

文章编号:1005-0523(2011)05-0083-05

城市轨道交通轨道不平顺谱分析

李再伟¹, 练松良¹, 李秋玲², 陈鑫¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海申通地铁集团维护保障中心工务公司, 上海 200233)

摘要:以上海城市轨道交通的轨道不平顺检测数据为样本,对城市轨道交通轨道不平顺的特征进行分析。首先,利用轨道不平顺变化率法和经验模态分解法对检测数据进行预处理,有效消除轨距和轨向不平顺检测数据的异常值和非线性趋势线,其次,对检测数据进行功率谱密度分析,并与美国6级轨道谱、德国铁路高低干扰谱和中国提速干线7参数谱进行比较,结果表明:除短波波段外,城市轨道交通轨道不平顺谱和德国铁路低干扰谱水平相当,优于美国6级轨道谱、德国铁路高干扰谱和中国提速干线谱;然后,利用相干函数对轨道不平顺和轴箱垂向和水平振动加速度进行相干分析,得出城市轨道交通轨道不平顺不利波长范围;最后,建议将轨道不平顺谱纳入到轨道质量管理指标中。

关键词:城市轨道交通;轨道不平顺;功率谱密度;相干分析

中图分类号:U213.313

文献标志码:A

随着我国城市轨道交通运营里程的不断增加,列车运营的舒适性和安全性引起人们越来越多的关注。轨道不平顺是轮轨系统的激扰源,是引起机车车辆产生振动和轮轨作用力的主要原因,对行车安全、平稳、舒适性,车辆和轨道部件的寿命以及环境噪声等都有重要影响^[1]。轨道不平顺谱是描述全线轨道不平顺状态的最有效形式,世界一些发达国家都提出各自的轨道谱,如美国有常速铁路6级轨道不平顺谱,高速铁路有7~9级轨道不平顺谱^[2];欧洲铁路提出了用于高速机车车辆设计的“欧洲高速铁路轨道不平顺谱”等。我国对轨道不平顺谱进行了长期研究,练松良等^[3-5]针对沪宁、沪昆等干线铁路的轨道不平顺进行谱分析,得出了轨道不平顺的分布特征,并建议将轨道不平顺谱作为控制轨道质量的指标之一;陈宪麦等^[6-7]对我国干线铁路轨道不平顺功率谱以及拟合谱进行了研究,并建立了相应的轨道谱以及轨道平顺性的判别方法;金守华等^[8-9]对我国秦沈客运专线和京津城际铁路的轨道不平顺功率谱进行了研究,分析了轨道不平顺波长和能量的分布特点,并与德国的轨道谱进行比较,以此来评价我国客运专线轨道质量;刘秀波等^[10]给出了剔除轨道不平顺异常值算法和轨道不平顺零均值化处理算法,提高了轨道不平顺谱的计算精度,并得到京津城际铁路的轨道不平顺谱。上述研究的对象多为干线铁路和高速铁路,对城市轨道交通轨道不平顺特征尚缺乏针对性研究。基于此,针对上海轨道交通3号线轨道不平顺的功率谱进行研究,分析其不平顺分布特征,从而为地铁工务部门科学合理安排线路的维修作业,提高线路质量提供技术上的保障。

1 轨道交通轨道检查车数据的取样

2011年4月18日,上海地铁维护保障中心工务公司利用ENSCO公司的轨道检查车对上海轨道交通3号线上下行进行检测。本文的数据取自这两次测试。在测试过程中,列车的运行速度是25~80 km·h⁻¹,轨检车的采样点间隔为0.25 m(1ft),每公里采样点为4 000点。样本长度越长,分析结果越具有代表性,但相应对数据的要求就较高。为了使得样本的测点数能满足频谱分析的要求,取样本长度为1 024 m,也即

收稿日期:2011-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(5087158);铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心开放研究项目

作者简介:李再伟(1983—),男,博士研究生,主要研究方向为轨道结构。

样本点数为4 096点^[1]。图1为轨检车测得的高低不平顺样本函数。

2 轨道不平顺数据预处理

2.1 异常值处理

轨道检查车在检测轨道几何不平顺时,由于激光易在道岔区的有害空间扫空,导致道岔区轨向和轨距几何形位检测值存在较大异常值,此外传感器接触不良、线路上附有杂物和外界存在强干扰电源等原因^[11],也使得测试数据存在异常值,而这些误差值的存在必然会影响检测数据的正确分析,所以,在应用检测数据之前需对异常值进行剔除以提高原始数据的可靠性和相关计算的精度。对轨道检测数据统计可知,实际轨道不平顺相邻两点变化率一般不大于3‰,超过3‰可以作为异常值处理^[10]。图2为去除异常值的效果图,可见该方法可以有效去除信号中的异常值。

