

我国干线轨道谱理论分析及试验研究*

林建辉 陈建政 高燕 苏燕辰

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 运用车辆、轨道耦合大系统思想, 将轨道高低、水平、方向和轨距四种不平顺视为平稳的各态历经随机过程, 进行了车辆、轨道系统的动力学分析, 仿真计算了 250 km/h 速度的高速铁路轨道不平顺管理的安全目标值。

同时利用线路试验和滚动振动台试验探讨我国干线轨道谱与国外典型轨道谱的区别与联系。

关键词: 轨道谱 随机振动 动力学仿真 试验研究

中图分类号: U270.1 U211

0 前言

由于存在轨道不平顺, 运行中的机车车辆将产生振动, 根据车辆—轨道耦合动力学原理, 机车车辆的振动又反过来作用于轨道, 从而引起轨道系统的振动。这样, 由于轮轨界面所存在的轨道不平顺, 将导致了车辆、轨道系统的耦合振动。所以, 轨道不平顺是车辆—轨道系统的激励源, 只有正确分析和研究轨道不平顺, 才有可能正确地分析机车车辆—轨道系统的振动, 才能合理设计机车车辆与轨道的结构, 从而使设计的系统具有可靠的安全度和最佳的运用性能。

随着机车车辆动力学研究的发展, 采用计算机动态仿真计算和滚动振动试验台实车模拟试验来研究机车车辆的动态特性已越来越广泛, 而且技术上已比较成熟。机车车辆动力学计算软件 NUCARS、MEDYNA、SIMPACT、ADAMS 等著名软件被广泛应用于机车车辆的开发。在德国, 滚动振动试验台试验已成为德国联邦铁路所指定的新研制机车车辆必试项目。他们的成功一方面归功于计算机软件或试验台的先进性, 同时也归功于他们有完善的轨道谱。在我国由于所测得的轨道谱还不能直接应用到机车车辆动力学计算和试验台试验中, 试验和计算时只能采用美国和德国轨道谱, 这就使计算机计算和试验台试验的结果缺乏可信度, 是无奈之举。所以, 研究轨道谱在机车车辆动力学研究的应用条件, 对机车车辆动力学研究、线路动力学研究及列车牵引动力性能等研究来说是十分重要的。

1 轨道不平顺的数值模拟

目前国内外最常用的轨道不平顺数值模拟方法主要有二次滤波法^[1]、三角级数法^[2]和白噪声滤波法^[3]等。它们计算速度较慢, 得到的不平顺样本有一定的误差。鉴于此, 构造了基于频域功率谱等效的一种新算法, 该方法克服了以上一些算法的不足。这种方法的基本思路是根据功率谱分别求出频谱的幅值和随机相位, 然后再通过傅里叶逆变换(IFFT)得到轨道不平顺的时域模拟样本。

设时间序列 $\{x_s\}$, $s=0, 1, \dots, N-1$; 记录长度 $T=N\Delta$, Δ 为时间间隔; 相关函数的时延 $\tau=r\Delta$ 也为离散值, 则

$$R_r = R_{xx}(\tau = r\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{s=0}^{N-1} x_s x_{s+r} \quad (1)$$

$$r=0, 1, \dots, N-1$$

则由 $S_{xx}(f) \Leftrightarrow R_{xx}(\tau)$ 可得

$$S_{xx}(k) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{s=0}^{N-1} x_s \exp \left[i \left(k \frac{2\pi}{N} \right) s \right] \right\} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j \exp \left[-i \left(k \frac{2\pi}{N} \right) j \right] \right\} =$$

$$\frac{1}{N^2} |\text{DFT}[x_s]|^2 = \frac{1}{N^2} [X^*(k)X(k)] \quad (2)$$

式中 $X(k)$ ——时间序列 $\{x_s\}$, $s=0, 1, \dots, N-1$ 的频谱, $k=0, 1, \dots, N-1$

$X^*(k)$ —— $X(k)$ 的伴随矩阵

由式(2)可看出功率谱密度值在离散的采样点上与信号的频谱有一个确定的关系。如果能够在功率谱密度函数上离散采样, 构造出频谱 $X(k)$, 就可对其进行傅里叶逆变换(IFFT), 从而得到时域的轨道不平顺 $x(t)$, 其实施步骤如下。

