不平顺的相干函数值接近于0.4,为此频率下的最大值,表明第一峰值频率处车体前部横向振动的响应主要是方向不平顺引起的。车体前部横向振动加速度功率谱的第二主峰值在波长在76m附近,结合相干分析,此频率处与轨道轨距、垂向不平顺的相干函数值接近于0,与水平和方向不平顺的相干函数值接近于0.4,因此在第二主频处车体前部横向振动的响应主要是由水平和方向不平顺引起的。轨道不平顺的特点在车体横向振动加速度功率谱密度曲线中亦有体现。车体前部横向振动加速度功率在波长1.4m附近含有周期性波长成分,分别与图1和图2轨距和方向不平顺在此波长处的短波周期成分相对应。

图8相干分析可知,在频率 $0.0156\text{--}0.2500\text{m}^{-1}$ 范围内,车体前部垂向振动加速度与轨道垂向不平顺的相干函数值达到0.9以上,为高度相关,而与轨距、方向、水平不平顺的相干函数值较小。因此在此频率范围内车体前部垂向振动主要是由轨道垂向不平顺引起的。车体前部垂向振动加速度功率谱的第一主峰值出现在波长120m附近,结合相干分析,此频率处与轨距、方向、水平不平顺的相干函数值接近于0,而与垂向不平顺的相干函数值在0.5附近,表明第一主峰频率处的车体垂向振动主要由垂向不平顺引起的。同时,车体垂向振动加速度功率谱密度曲线在波长33m、6.5m、2.81m处存在的周期成分对应轨道垂向不平顺在此处的凸形峰。

## 4 总结

通过分析轨道功率谱图可以发现,轨道功率谱图上有许多尖峰出现,说明该段随机性轨道不平顺中含有多个周期性波长成分。短波周期性成分主要是钢轨接头焊接不良、轨枕间隔弹性不均等综合因素有关;中波周期性成分主要与轨道板长度、轨道板半长度、车轮圆周长以及钢轨本身在轧制与铺设过程中产生的硬弯有关;长波周期性成分主要跟轨道施工过程中的一些先天不平顺有关。利用相干分析,得到车体振动加速度与轨道不平顺的显著相干的区域,在此区域内,该种轨道不平顺的波长对车体振动加速度的影响较大。结合车体前部横振动加速度功率谱分析,波长在40m附近的第一主峰值对应车体的第7阶固有频率,主要是方向不平顺引起的。波长在76m附近的第二峰值对应车体的第5阶固有频率,主要是由轨道的方向和水平不平顺引起。结合车体前部垂向振动加速度功率谱分析和相干分析可知,波长120m附近的峰值对应车体的第三阶固有频率,主要是由轨道垂向不平顺引起的。在日常的铁路养护中,上述波长应重点控制。相干函数和功率谱分析相结合的方法可确定引起车辆振动的轨道随机不平顺类型,相干分析方法能较好地得出轨道随机不平顺对车辆振动的影响规律,可为轨道的维护、维修方案制定提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第二版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 88-114.
- [2] 林玉森, 李小珍, 强士中. 轨道不平顺激励下高速铁路桥上列车走行性研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(6): 96-100.
- [3] 罗林. 轨道随机干扰函数[J]. 中国铁道科学, 1982, 13(1): 74-110.
- [4] 练松良, 黄俊飞. 客货共运线路轨道不平顺最不利波长的分析研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(2): 112-116.
- [5] 练松良, 刘扬, 杨文忠. 沪宁线轨道不平顺谱的分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(10): 1342-1346.
- [6] 金守华, 曾志平. 京津城际铁路博格板式无砟轨道不平顺分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(1). 49-51.