2.2 趋势项的剔除

目前,轨道检测车对水平几何不平顺的检测都是通过对超高进行25 m高通滤波的方法,但是由于标定误差、曲线超高、仪器漂移等原因使得超高信号包含明显的非平稳趋势项,而对其进行滤波并不能消除该趋势项;此外,轨距几何不平顺由于陀螺漂移、曲线段不均匀磨损等原因也存在着非线性的趋势项。所以,在分析和计算轨道不平顺谱时必须剔除此类趋势线。本文采用经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)去除非线性趋势线,该方法根据信号本身的固有特性进行分解,将信号分解成若干个本征模态函数,再对处理后的本征模态函数进行信号重构就可以得到处理后的新信号^[5]。图3为去除趋势线效果图,可见该方法可以有效去除信号中的非线性趋势项。

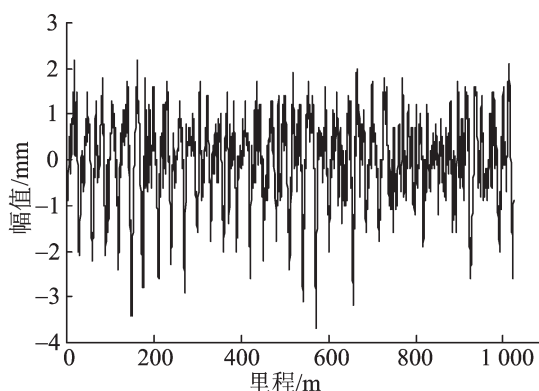


图1 轨检车测得的左轨道高低不平顺样本函数
Fig.1 Irregularities sample function of left track measured by track inspection car

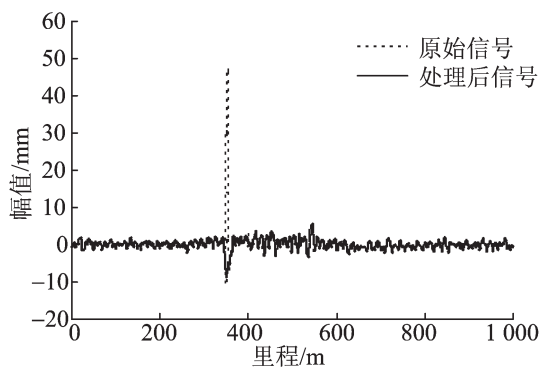


图2 异常值去除前后波形图比较
Fig.2 Comparison before and after eliminating unusual value

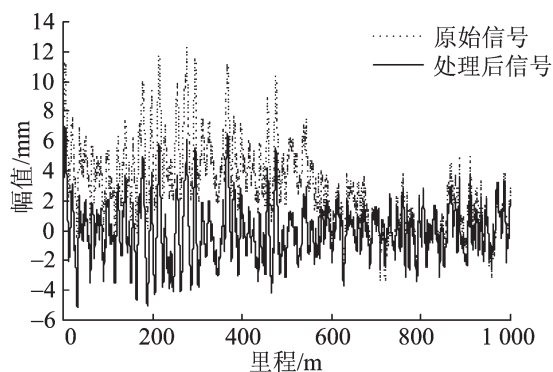


图3 趋势项去除前后波形图比较
Fig.3 Comparison before and after eliminating the trend item

3 轨道不平顺谱计算与分析

由于所取样本足够长,故可把轨道不平顺近似认为是平稳随机过程。对于一个平稳随机过程函数 $X(t)$,在范围 $[-T, T]$ 取其一段函数 $X_T(t)$ 。则过程 $X_T(t)$ 的样本函数 $X_T(t)$ 满足有限能量条件,通过傅里叶变换可得单边功率谱密度 $G_x(f)$ ^[7]:

$$G_x(f) = \begin{cases} 2S_x(f) & 0 \leq f < \infty \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_x(f)$ 称为双边功率谱。其计算式为

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} S_{X_T}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T R_{X_T} e^{-2\pi f \tau} d\tau = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |F_{X_T}(f)|^2 \quad (2)$$

式中: $F_{X_T}(f)$ 为样本函数 $X_T(t)$ 的傅里叶变换; $S_{X_T}(f)$ 为样本长度为 $2S$ 的估计功率谱; R_{X_T} 为样本长度为 $2S$ 的相关函数。

