

文章编号: 1001-8360(2001)03-0082-06

仿真计算比较我国干线谱与国外典型轨道谱

陈 果¹, 翟婉明², 左洪福¹

(¹南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; ²西南交通大学 列车与线路研究所, 四川 成都 610031)

摘 要: 利用车辆-轨道耦合模型, 通过仿真计算, 比较了我国干线谱与国外典型轨道谱。比较结果表明: 我国高速试验线 30 m 以上的长波不平顺与德国低干扰谱相当, 而 30 m 以下的不平顺与德国高干扰谱基本一致; 我国三大干线的方向不平顺与美国 5 级谱相当, 高低不平顺在美国 6 级谱和 5 级谱中间。

关键词: 轨道不平顺; 功率谱密度; 数值仿真; 比较

中图分类号: U 213 213 **文献标识码:** A

Comparing track irregularities PSD of Chinese main lines with foreign typical lines by numerical simulation computation

CHEN Guo¹, ZHAI Wanming², ZUO Hong-fu¹

(¹Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

²Train & Track Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, the model of vehicle-track coupling system is applied, and the numerical simulation computation is carried out in order to compare the track irregularities PSD of Chinese main lines with foreign typical lines. The results show that the track irregularities of the Chinese high speed test line correspond with the German high speed low disturbance line during wavelength above 30 m, and correspond with the German high speed high disturbance line during wavelength under 30 m. The track alignment irregularities PSD of the Chinese three main line correspond with the American fifth grade line, and the track vertical profile irregularities PSD of the Chinese three main line are between American sixth grade track and fifth grade track lines.

Keywords: track irregularities; power spectral density (PSD); numerical simulation; comparison

轨道不平顺统计特征的测定, 在国外早已引起重视。目前, 英、日、德、美、俄、印度、捷克等国家都测定了各自的轨道不平顺谱密度。我国也在这方面做了不少研究工作。1982 年铁道部科学研究院罗林等^[1]讨论了各种轨道不平顺的测量方法, 用“惯性基准法”测量了轨道不平顺, 列举了轨道不平顺的样本记录功率谱密度。1985 年长沙铁道学院随机振动研究室^[2]将轨道不平顺分为弹性和几何不平顺, 先后 3 次用地面测试方法对京广线测定了轨道不平顺, 并进行分析处理得到了各种不平顺谱, 统计出我国 I 级干线轨道不平顺功率谱密度的解析表达式。但是, 由于种种条件的限制, 两单位早期研究中获得的轨道谱分辨率精度都不够, 尤其是样本数据太少(长沙铁道学院测取的数据仅数

百米, 铁道部科学研究院测取的数据也只有数十公里), 所以都不能代表我国铁路轨道不平顺的统计特征。

有鉴于此, 90 年代末, 我国铁道部科学研究院对我国轨道不平顺进行了深入细致的研究, 在我国各主要干线约 4 万 km 轨检车检测数据和部分地面测量数据的基础上, 经筛选、分类处理、计算、统计分析, 提出了我国主要干线高低、水平、轨向三种轨道不平顺和部分轨道长波不平顺的功率谱密度, 其中包括重载提速线、准高速线、高速试验线、不同轨道结构以及特大桥梁等各种情况下的轨道不平顺功率谱密度。限于篇幅, 在此不一一列举, 详细情况请参考文献[3]。

本文针对铁道部科学研究院在文献[3]中提出的我国干线轨道不平顺功率谱, 通过仿真计算, 比较在我国干线谱和几种典型的国外轨道谱的激励下, 车辆动

收稿日期: 2000-08-02; 修回日期: 2000-11-13
基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(99J41)
作者简介: 陈 果(1972—), 男, 四川 武胜人, 博士后。

力响应的差别,从而弄清我国干线谱与国外典型轨道谱的差别所在。仿真计算采用先进的车辆-轨道耦合模型,同时考虑车辆和轨道的垂向和横向振动,模型的特点和其求解方法见文献[4],限于篇幅,从略。

1 高速客车动力响应仿真计算

1.1 计算条件的设置

计算选取长春客车厂生产的 250 km/h 高速客车车辆,该车辆在车体和构架之间考虑了抗蛇行减振和

抗侧滚扭杆,车轮踏面为高速车辆磨损型踏面 HLM。轨道条件为 60 kg/m 钢轨普通碎石道床。运行速度为 250 km/h。

要比较我国京广线高速试验段线路与国外运行成熟的高速铁路轨道平顺性,所以选择我国高速试验线轨道谱^[3]、美国 6 级谱^[5]、德国高速低干扰谱^[6]及德国高速高干扰谱^[6]4 种轨道谱(图 1、图 2)来作为激励。仿真计算全部比较结果见表 1,限于篇幅,只给出了仿真计算的轮轨力时域波形。如图 3~ 图 10 所示。