(1) 铁路轨道不平顺功率谱密度函数均为单边谱, 所以首先要将其转化为双边谱 $S_x(f)$ 。设轨道不平顺的最短波长为 λ_{\min} , 最长波长为 λ_{\max} 。车辆运行的最大速度为 v_{\max} , 则最高时间频率为 $f_{\max}=v/\lambda_{\min}$,

* 铁道部科技研究开发计划资助项目(99J41)。20020320 收到初稿, 20030723 收到修改稿

最低时间频率为 $f_{\min} = v/\lambda_{\max}$ 。由于机车车辆的自振频率一般在 1 Hz 左右，所以应确保 $f_{\min} < 1$ Hz。则由采样定理，采样周期 $\Delta \leq 1/2f_{\max}$ 。设模拟的总时间为 T_s ，则时域采样点数为 T_s/Δ ，一般须在末尾添 0 以保证为 2 的整数次幂 N_r 。众所周知，由周期图法估计出的功率谱具有周期性，且为偶对称序列。设有效频率段内的采样点数为 $N_f = (f_{\max} - f_{\min})/\Delta f$ ，其中 $\Delta f = 1/(N_r \Delta)$ ，又设 $N_0 = f_{\min}/\Delta f$ ，则 $0 \sim (N_0 - 1)$ 和 $N_f \sim N_r/2$ 的采样点值记为零。于是得到功率谱 $S_x(f)$ 的 $N_r/2$ 个离散采样点值 $S_x(f = k\Delta f)$ ， $k = 0, 1, \dots, N_r/2$ 。最后再以此形成以 $N_r/2$ 为对称中心的偶对称序列 $S_x(f = k\Delta f)$ ， $k = 0, 1, \dots, N_r - 1$ 。

(2) 由式(2)可知，时域序列的频谱模值为

$$\begin{aligned} |X(k)| &= |\text{DFT}[x(n)]| = \sqrt{N_r \times S_k(k)} = \\ N_r \sqrt{S_k(k)} &= N_r \sqrt{S_x(f = k\Delta f) \Delta f} \end{aligned} \quad (3)$$

$$k = 0, 1, \dots, N_r - 1$$

(3) 式(3)给定了序列 $x(n)$ 的频谱 $x(k)$ 的模值。由于时间序列 $x(n)$ 为一随机过程，其频谱相位一定具有随机性。

设 ξ_n 为独立相位序列，它的各分量均值为零。又由于实序列的 FFT 为复序列(实部偶对称，虚部奇对称)，所以 ξ_n 应为复数，且有 $|\xi_n| = 1$ ，故设

$$\xi_n = \cos \phi_n + i \sin \phi_n = \exp(i\phi_n)$$

式中， ϕ_n 服从 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布。

又因为 $X(k)$ 的实部关于 $N_r/2$ 偶对称，虚部关于 $N_r/2$ 奇对称，所以只须求出频谱 $X(k)$ ， $k = 0, 1, \dots, N_r/2$ ，由式(3)可得

$$X(k) = \xi_k |X(k)| = N_r \xi_k \sqrt{S_n(f = k\Delta f) \Delta f} \quad (4)$$

$$k = 0, 1, \dots, N_r/2$$

显然由对称条件容易得到 $X(k)$ ， $k = 0, 1, \dots, N_r - 1$ 。

(4) 将得到的复序列 $X(k)$ 进行傅里叶逆变换 (IFFT)，即可得轨道不平顺时域模拟样本。

$$x(n) = \frac{1}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} X(k) \exp\left[\frac{i2\pi kn}{N_r}\right] \quad (5)$$

$$n = 0, 1, \dots, N_r - 1$$

该方法的模拟精度比三角级数法要高，计算表明，该方法的计算速度远比三角级数法要快。

2 仿真计算

本计算将选择我国高速试验线轨道谱、美国六级谱、德国高速低干扰谱及德国高速高干扰谱四种轨道谱来作为激励。

2.1 我国高速试验线谱

我国建成的高速试验线钢轨结构均采用 60 kg/m

跨区间无缝线路，在参考文献[4]中，铁道科学研究院对此类钢轨结构的线路进行了详细测量，通过数据拟合，得到了能反映我国 60 kg/m 跨区间无缝线路特征的轨道不平顺功率谱密度，见式(6)与表 1

