

文章编号: 1005-0523(2010)05-0011-06

合武客专无砟轨道曲线段不平顺谱分析

杨 震¹, 王效堂², 练松良¹, 李再伟¹

(1. 同济大学 道路与铁道工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海铁路局 合肥工务段, 安徽 合肥 230011)

摘要:以合武客运专线动检车实测轨道不平顺数据为统计样本,采用轨道不平顺变化率和线性插值方法以及经验模态分解法对轨道不平顺异常值和趋势项进行处理,并运用经典周期图法对统计样本进行空间谱估计,同时采用最小二乘法对轨道不平顺功率谱进行拟合。研究结果表明,不平顺功率谱谱线普遍低于美国 6 级谱,在长波段能量较低,但存在周期性成分,同时温度力对无缝线路影响显著。缓和曲线与圆曲线的分析结果都表明内轨平顺状况优于外轨。

关 键 词:客运专线;轨道不平顺;功率谱密度;经验模态分解法

中图分类号:U213.313

文献标识码:A

随着我国铁路进入高速、重载的时代,轨道平顺性的要求也越来越高。能否实现轨道高平顺性是高速铁路成败的核心问题之一,其要求高,难度大,涉及面广^[1]。轨道不平顺是指轨道几何形状及其空间位置偏差,主要包括轨道方向、高低、水平等不平顺。轨道不平顺是轮轨系统的主要激励源,是引起机车车辆产生振动和轮轨作用力的主要原因,它对列车的运行安全性、平稳性、舒适性、车辆和轨道部件寿命以及环境噪声等都有重要影响^[2]。轨道不平顺谱是描述轨道不平顺状态的最有效形式,世界一些发达国家,如美国、英国、日本、德国、法国等,都有本国铁路的轨道不平顺标准谱,以指导轨道的不平顺管理。我国对轨道不平顺谱密度进行了长期的研究^[3-9],但对客运专线轨道不平顺谱密度尚缺乏系统研究。合武客运专线是“四纵四横”客运专线中的“一横”东西向干线沪汉蓉快速通道重要组成部分,设计时速 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。合武客运专线轨道采取有砟和无砟两种形式,路基上采取有砟轨道,在长大隧道内铺设无砟轨道,无砟轨道采用的为 CRTS-I 型双块式无砟轨道。本文通过对合武客运专线无砟轨道曲线地段轨向和高低不平顺的功率谱进行研究,分析对比其左右轨的不平顺特征;并以美国 6 级谱作为参照,探讨客运专线轨道不平顺的特征与规律。通过研究,可为客运专线轨道不平顺状态评估、轨道施工和维护管理提供参考。

1 轨道不平顺预处理

在轨道不平顺检测过程中,由于测试系统的漂移、漏电、干扰和输出的非线性等种种原因,会造成实测轨道不平顺常存在异常值和趋势项。因此,在计算轨道不平顺功率谱时,为提高计算精度,必须对数据进行预处理。

1.1 异常值剔除方法

对于轨道不平顺数值来说,由于轨道刚度较大,轨道不平顺不可能在 1 m 范围内有较大变化,而且现场实际轨道不平顺变化率的控制小于 1% ,因此可以通过轨道不平顺变化率来检测轨道不平顺中的异常值。统计结果表明: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]。本文利用该方法对数据进行处理。如图 1。

收稿日期:2010-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(1600234008)

作者简介:杨 震(1986—),男,硕士研究生。

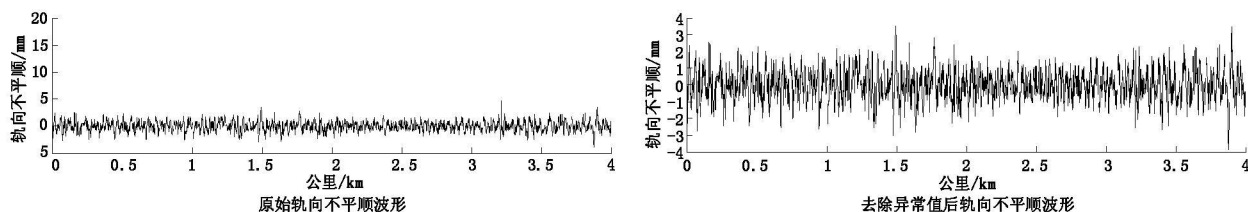


图1 消除异常值效果图

1.2 轨道不平顺中心化

由于轨道不平顺存在趋势项,其均值非零,甚至是非平稳的,轨道不平顺谱计算必须剔除这类影响。本文采用经验模态分解法(EMD)对轨道不平顺进行中心化处理,可以有效的消除趋势项。