表 1 长春客车厂生产的 250 km/h 高速客车车辆在不同轨道谱激励下的计算结果比较

比较指标	美国 6 级线路谱	德国高速低干扰谱	德国高速高干扰谱	中国高速试验线谱
车体横向加速度/g	0.257	0.078	0.217	0.091
横向平稳性指标	2.829	2.276	2.909	2.300
车体横向加速度主频/Hz	2.871	1.954	2.190	1.581
车体垂向加速度/g	0.117	0.077	0.128	0.070
垂向平稳性指标	2.222	2.098	2.405	2.021
车体垂向加速度主频/Hz	1.307	1.343	1.337	1.349
轮轨横向力/kN	54.26	11.68	29.18	23.25
轮轨横向力主频/Hz	5.444	5.750	5.755	2.960
轮轨垂向力/kN	131.2	106.8	129.8	145.5
轮轨垂向力主频/Hz	63.33	61.92	61.91	60.24
脱轨系数/ $Q \cdot P^{-1}$	0.740	0.245	1.824	0.425
轮重减载率/ $\Delta P \cdot P^{-1}$	1.000	0.964	1.000	1.000

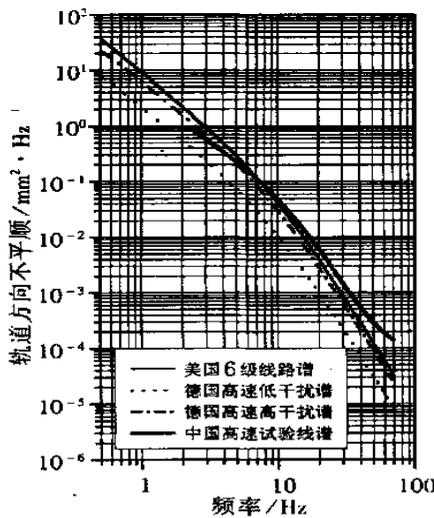


图 1 轨道方向不平顺功率谱密度

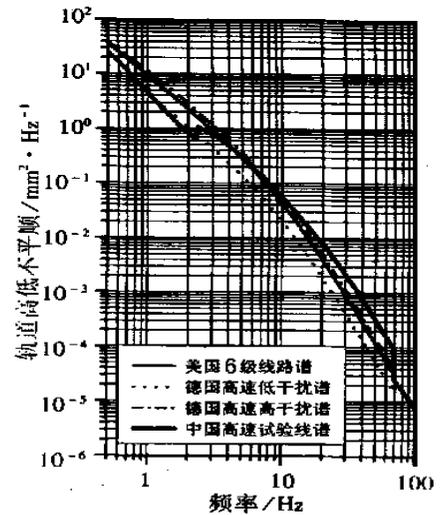


图 2 轨道高低不平顺功率谱密度

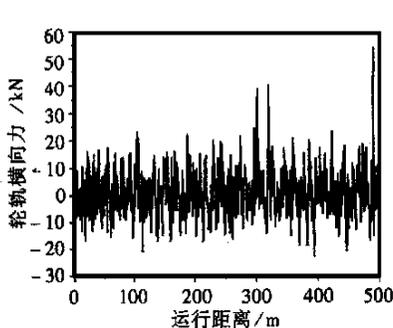


图 3 美国 6 级线路谱激励

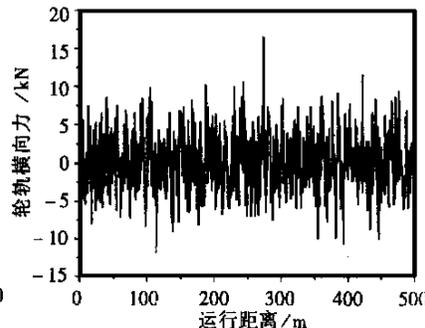


图 4 德国高速低干扰谱激励