为评价轨道的总体平顺性,将上海城市轨道交通3号线铁路轨道不平顺谱与美国6级轨道谱、德国铁路高、低干扰谱以及中国的提速干线7参数谱进行对比。如图4(a)所示,轨道高低不平顺谱值在波长大于5 m的中长波频段明显小于国外轨道谱,高低不平顺谱在频率为 0.032 m^{-1} 处取得最大值。如图4(b)所示,轨道方向不平顺谱值在波长大于3.7 m频段,整体水平与德国铁路低干扰谱水平相当,优于美国6级轨道谱、德国铁路高干扰谱和中国提速干线谱。如图4(c)所示,轨道水平不平顺谱值在波长大于8.3 m频段与德国铁路低干扰谱水平相当,在大部分频段与中国提速干线谱相当,但在短波频段谱值较大。如图4(d)所示,轨距不平顺谱值小于美国6级轨道谱和德国铁路高干扰谱,与德国铁路低干扰谱的中长波段和中国提速干线谱水平相当。

由以上分析可知,城市轨道交通轨道高低、方向不平顺在中长波频段轨道状态较为优良,在短波的低频段状态不佳,除小于中国提速干线谱外,均大于国外轨道谱;水平、轨距不平顺同德国铁路低干扰谱水平相当,但同样存在着短波频段不平顺谱值相对较大的现象。4种轨道不平顺谱均在频率为 0.31 m^{-1} (波长为3.2 m)处存在明显谱峰,说明存在着以承轨台长为周期的周期不平顺。该成分主要是由于承轨台的上拱、翘曲或支撑刚度不均匀等原因造成的。轨道高低、方向不平顺存在着 0.032 m^{-1} (波长为31.25 m)的谱峰值,说明存在着以梁长为周期的周期不平顺,其是由桥梁徐变上拱引起的等原因造成的。

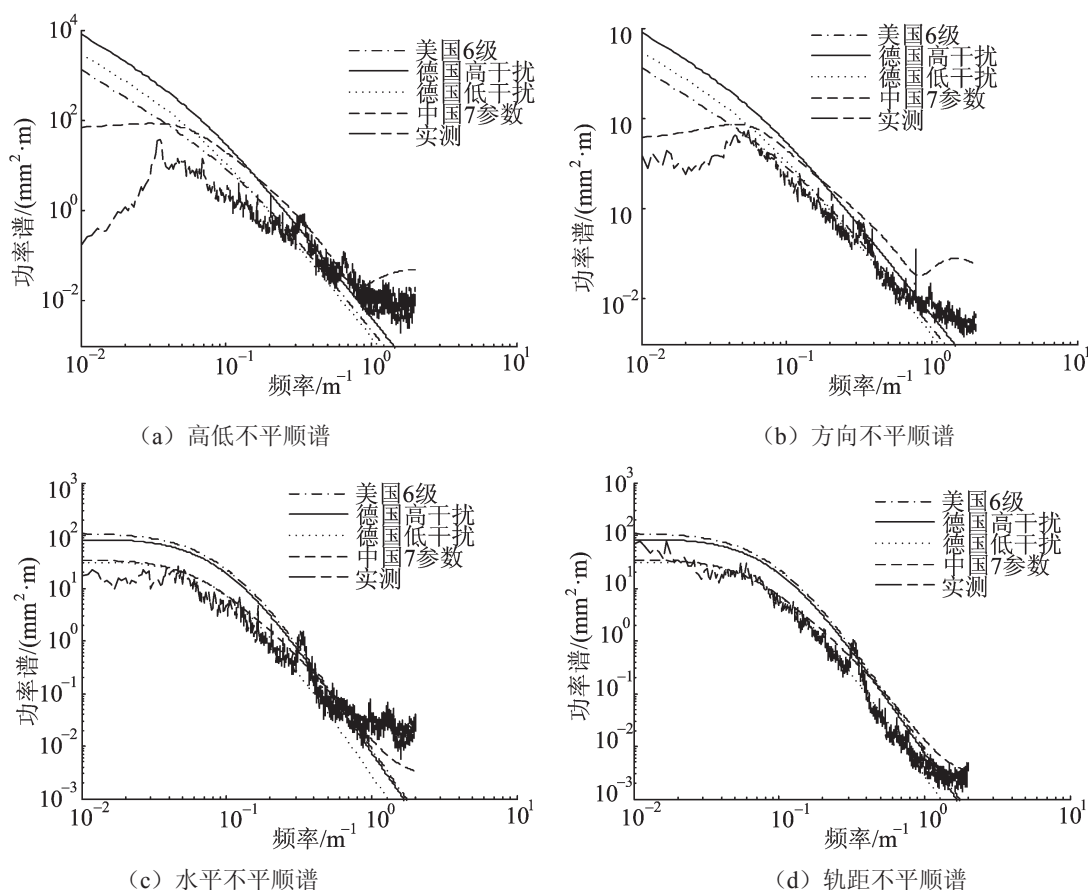


图4 轨道不平顺谱与标准谱的比较

Fig.4 Comparison of track geometry irregularity spectrum and standard spectrum

4 轨道不平顺与轴箱加速度的相干分析

相干分析可确定输出响应是由输入激励引起的百分值,如果能够找到相干函数的最大值,则可认为此轨道不平顺波长对车辆的振动最为不利^[3]。对于系统的输入输出,根据互谱不等式,相干函数定义为

$$\zeta_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_x(f)S_y(f)} \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (3)$$