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (6)$$

表 1 60 kg/m 钢轨超长无缝线路功率谱拟合曲线参数

	A	B	C	D	E	F	G
左高低	0.127	-153	1.550	4.983	1.389	-0.032	0.001
右高低	0.332	-1.375	0.549	2.490	0.405	0.085	-0.001
左轨向	0.062	-1.184	0.677	2.123	-0.084	0.034	0
右轨向	0.159	-1.385	0.667	2.333	0.256	0.092	0
水平	0.332	-1.351	0.541	1.843	0.381	0.206	0

由于我国 GJ-3 型和 XGJ-1 型轨道检查车的可测波长范围为 0.1~30 m，尚不能对轨道长波长不平顺进行测量。所以参考文献[3]采用人工测量的方法，对我国高速试验线的高低不平顺进行了测量，获取了 30 m 以上波长的轨道高低不平顺的功率谱密度，其拟合表达式如式(7)

$$G(\lambda) = 6248.849 \exp[(-7.28135)(-0.01275)\lambda] \quad (7)$$

$$20 \text{ m} \leq \lambda \leq 200 \text{ m}$$

式中 $G(\lambda)$ ——轨道高低不平顺功率谱密度， mm^2/m

λ ——轨道高低不平顺波长，m

2.2 美国六级线路谱

美国联邦铁路管理局 FRA 根据大量实测资料得到线路不平顺功率谱密度，拟合成一个以截断频率和粗糙度常数表示的偶次函数^[5]。其波长范围可达 1.524~304.8 m，轨道级别分为六级。在本仿真计算中选取第六级轨道谱来进行高速客车运行激励。轨道不平顺功率谱的表达式为

轨道高低不平顺

$$S_v(\omega) = \frac{kA_v \omega_c^2}{\omega^2(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad \text{cm}^2/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (8)$$

轨道方向不平顺

$$S_a(\omega) = \frac{kA_a \omega_c^2}{\omega^2(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad \text{cm}^2/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (9)$$

轨道水平及轨距不平顺

$$S_v(\omega) = \frac{4kA_v \omega_c^2}{(\omega^2 + \omega_c^2)(\omega^2 + \omega_s^2)} \quad \text{cm}^2/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (10)$$

式中 $S(\omega)$ ——功率谱密度

ω ——空间频率

A_v, A_a ——高低和方向不平顺粗糙度常数

ω_c ——高低和方向不平顺空间截断频率

ω_s ——水平及轨距不平顺空间截断频率

k ——系数，一般取为 0.25

所有轨道级别的粗糙度参数及截断频率如表 2 所示。

表 2 典型轨道几何不平顺的参数

参 数	各级轨道的参数值					
	6	5	4	3	2	1
高低不平顺粗糙度 常数 $A_v/(cm^2 \cdot rad^{-1} \cdot m^{-1})$	0.033	0.209	0.537	0.681	1.018	1.210
方向不平顺粗糙度 常数 $A_d/(cm^2 \cdot rad^{-1} \cdot m^{-1})$	0.033	0.076	0.302	0.412	1.210	3.363
水平及轨距不平顺 空间截断频率 $\omega_s/(rad \cdot m^{-1})$	0.438	0.820	1.131	0.852	0.930	0.604
高低和方向不平顺 空间截断频率 $\omega_r/(rad \cdot m^{-1})$	0.824	0.824	0.824	0.824	0.824	0.824
最高运行速度 $v_{max}/(km \cdot h^{-1})$	176	128	96	64	40	16

2.3 德国高速谱

德国高速低干扰谱和高干扰谱具有相同的表达式，其功率谱的表达式为：

方向不平顺

$$S_a(\omega) = \frac{A_d \omega_c^2}{(\omega^2 + \omega_r^2)(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad m^2/(rad \cdot m^{-1}) \quad (11)$$