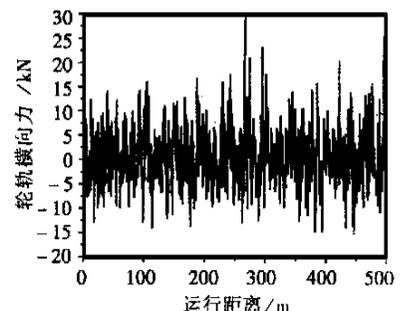


图 5 德国高速高干扰谱激励

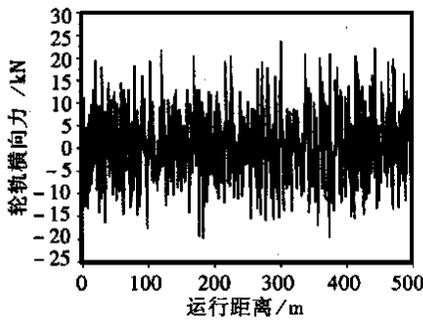


图 6 京广高速试验线路谱激励

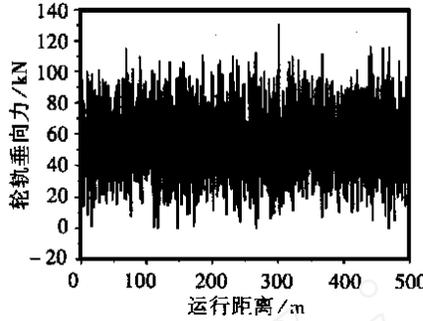


图 7 美国 6 级线路谱激励

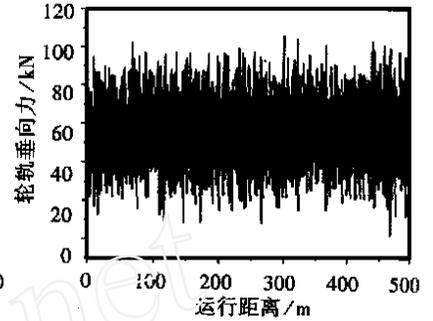


图 8 德国高速低干扰谱激励

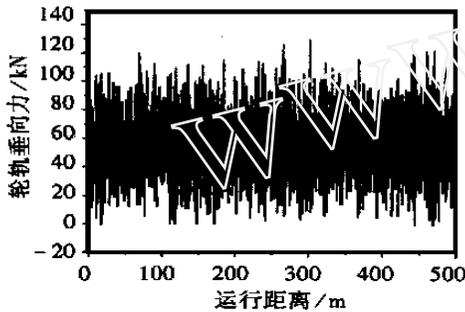


图 9 德国高速高干扰谱激励

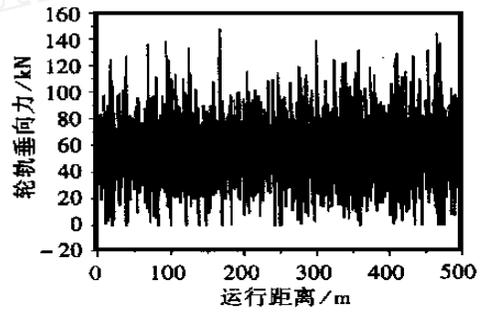


图 10 京广高速试验线路谱激励

1.2 仿真计算结果分析

1.2.1 横向响应结果原因分析

京广高速试验线通过轨检车得到了 1~ 30 m 波长范围的左右钢轨方向不平顺功率谱, 在 $v = 250$ km/h 下, 轨道不平顺表现出的激振频率为 2.3~ 69.4 Hz。而 30 m 以上的长波方向不平顺没有从地面测取其长波特性, 所以从轨道方向不平顺功率谱(见图 1)上可以看到在 0~ 2.3 Hz(波长为 30 m 以上)范围内方向不平顺 PSD 值取值为 0, 在 2.3~ 5 Hz(波长为 14~ 30 m)范围内, 京广高速试验线的轨道方向不平顺 PSD 值较德国低干扰谱大, 但较美国 6 级谱和德国高干扰谱要小; 在 5~ 10 Hz(波长为 7~ 14 m)范围内, 京广高速试验线的轨道方向不平顺 PSD 值与美国 6 级谱相当, 较德国低干扰谱大, 但较德国高干扰谱要小; 在 10 Hz 以上(波长小于 7 m), 京广高速试验线的轨道方向不平顺 PSD 值较美国 6 级谱、德国低干扰谱和德国高干扰谱都要大。