经典模态分解法(EMD)的基本思想是,认为任何复杂的信号都是由一些相互不同的、简单的、非正弦函数的分量信号组成^[11]。基于此,可从复杂的信号中直接分离出从高频到低频的若干阶基本信号,即固有模态函数(IMF)。需满足以下两个条件^[12]:对于一系列数据,极值点和过零点数相等或至多相差1点;在任意点,由局部极大点和极小点构成的2条包络线对应坐标的平均值为零。

图2给出了轨道轨向不平顺中心化的结果。可见,通过EMD处理可以有效的实现轨道不平顺中心化处理。

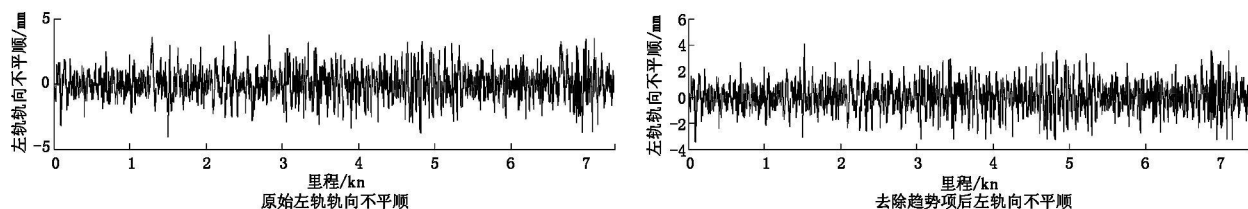


图2 去除趋势项结果对比图

2 轨道不平顺功率谱分析

功率谱密度函数是通过均方值的谱密度对随机数据频率结构的描述,是研究所有随机信息如随机振动等频率或波长成分的统计含量、幅值变化规律,是描述轨道不平顺特征的最重要的统计函数,对我们科学地评价轨道的平顺状态非常有帮助。

本研究采用的数据是由上海铁路局合肥工务检测中心0#动检车检测所得,选取的里程为合武线下行K601+83~K601+283缓和曲线段(缓和曲线半径为11.11~7.69 km)以及K601+283~K601+483圆曲线段(圆曲线半径7.69 km)。原始数据检测时间范围为2009年4月至2010年3月。动检车最大检测速度为250 km·h⁻¹。由于研究区段为曲线段,故分别分析其左右轨的轨向和高低功率谱,并比较其差别。采用的功率谱分析方法为经典周期图法,由于原始的功率谱图形毛刺较多,不便比较,所以,采用最小二乘法对原始功率谱进行拟合。

2.1 缓和曲线段轨道不平顺谱分析

图3所示为缓和曲线检测区段12个月的轨道左轨向拟合功率谱。由图可见,除了8月份的谱线在小于20 m波段略高于美国6级谱,其它月份的谱线均低于美国6级谱。这说明轨道整体状况优良。8月份谱线明显偏高也是由于气温高导致轨温升高,轨道几何形位发生变化所致。此外,谱线在1 m以及100 m附近波段明显存在周期性成分。由于目前线路采用的是基本轨长为100 m的无缝线路,100 m附近波段周期性成分显然与钢轨长度相关,应该是钢轨焊缝焊接不平顺所致。而1 m附近波段的周期性成分应为钢轨轧制校直工艺缺陷所致。