高低不平顺

$$S_v(\omega) = \frac{A_v \omega_c^2}{(\omega^2 + \omega_r^2)(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad m^2/(rad \cdot m^{-1}) \quad (12)$$

水平不平顺

$$S_c(\omega) = \frac{A_v / b^2 \omega_c^2 \omega^2}{(\omega^2 + \omega_r^2)(\omega^2 + \omega_c^2)(\omega^2 + \omega_s^2)} \quad m^2/(rad \cdot m^{-1}) \quad (13)$$

轨距不平顺

$$S_g(\omega) = \frac{A_g \omega_c^2 \omega^2}{(\omega^2 + \omega_r^2)(\omega^2 + \omega_c^2)(\omega^2 + \omega_s^2)} \quad m^2/(rad \cdot m^{-1}) \quad (14)$$

粗糙度系数和截断频率如表 3，其中 A_g 为随意给定的值，但必须保证轨距不平顺在 $-3 \sim 3$ mm 内变化。

表 3 轨道不平顺功率谱粗糙度系数及截断频率

轨道级别	$\omega_r/(rad \cdot m^{-1})$	$\omega_R/(rad \cdot m^{-1})$	$\omega_s/(rad \cdot m^{-1})$
低干扰	0.824	0.020	0.438
高干扰	0.824	0.020	0.438
轨道级别	$A_N/(10^{-7} m \cdot rad)$	$A_R/(10^{-7} m \cdot rad)$	$A_V/(10^{-7} m \cdot rad)$
低干扰	2.119	4.032	0.532
高干扰	6.125	10.80	1.032

2.4 仿真计算结果分析

仿真计算以某厂生产的 250 km/h 高速客车车辆在 250 km/h 高速客车站辆在不同轨道谱激励下的动力学响应为依据，如表 4 所示。

表 4 某厂生产的 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 六级线 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 $A_H/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$	0.257	0.078	0.217	0.091
横向平稳性指标 W_H	2.829	2.276	2.909	2.300
车体横向加速度主频 f_H/Hz	2.871	1.954	2.190	1.581
车体垂向加速度 $A_C/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$	0.117	0.077	0.128	0.070
垂向平稳性指标 W_C	2.222	2.098	2.405	2.021
车体垂向加速度主频 f_C/Hz	1.307	1.343	1.337	1.349
轮轨横向力 F_l/kN	54.26	11.68	29.18	23.25
轮轨横向力主频 f_l/Hz	5.444	5.750	5.755	2.960
轮轨垂向力 F_n/kN	131.2	106.8	129.8	145.5
轮轨垂向力主频 f_n/Hz	63.33	61.92	61.91	60.24
脱轨系数 $Q \cdot F_n^{-1}$	0.740	0.245	1.824	0.425
轮重减载率 $\Delta F_n \cdot F_n^{-1}$	1.000	0.964	1.000	1.000

从表 4 计算结果，可知：

(1) 车体加速度响应。

从车体振动加速度和车辆运行平稳性指标可以看出，在京广高速试验线轨道谱激励下，车体所产生的响应与德国高速低干扰谱基本一致，而在美国六级谱和德国高速高干扰谱的作用下，车体振动加速度响应明显要高得多，车辆运行平稳性也要差些。在不同的轨道谱激励下，车体横向和垂向振动加速度主频基本上在 1~3 Hz 之间。图中 11~13 Hz 之间的频率成分是车体被轨道谱激励下的构架共振频率，如图所示。