从表 1 可以看到, 车体横向振动加速度功率谱主要集中在 3 Hz 以下, 因此, 在京广高速试验线激励下, 车体所产生的振动响应基本上与德国低干扰谱一致, 车体横向振动加速度很小, 横向平稳性指标为优; 而在美国 6 级谱和德国高干扰谱作用下, 车体横向振动响应基本相当, 且均大于前两者。而轮轨横向作用力的主频在 2 Hz 和 5 Hz 附近, 所以在京广高速试验线的激励下, 轮轨横向力也仅比在德国低干扰谱的激励下

要大, 而比其他两种谱要小。脱轨系数的规律也基本上与轮轨横向力一样。

1.2.2 垂向响应结果原因分析

京广高速试验线通过轨检车得到的 1~ 30 m 波长范围的左右钢轨高低不平顺功率谱, 在 $v = 250$ km/h 下, 轨道不平顺表现出的激振频率为 2.3~ 69.4 Hz。30 m 以上的长波高低不平顺从地面测取了其特性。从图 2 可以看出, 京广高速试验线轨道高低不平顺, 在 2.3 Hz 以下(波长大于 30 m)的频率段, 其 PSD 值与德国低干扰谱基本相当, 而美国 6 级谱和德国高干扰谱基本相当, 且均大于前两者; 在 2.3~ 10 Hz(波长为 7~ 30 m)范围内, 京广高速试验线 PSD 值与美国 6 级谱和德国高干扰谱基本相同; 在 10~ 69.4 Hz(波长为 1~ 7 m)范围内, 京广高速试验线 PSD 值比德国低干扰谱、德国高干扰谱和美国 6 级谱都要大; 在 100 Hz 以上范围(对应于波长 1 m 以下), 轨道高低不平顺 PSD 值均一样。

从表 1 可以看出, 车体垂向振动加速度的主频均在 2 Hz 以下, 从上面的分析看到, 在 2.3 Hz 以下的低频范围, 京广高速试验线与德国低干扰谱 PSD 值相当, 且比美国 6 级谱和德国高干扰谱小。所以在京广高速试验线的激励下, 车体垂向振动加速度很小, 车辆垂向平稳性指标为优。由于轮轨垂向作用力的主频均在 60 Hz 附近的轮轨耦合共振区, 而在该频率范围的轨道谱密度值是京广高速试验线最大的, 所以在它的

激励下所产生的轮轨共振也是最大的。从表 1 和图 7 ~ 图 10 不难看出,在京广高速试验线激励下,所产生的轮轨垂向力最大。由此可见,京广高速试验线对轮轨动力作用是极为不利的。

2 普通货车 C_{62A} 空车动力性能仿真计算

2.1 计算条件的设置

计算选取车辆状态较差的普通货车 C_{62A} 空车,车轮踏面为普通磨损型踏面 LM。轨道条件为 60 kg/m 钢轨,普通碎石道床。运行速度分别为 80 km/h 和 70 km/h。

选择我国三大干线轨道谱^[3]、美国 6 级谱^[5]和美国 5 级谱^[5]三种轨道谱(图 11、图 12)来作为激励,从而比较我国京哈、京广、京沪三大重载提速干线与美国

5 级和 6 级线路的轨道平顺性。仿真计算比较结果如表 2 所示,限于篇幅,只给出了仿真计算的轮轨力时域波形,如图 13~ 图 24 所示。

2.2 仿真计算结果分析

2.2.1 横向响应结果原因分析

京广、京哈、京沪三大干线通过轨检车检测只能得到 1~ 30 m 波长范围的左右钢轨方向不平顺功率谱,在 $v = 80 \text{ km/h}$ 下,轨道不平顺表现出的激振频率为 0.74~ 22.2 Hz。从轨道方向不平顺功率谱(见图 11)上可以看到,在 0.74~ 3 Hz(波长为 7.4~ 30 m)范围内,三大干线的方向不平顺 PSD 值与美国 5 级谱基本相等,而比美国 6 级谱要大;在 3~ 22.2 Hz(波长为 1~ 7.4 m)范围内,三大干线的方向不平顺 PSD 值比美国 5 级谱和美国 6 级谱都要大。