式中: $S_x(f)$, $S_y(f)$ 分别表示系统输入、输出的双边谱。 ζ_{xy}^2 越大说明相干程度越高。

轨道高低不平顺与轴箱垂向振动加速度的相干函数如图 5(a) 所示,在频率为 0.61, 0.87 m⁻¹ 等频段(对应波长为 1.66, 1.14 m)上,相干函数值为 0.8 以上。说明在此波长范围内,轴箱垂向振动加速度与高低不平顺的相干程度较高,即在此频段上高低不平顺可引起较大的垂向轮轨力。轨道方向不平顺与轴箱水平振动加速度的相干函数如图 5(b) 所示,在波长为 2.82~3.31 m 频段内上,相干函数值为 0.8 以上,说明在此波长范围内,轴箱水平振动加速度与方向不平顺的相干程度较高,可引起较大的轮轨横向力。

轨道水平不平顺与轴箱垂向振动加速度的相干函数如图 5(c) 所示,在波长为 7.09, 0.92 m 频段处,相干函数值为 0.7 以上,说明水平不平顺在此频段内可引起较大的垂向轮轨力。轨道水平不平顺与轴箱水平振动加速度的相干函数如图 5(d) 所示,在波长为 2.25, 1.74 m 上,相干函数值为 0.8 以上,说明在此频段上水平不平顺可引起较大的横向轮轨力。

通过以上分析可知,城市轨道交通轨道不平顺在短波范围内可引起较大的轮轨力,从而对列车行驶的安全性产生影响,所以,对城市轨道交通轨道维修而言,应加强对短波长轨道不平顺的控制。