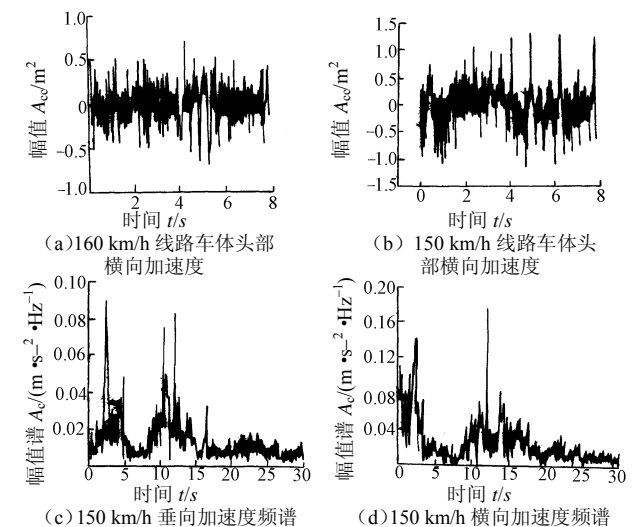


图 车体横向和垂向振动加速度响应及频谱图

(2) 轮轨动作用力。

在美国六级谱的作用下,轮轨横向力最大,其最大值为 54.26 kN,而在德国低干扰谱作用下轮轨横向力最小,仅为 11.68 kN,在德国高干扰谱作用下轮轨横向力为 29.18 kN,在我国高速试验线谱作用下轮轨横向力为 23.25 kN。在不同轨道谱作用下,轮轨力的功率谱密度的频率结构存在一定的差别,但主要分布在 2 Hz 和 5 Hz 附近。美国六级谱激励下,轮轨横向力在 5 Hz 附近最大,德国高干扰谱次之,京广高速试验线路再次之,德国低干扰谱最小;但在 2 Hz 附近的横向力则是京广高速试验线谱最大,德国高速高干扰谱次之,美国六级谱再次之,而德国低干扰谱最小。由此可见,在德国低干扰谱作用下,所产生的轮轨横向动作用力是最小的。

在京广高速试验线谱作用下,轮轨垂向动作用力最大,其最大值为 145.5 kN,而最小值为 0 kN,即轮载减至零。轮轨垂向力的主频均在 60 Hz 附近,该频率段正好为轮轨耦合共振频率段。在四种不平顺作用下,京广高速试验线的激励所产生的轮轨共振最为强烈,其垂向力在该共振频率处 PSD 值最大,德国高干扰谱次之,美国六级谱再次之,而德国高速低干扰谱最小。所以从轮轨垂向相互作用来看,京广高速试验线路最差,而德国高速低干扰线路最好。

(3) 脱轨系数和轮重减载率。

在德国高干扰谱作用下,脱轨系数最大,其最大值为 1.824,在美国六级谱作用下为 0.740,在京广高速试验线谱作用下为 0.425,而在德国高速低干扰谱作用下则仅为 0.245。轮重减载率除了在德国低干扰谱作用下未达到最大值 1.0(轮轨瞬时脱离),在其余三种轨道谱的作用下,均达到了最大值 1.0。这说明在德国低干扰谱作用下,无论是对脱轨系数还是轮重减载率,都是最小的。需要说明的是,在我国标准 GB5599-1985 中规定了轮重减载率不得大于 0.6,这是指由曲线超高、货物偏载等引起的比较平缓的轮重减载率变化,而由轨面短波不平顺等引起的瞬时轮重减载可以达到很大的值,即动态轮重减载率可以远远大于 0.6。所以,即使在德国低干扰谱的作用下,轮重减载率最大值也达到了 0.964,但车辆仍运行正常。

(4) 横向响应结果原因分析。

从车体横向振动加速度功率谱分析可知,车体横向振动加速度主要集中在 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。而在美国六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。

从轮轨横向力功率谱分析可知,轮轨横向动作用力的主频在 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。

(5) 垂向响应结果原因分析。

从车体垂向振动加速度功率谱分析可知,其主频均在 2 Hz 以下,从上面的分析看到了在 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,且均比美国六级谱和德国高干扰谱小。所以在京广高速试验的激励下,车体垂向振动加速度很小,车辆横向平稳性指标为优。

由于轮轨垂向动作用力的主频均在 60 Hz 附近的轮轨耦合共振区,在该频率范围的轨道谱密度值是京广高速试验线最大,所以在它的激励下所产生的轮轨共振也是最大的。由此可见,京广高速试验线对轮轨动力作用是极为不利的,要进一步降低轮轨动力作用,就必须增强该共振频率范围内的轨道平顺性。