表 2 空车 C_{62A} 在不同轨道谱激励下的计算结果比较

轨道谱类型	美国 6 级线路谱		美国 5 级线路谱		中国三大干线谱	
运行速度/km · h ⁻¹	80	70	80	70	80	70
车体横向加速度/g	1.090	0.155	1.283	1.108	1.028	0.974
横向平稳性指标	4.198	2.466	4.652	4.294	4.607	4.095
车体横向加速度主频/Hz	2.312	1.393	2.221	2.126	2.651	2.221
车体垂向加速度/g	0.535	0.223	1.463	0.779	0.478	0.727
垂向平稳性指标	3.000	2.313	4.409	3.635	3.316	3.052
车体垂向加速度主频/Hz	6.809	7.961	5.336	6.720	5.306	6.534
轮轨横向力/kN	83.93	14.57	82.91	72.54	62.00	59.23
轮轨横向力主频/Hz	2.312	4.121	2.227	2.126	2.624	2.221
轮轨垂向力/kN	81.52	58.39	126.4	94.70	98.77	84.75
轮轨垂向力主频/Hz	2.312	1.151	2.221	2.126	2.594	2.221
脱轨系数/Q · P ⁻¹	2.759	0.381	2.788	2.755	2.745	2.775
轮重减载率/ΔP · P ⁻¹	1.000	0.686	1.000	1.000	1.000	1.000