图4为缓和曲线检测区段12个月的右轨向拟合功率谱。容易看出,各个月份的谱线高低位置以及存在的周期性成分都与左轨向类似。

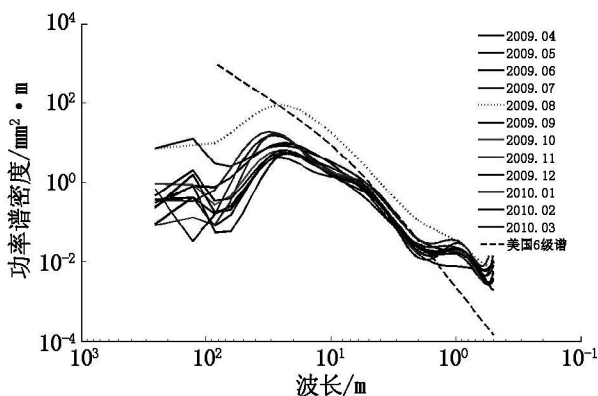


图3 缓和曲线左轨向拟合谱比较

对该缓和曲线左右轨向功率谱进行对比分析,图5为2010年2月的拟合谱对比图。从图中可以看出:左右轨向的拟合谱曲线在短波波段重合程度很好,而左轨向功率谱在中波波波段附近偏高,应该为曲线内外轨受力不均,导致钢轨不平顺程度也有所差异,左轨状况较差,应为外轨。2009年5月、9月、10月、11月以及2010年1月、3月的左右轨向对比图显示趋势与此相同,其它月份左右轨向拟合谱曲线在有效波段内基本重合。

下面分析缓和曲线测试区段高低不平顺,如图6、图7所示。由图可见,只有8月份的谱线在3~10 m波段内以及3月份的谱线在短波波波段内较美国6级谱偏高,其它月份谱线均低于美国6级谱。轨道整体状况优良。在高低拟合谱图中不能看出明显的周期性成分所在波段位置。但通过分析原始高低谱线的尖峰,其所在波段均集中在7, 14, 21, 28 m等附近,如图8所示(未取双对数坐标)。这可能与无砟轨道板或轨下基础的单位尺寸有关。

此外,由图7可见,4月份的右轨高低不平顺明显优于其它月份,应该是因为线路刚刚开通运行,平顺状态最好,而开始运行一段时间之后,会造成一定量的沉降,轨道的高低平顺状态有所下降并渐趋稳定。而图6中的4月份左轨高低不平顺并没有明显优于其它月份。可见开始通车以后,曲线段外轨的沉降速度明显快于内轨。到了8月份,气温升高幅度较大,左右轨高低平顺性状态均明显下降,而且8月份的谱线也是在7 m附近波段高出其他月份的谱线最为明显,表明该轨下基础(轨道板或基床)的材料可能受温度影响较敏感。之后随着气温回落,并及时加以养护维修,9月份到次年的2月份状态依旧稳定且良好。而3月份的谱线在短波波波段明显高出,表明在通车运行一年左右,轨道开始出现明显的短波不平顺。但该不平顺是能够在适当的养护维修后得到有效控制,还是继续发展甚至加剧,还需分析以后的测量数据。

对比缓和曲线段左右轨高低功率谱,以2010年3月为例,如图9所示:左右高低的功率谱拟合曲线重合程度总体较好,但还是存在一定差别。特别是在中长波波波段,左高低功率谱明显偏高,同样可以判断左轨为外轨。可见缓和曲线段的内外轨高低不平顺状态确实也存在一定差异,内轨状态偏好。2009年4月、5月、6月、8月以及2010年1月的左右轨高低拟合谱对比图也显示了该趋势,其它月份左右高低拟合谱线在有效波段内基本重合。