3 试验台试验结果分析

为了比较不同轨道谱对车辆的动力特性的影响,进行了大量整车试验,以下各表以 150 km/h 速度级为代表进行分析。

3.1 平稳性指标分析

各种不同轨道谱在 150 km/h 运行时的车体和司机室平稳性指标如表 5 所示。

表 5 各种激振谱在不同速度下的车体的平稳性指标

速度	司机室平稳性指标 W_s		车体平稳性指标 W_{CT}	
	垂向	横向	垂向	横向
干线提速谱	2.323	2.584	2.300	2.470
美国 3 级谱	2.544	2.815	2.586	2.645
美国 5 级谱	2.281	2.515	2.348	2.334
德国高干扰谱	2.182	2.552	2.212	2.385
德国低干扰谱	1.976	1.902	1.928	1.810

从车体和司机室平稳性指标大小来看,在 150 km/h 时我国提速重载干线轨道谱介于美国三级和五级轨道谱之间。

3.2 主要部件平均最大加速度分析

各种不同轨道谱在 150 km/h 运行时的主要部件平均最大加速度如表 6 所示。

从 150 km/h 中主要部件平均最大加速度大小来看,对于横向最大加速度值,我国的提速重载干线轨道谱比美国三级谱略大;对于垂向最大加速度

值,我国提速重载干线轨道谱介于美国三级和五级轨道谱之间。

表 6 150 km/h 各主要部件平均最大加速度

	司机室		车 体	
	$A_g/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$		$A_{CT}/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$	
	横向	垂向	横向	垂向
干线提速谱	0.155	0.144	0.113	0.120
美国 3 级谱	0.145	0.162	0.113	0.139
美国 5 级谱	0.110	0.110	0.085	0.114
德国高干扰谱	0.133	0.108	0.094	0.112
德国低干扰谱	0.063	0.086	0.044	0.072
	构 架		轴 箱	
	$A_G/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$		$A_z/(10 \cdot m \cdot s^{-2})$	
	横向	垂向	横向	垂向
干线提速谱	0.981	0.367	0.519	0.272
美国 3 级谱	0.720	0.305	0.471	0.344
美国 5 级谱	0.644	0.252	0.422	0.237
德国高干扰谱	0.623	0.287	0.448	0.241
德国低干扰谱	0.436	0.297	0.398	0.183

4 结 论

运用车辆—轨道耦合系统的思想,将轨道高低、水平和轨向不平顺视平稳的各态历经高斯过程,仿真计算车辆的动力学响应,同时比较了我国干线轨道谱与国外轨道谱的差别,从而得出以下一些重要结论。

(1) 美国六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六级线路谱好。

(2) 我国高速试验线谱在 30 m 以上的长波高低不平顺的平顺性很好,基本与德国高速低干扰谱接近,在 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) 建议我国高速试验线进一步加强 30 m 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。

参 考 文 献

- 1 Ontes R K, Enochson L. Digital Time Series Analysis. NewYork: John Wiley & Sons Inc., 1972
- 2 星谷胜[日]. 随机振动分析. 北京: 地震出版社, 1977
- 3 段治勇. 机车车辆主动悬挂初步研究: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 1997
- 4 铁道科学研究院. 我国干线轨道不平顺功率谱的研究报告(1~10). 北京, 1999
- 5 王福天. 车辆系统动力学. 北京: 中国铁道出版社, 1994

THEORY ANALYSIS AND TEST RESEARCH OF CHINESE MAIN TRACK IRREGULARITIES PSD

Lin Jianhui Chen Jianzheng Gao Yan Su Yanchen
(Southwest Jiaotong University)

Abstract: On the basis of the coupling thought of vehicle and track is applied, the track vertical profile, cross-level, alignment and gage irregularities are regarded as stationary ergodic Gaussian random processes. The vertical and lateral random vibration of vehicle and track is analyzed; the safe manage limits of high speed railroad track irregularities in the 250 km/h velocity field are calculated; at the same time, the difference and relation of Chinese main track irregularities PSD and overseas typical track irregularities PSD are discussed.

Key words: Orbit spectrum Random vibration

Dynamics emulation Experiment study

作者简介: 林建辉, 男, 1964 年出生, 教授, 博士。铁道部有突出贡献的中青年专家。主要从事检测技术、故障诊断及自动控制领域的应用研究与教学工作。作为主持及主研人员参与 20 余项国家级科研项目的研究, 获国家科技进步一等奖, 发表论文 30 余篇。