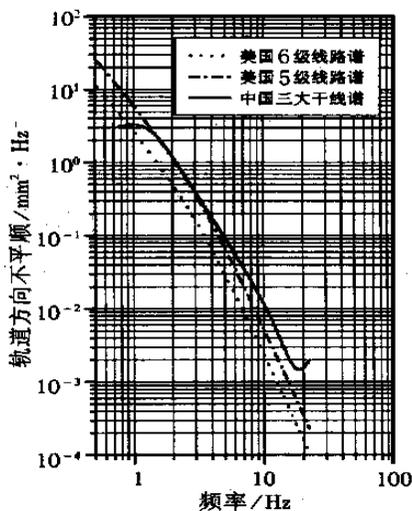


图 11 轨道方向不平顺功率谱密度

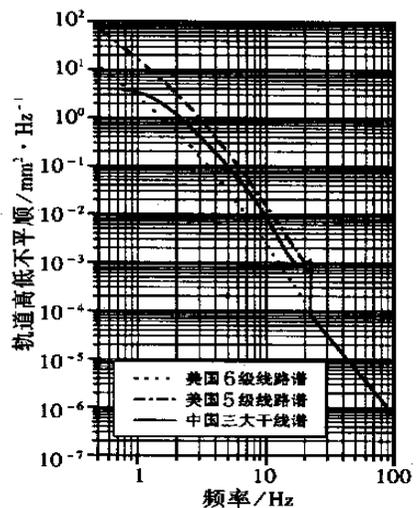


图 12 轨道高低不平顺功率谱密度

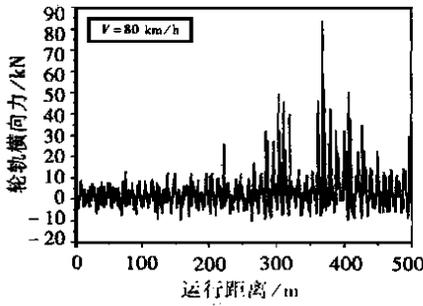


图 13 美国 6 级线路谱扰动

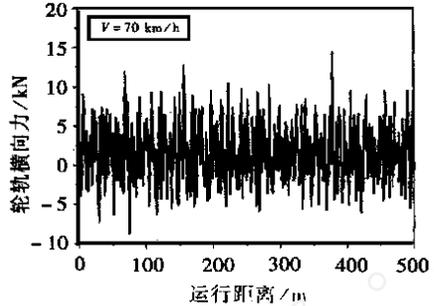


图 14 美国 6 级线路谱扰动

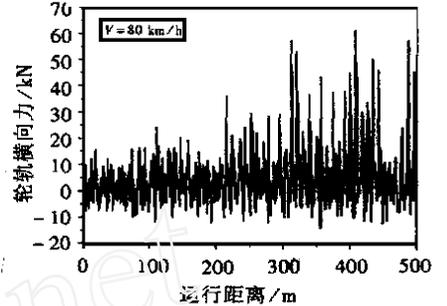


图 15 中国三大干线谱扰动

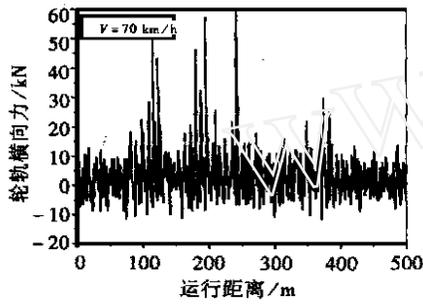


图 16 中国三大干线谱扰动

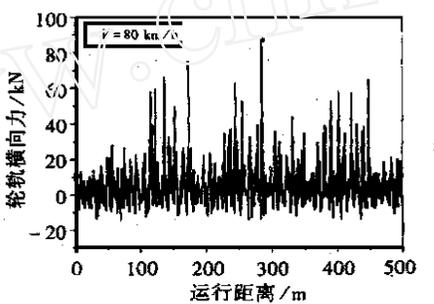


图 17 美国 5 级线路谱扰动

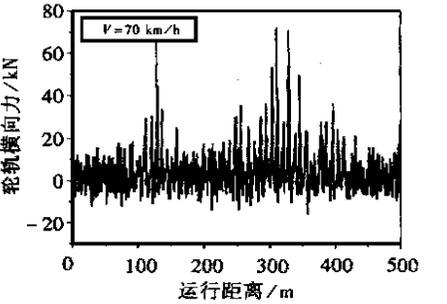


图 18 美国 5 级线路谱扰动

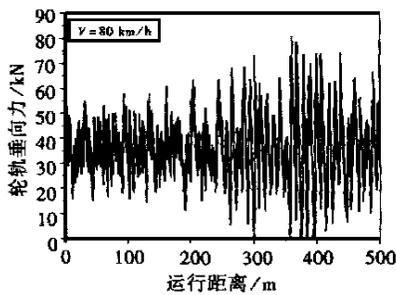


图 19 美国 6 级线路谱扰动

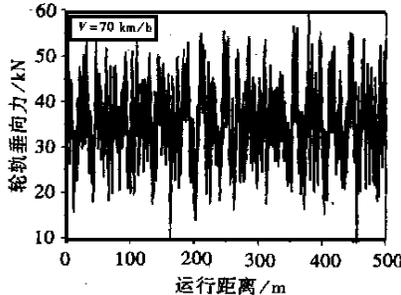


图 20 美国 6 级线路谱扰动

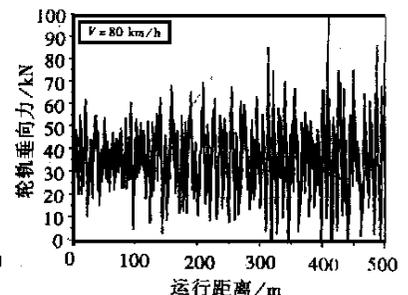


图 21 中国三大干线谱扰动

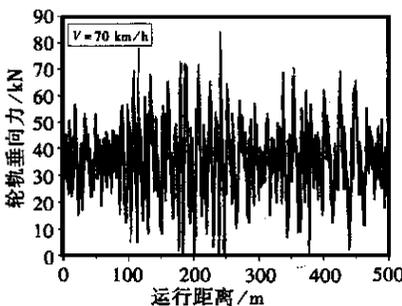


图 22 中国三大干线谱扰动

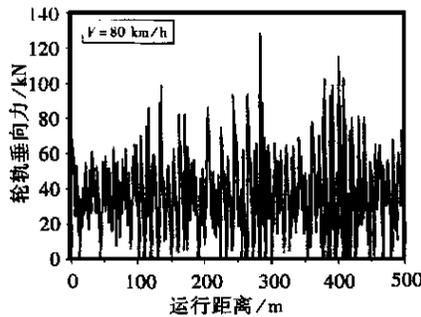


图 23 美国 5 级线路谱扰动

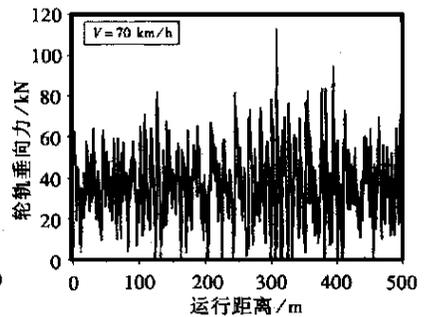


图 24 美国 5 级线路谱扰动

从车体横向振动加速度和轮轨横向力功率谱可以看到,在出现强烈蛇行运动时,车体横向振动加速度和轮轨横向力的主频均为 2~2.5 Hz 的蛇行运动频率,当蛇行运动一旦消失(当在美国 6 级谱扰动下,运行速度为 70 km/h 时),轮轨横向力的主频变为 4.121 Hz,