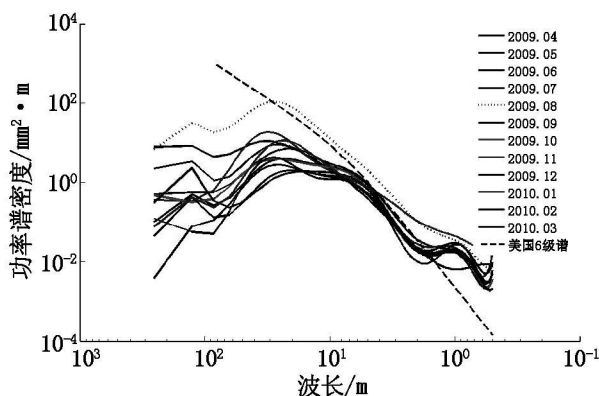


图4 缓和曲线右轨向拟合谱比较

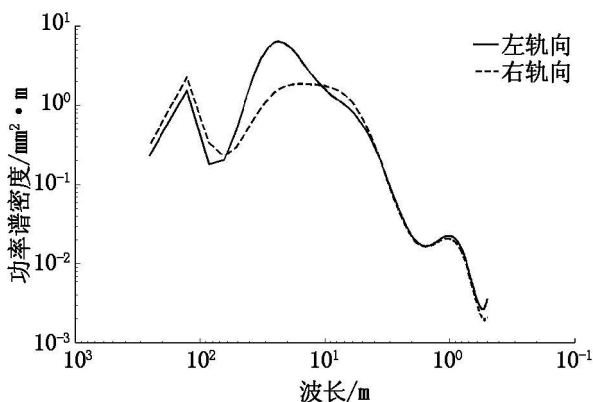


图5 缓和曲线左、右轨向对比

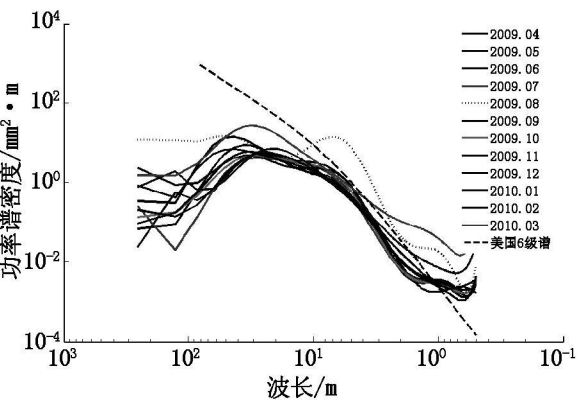


图 6 缓和曲线左高低拟合谱比较

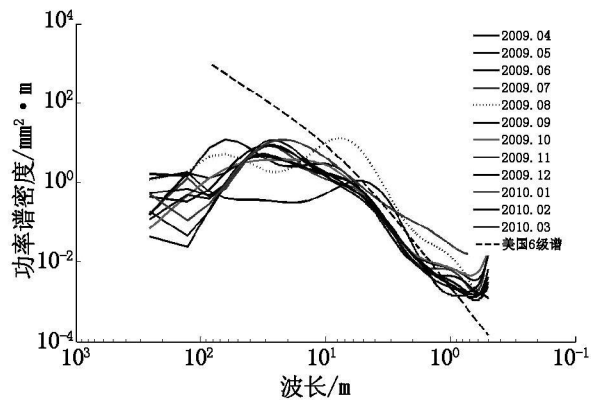


图 7 缓和曲线右高低拟合谱比较

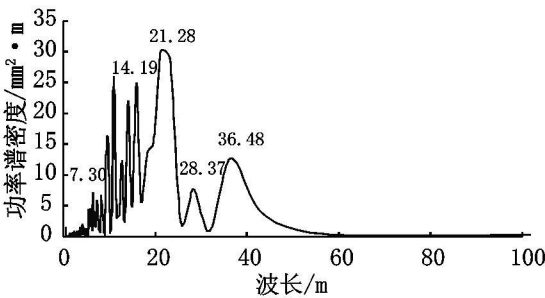


图 8 尖峰成分所在位置

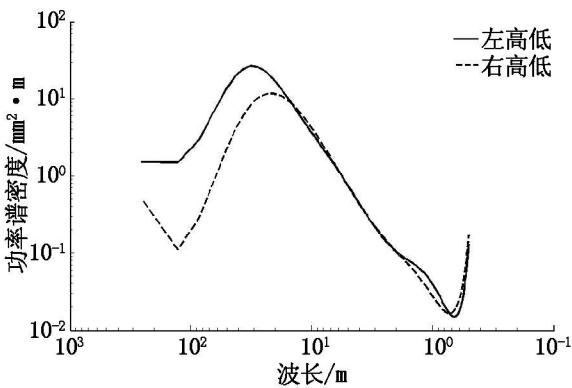


图 9 缓和曲线左、右高低对比

2.2 圆曲线段轨道不平顺谱分析

图 10 为圆曲线检测区段的 12 个月左轨向拟合功率谱。可以看出,同缓和曲线段一样,除了 8 月份的谱线在小于 20 m 的波段略高于美国 6 级谱,其它月份的谱线均低于美国 6 级谱。这说明轨道整体状况优良。此外,谱线在 1 m 以及 100 m 附近波段明显存在周期性成分。产生原因同于缓和曲线段。同样,8 月份谱线明显偏高也是由于气温高导致轨温显著升高,使轨道几何形位发生变化所致。