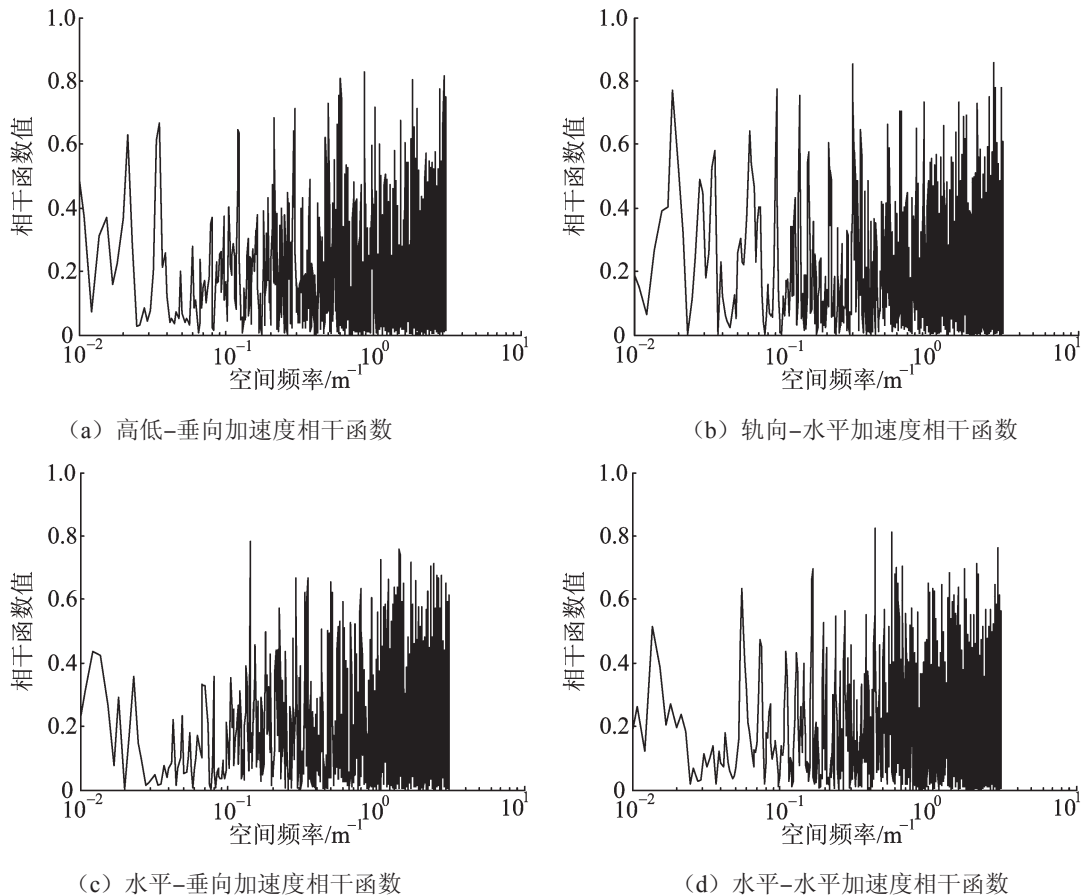


图5 轨道不平顺-轴箱加速度相干函数

Fig.5 Coherent function between rail irregularity and axle box acceleration

5 结论

1) 除短波波段外,城市轨道交通轨道不平顺谱和德国铁路低干扰谱水平相当,优于美国6级轨道谱、德国铁路高干扰谱和中国提速干线谱。

2) 城市轨道交通轨道不平顺谱均存在以承轨台长为周期的周期不平顺;轨道高低、方向不平顺存在着以梁长为周期的周期不平顺。这些周期不平顺多是由承轨台上拱和桥梁徐变上拱等原因引起的,建议对此类轨道不平顺的成因和控制方法展开深入研究。

3) 城市轨道交通轨道不平顺对轮轨力的敏感波长集中在短波区段,所以,应加强对短波不平顺的控制,以提高行车的安全性和平稳性。

4) 建议在对城市轨道交通轨道不平顺检测的基础上,通过对轨道不平顺谱的统计分析,提出适合城市轨道交通的线路不平顺谱,并将其作为轨道质量的控制指标之一,与TQI指标和扣分法相结合,从频率域和幅值域两方面对轨道进行养护维修。

参考文献:

- [1] 罗林,张格明,吴旺青,等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2006:50-57.
- [2] 杨文忠,练松良,刘扬. 轨道不平顺功率谱拟合分析方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(3):363-367.
- [3] 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.
- [4] 练松良,李建斌,杨文忠. 沪昆线与金温线轨道不平顺谱的分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):257-262.
- [5] 杨震,王效堂,练松良,等. 合武客专无砟轨道曲线段不平顺谱分析[J]. 华东交通大学学报,2010,21(5):11-16.
- [6] 陈宪麦,王澜,陶夏新,等. 我国干线铁路轨道平顺性评判方法的研究[J]. 中国铁道科学,2008,29(4):21-27.
- [7] 陈宪麦,王澜,陶夏新,等. 中国干线铁路轨道谱的拟合方法[J]. 交通运输工程学报,2008,8(1):19-22.
- [8] 金守华,曾志平,陈秀方,等. 秦沈客运专线板式无砟轨道不平顺功率谱分析[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(6):17-21.
- [9] 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,2009,16(1):48-52.
- [10] 张曙光,康熊,刘秀波. 京津城际铁路轨道不平顺谱特征分析[J]. 中国铁道科学,2008,29(5):25-30.
- [11] 邓学通,叶一鸣. 准高速轨检车检测原理及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2004:126-128.

Characteristic Analysis of Track Irregularity Spectrum of Urban Rail Transit

Li Zaiwei¹, Lian Songlian¹, Li Qiuling², Chen Xin¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804; 2. Shanghai Rail Transit Maintenance Support Center Track and Construction Maintenance Division, Shanghai 200233)

Abstract: According to the track geometry data collected by track recording vehicles from Shanghai urban rail transit, the characteristic of track irregularity is analyzed. Firstly, the elimination methods of abnormal value and nonlinear trend are given and used in the data preprocessing of track irregularities on urban rail transit based on the change rate of track irregularity and the method of empirical mode decomposition. Secondly, power spectral density is calculated with Matlab program, and compared with US class 6 railways, German railway spectra of high irregularity and low irregularity, and China main railway spectra. The statistic and analyzing result indicates that the track irregularity spectrum values of Shanghai urban rail transit are close to German railway spectra of low irregularity except for short wavelength bands and better than US class 6 railways, German railway spectra of high irregularity, and China main railway spectra. Furthermore, the coherence functions are utilized to analyze the relationship between track irregularities and vertical / lateral axle box accelerations; a conclusion is drawn about the range of detrimental track irregularity wavelengths. Finally, the track irregularity spectrum is suggested as an index to control track geometry irregularity.

Key words: urban rail transit; track irregularity; power spectral density; coherence analysis