车体横向振动加速度主频变为 1.393 Hz。当在美国 5 级谱和中国三大干线谱的扰动下,运行速度为 80 km/h 和 70 km/h 时,车辆均产生了强烈的蛇行运动。因此,从这个意义上说,在中国三大干线谱的扰动下,车辆所产生的横向振动响应基本上与美国 5 级谱

相当, 而比美国 6 级谱要大得多。脱轨系数的规律也基本上与轮轨横向力一样。

2.2.2 垂向响应结果原因分析

京广、京哈、京沪三大干线谱通过轨检车检测只能得到 1~30 m 波长范围的左右钢轨高低不平顺功率谱, 在 $v = 80 \text{ km/h}$ 下, 轨道不平顺表现出的激振频率为 0.74~22.2 Hz。从图 12 可以看出, 中国三大干线轨道高低不平顺谱, 在 1 Hz 以下(波长大于 22.2 m)的频率段, 其 PSD 值与美国 6 级谱基本相当, 比美国 5 级谱明显要小; 在 1~22.2 Hz(波长为 1~22.2 m)范围内, 中国三大干线 PSD 值比美国 5 级谱要小, 而比美国 6 级谱要大, 正好位于二者中间; 在 22.2 Hz 以上范围(对应于波长 1 m 以下), 轨道高低不平顺 PSD 值均一样。

从车体垂向振动加速度和轮轨垂向力功率谱可以看出, 其主频均在 1~5 Hz, 从上面的分析看到了在 1~22.2 Hz 频率范围内, 中国三大干线谱的 PSD 值正好位于美国 6 级谱和美国 5 级谱中间, 所以在三大干线谱的扰动下, 所产生的车体垂向加速度和轮轨垂向力也均比美国 6 级谱大, 而比美国 5 级谱小。

3 结论

(1) 美国 6 级线路谱和德国高速高干扰谱显然不能进行 250 km/h 的高速运行, 德国高速高干扰谱略比美国 6 级线路谱好。

(2) 我国高速试验线谱在 30 m 以上的长波高低不平顺性很好, 基本与德国高速低干扰谱接近, 7~30 m 的方向和高低不平顺范围内, 基本上与德国高速高干扰谱一致, 而在 1~7 m 范围内的方向和高低不平顺, 尚不如德国高速高干扰谱, 离德国高速低干扰谱还差得很远。

(3) 中国三大干线谱的方向不平顺在 7~30 m 的波长范围基本上与美国 5 级线路谱相当, 在 1~7 m 的波长范围还不如美国 5 级谱好, 在整个频率范围均

比美国 6 级线路谱明显要差。

(4) 中国三大干线谱高低不平顺在整个波长范围基本上都处在美国 5 级线路谱和美国 6 级线路谱中间, 即比美国 5 级谱要好, 比美国 6 级谱要差。

(5) 建议我国高速试验线进一步加强 30 m 波长以下的平顺性, 尤其是对影响轮轨垂向动作用力的短波平顺性应该特别重视, 争取与德国高速低干扰谱接近。

(6) 建议进一步得到我国高速试验线的方向长波不平顺, 并对现有的轨道检查车进行改进, 拓宽其检测的轨道不平顺波长范围。从而为仿真计算和滚动振动台实验提供更加可靠的激扰数据, 以便更加准确地预测高速车辆动力性能。

(7) 建议我国在实行三大干线全面提速的情况下, 应该进一步提高轨道的平顺性, 努力使干线谱达到美国 6 级线路谱的水平, 从而进一步提高车辆运行平稳性和减少货物车辆脱轨事故的发生。

参考文献

- [1] 罗林 轨道随机干扰函数[J]. 中国铁道科学, 1982, 13(1): 74—110
- [2] 原长沙铁道学院随机振动研究室 关于机车车辆/轨道系统随机激励函数的研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1985, (2): 1—36
- [3] 铁道科学研究院 我国干线轨道不平顺功率谱的研究系列报告(1~10)[R]. 北京: 铁道科学研究院, 1999
- [4] 陈果 车辆-轨道耦合系统随机振动分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2000, 47—97.
- [5] 王福天 车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994, 19—23
- [6] 铁道部科学技术司, 西南交通大学 德国联邦铁路城间特快列车 ICE 技术任务书[Z]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993: 301—309

(责任编辑 张武美)