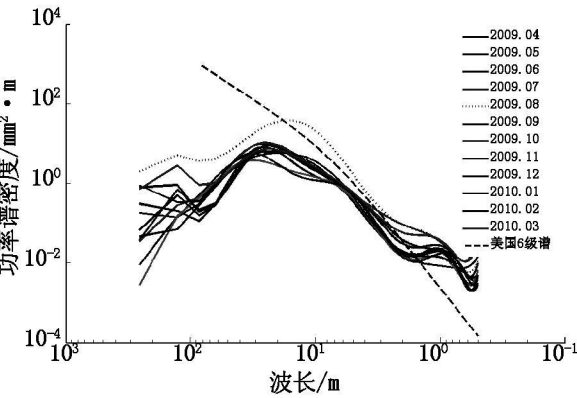


图 10 圆曲线左轨向拟合谱比较图

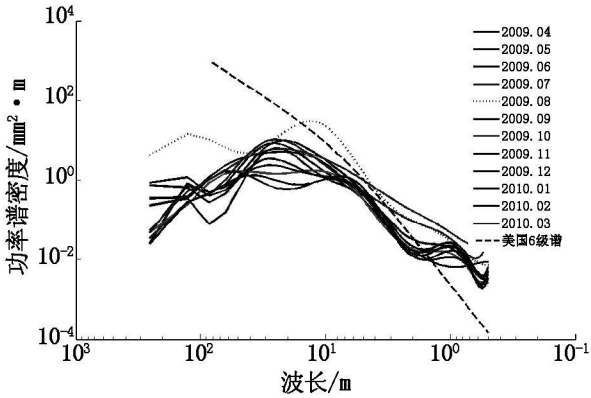


图 11 圆曲线右轨向拟合谱比较

图 11 为圆曲线检测区段 12 个月的轨道右轨向拟合功率谱。同缓和曲线段一样,各个月份的谱线高低状态以及存在的周期性成分都与左轨向类似。

对圆曲线左右轨向功率谱进行对比分析结果如下(图略):同缓和曲线段一样,左右轨向的拟合功率谱曲线重合程度很好,2009年10月、11月、12月以及2010年1、2月,左轨向功率谱在中波波段附近偏高,应该为内外轨受力不均,导致钢轨焊缝处不平顺度也有所差异,左轨应为外轨。

下面分析圆曲线测试区段高低,如图12、图13所示。同缓和曲线段的高低功率谱类似,只有8月份的谱线在3~10 m波段内以及3月份的谱线在短波波段较美国6级谱偏高,其它月份谱线均低于美国6级谱。轨道整体状况优良。同样,在圆曲线的高低拟合功率谱图中也不能看出明显的周期性成分所在波段位置。但通过分析原始高低谱线的尖峰,其所在的波段同样是集中在7 m及其倍数附近。对比左右高低的功率谱图,图13中可见4月份的右轨高低不平顺明显优于其它月份,其结果同于缓和曲线右轨高低不平顺功率谱。而图12中的4月份左轨高低不平顺虽然也优于其它月份,但并没有右轨明显。这也与缓和曲线段的分析结果一致。

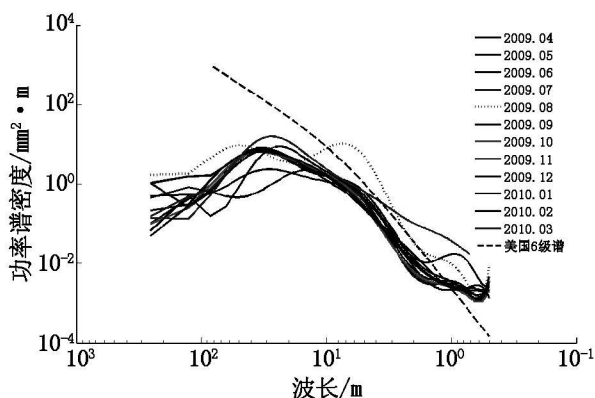


图12 圆曲线左高低拟合谱比较

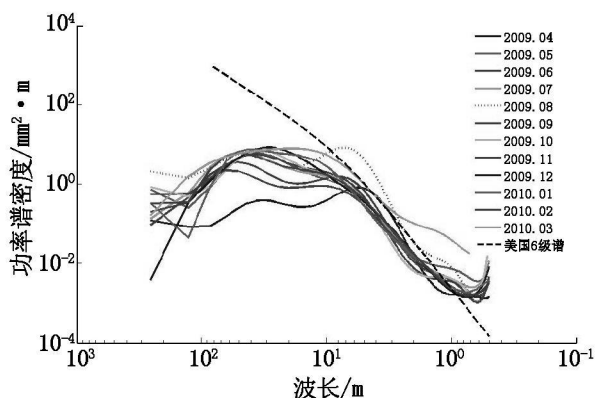


图13 圆曲线右高低拟合谱比较

比较圆曲线段左右轨高低功率谱之间的差别结果如下(图略):左右高低的功率谱曲线重合程度总体较好,但还是存在一定差别。特别是2009年4月、6月,左高低功率谱在中波波段明显偏高,同样可以判断左轨为外轨。也可见圆曲线段的内外轨高低不平顺状态确实存在一定差异,内轨状态偏好。

3 结论

通过对合武客运专线曲线段无砟轨道不平顺功率谱的分析,可以得到以下结论:

合武客运专线无砟轨道曲线段不平顺功率谱谱线普遍低于美国6级谱,轨道整体状况良好。

无论是轨向还是高低,8月份的谱线位置都明显高于其他月份的谱线。说明温度力对无缝线路影响显著。

无论轨向还是高低,功率谱中都存在波长为100 m左右的周期性成分。说明无缝线路轨道焊接质量仍有待提高。

高低不平顺谱线在2010年3月份短波波段都明显高出其他月份,表明轨道在使用一年后开始出现明显的短波不平顺趋势。但其发展有待继续观察。

高低不平顺功率谱尖峰所在的波段均集中在7, 14, 21, 28 m等附近。这可能与无砟轨道板或轨下基础的单位尺寸有关,且受温度影响较为显著。

线路开始运行一段时间之后,会造成一定量的沉降,轨道的高低平顺状态会有所下降并渐趋稳定,外轨的下降速度明显高于内轨。

无论轨向还是高低,左右轨的功率谱曲线重合程度总体较好,但还是存在一定差别。外轨功率谱在中长波波段偏高。可见曲线段的内外轨不平顺状态确实存在一定差异,内轨状态较好。

缓和曲线与圆曲线检测段轨向和高低的分析结果基本一致。

参考文献:

- [1] 卢祖文. 客运专线铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [2] 罗林, 魏世斌. 我国干线轨道不平顺功率谱的研究[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1999.
- [3] 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, 2006, 34(3): 363-367.
- [4] 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): 1 342-1 346.
- [5] 李海峰, 吴纪才, 许玉德. 铁路轨道几何状态评价方法比较[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 772-776.
- [6] 曾华亮, 金守华, 陈秀方. 客运专线新建线路轨道不平顺功率谱分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 31-34.
- [7] 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.
- [8] 王开云, 翟婉明, 蔡成标. 左右轨道不平顺功率谱转换中心线功率谱的方法[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 27-29.
- [9] 雷晓燕, 毛利军. 线路随机不平顺对车辆-轨道耦合系统动力响应分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 22(6): 38-42.
- [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] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等. 基于经验模式分解的滤波去噪法及其在 GPS 多路径效应中的应用[J]. 测绘学报, 2006, 36(11): 321-327.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1998, 454: 903-995.

An Analysis of Track Irregularity Spectrum of Curving Segments of Hefei-wuhan Passenger Railway

Yang Zhen¹, Wang Xiaotang², Lian Songliang¹, Li Zaiwei¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hefei Track Maintenance Division, Shanghai Railway Administration, Hefei 230011, China)

Abstract: Using measured track irregularity of Hefei-Wuhan passenger railway as statistic samples, this paper adopts the changing rate of track irregularity, the method of linear interpolation, and method of empirical mode decomposition to process abnormal value of track irregularity and its tendency. The PSD of track irregularity is calculated by using the period gram method and fitted by least square method. The results indicate that the PSD of track irregularity of Hefei-Wuhan passenger railway contain periodic waves and their positions are commonly lower than that of class 6 of USA, and the power is low in long wavelength range. Meanwhile, the temperature stress exerts a great effect on continuously welded rail track. The analyzing results of the transition curve and the circular curve show that the regularity of the internal rails are better than that of external rails.

Key words: passenger railway; track irregularity; PSD; EMD

(责任编辑 王全金)