Delft University of Technology

轨道不平顺概率模型

Xu, Lei; Zhai, Wan Ming

Publication date
2018

Document Version
Final published version

Published in
Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao/Journal of Traffic and Transportation Engineering

Citation (APA)
Xu, L., & Zhai, W. M. (2018). 轨道不平顺概率模型. *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao/Journal of Traffic and Transportation Engineering*, *18*(3), 56-63.

Important note
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.

第 18 卷 第 3 期
2018 年 6 月

交 通 运 输 工 程 学 报
Journal of Traffic and Transportation Engineering

Vol. 18 No. 3
June 2018

文章编号:1671-1637(2018)03-0056-08

轨道不平顺概率模型

徐 磊[1,2],翟婉明[1]

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;
2. 代尔夫特理工大学 道路与铁道工程系,南荷兰 代尔夫特 2628)

摘 要:为了高效选取轨道不平顺随机样本,以满足车辆-轨道系统随机动力与可靠度分析中的激振源遍历性要求,依据轨道随机不平顺的弱平稳与谱相似特征,提出了一种轨道不平顺概率模型;采用离散概率积分和统计方法,在时域中将大量轨道不平顺检测信号分成若干个时程序列,对每个序列采用谱分析法计算其统计功率谱密度分布;采用矩阵法对轨道不平顺功率谱密度函数进行集合表征,视每条谱线在不同频率点的功率谱密度概率具有累加性,采用单一频率下的功率谱密度概率分布推知整条谱线的出现概率;采用通用随机模拟方法选取代表性轨道谱,并反演随机不平顺序列;实测了某高速铁路约 269 km 的轨道高低和方向不平顺,基于车辆-轨道耦合动力学理论,从轨道不平顺模拟幅值与车辆-轨道系统动力响应的概率密度分布出发,对比了轨道不平顺概率模型与轨道不平顺随机模型的计算结果,以验证轨道不平顺概率模型的正确性和高效性。计算结果表明:以 2 种模型生成的轨道随机不平顺为激振源,获得的车辆-轨道系统动力响应分布熵差异小于 2%,2 种模型均能准确表达不平顺激扰特性;为保证模拟与实测不平顺的概率密度分布一致,采用随机模型和概率模型分别需要生成 131 和 33 个随机样本,概率模型具有更高的分析效率;在给定计算工况下,轮轨力和车体加速度的幅值分别为 38～152 kN 和 −0.042g～0.043g(g 为重力加速度),均未超过《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)中的限值(轮轨力为 170 kN,车体加速度为 0.25g),表明此高速铁路轨道不平顺状态较优,行车安全性和舒适性可以得到保证。

关键词:铁道工程;轨道不平顺;概率模型;随机振动;车辆-轨道耦合动力学;随机模型

中图分类号:U213.213 **文献标志码**:A

Track irregularity probabilistic model

XU Lei[1,2], ZHAI Wan-ming[1]

(1. State-Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Section of Road and Railway Engineering, Delft University of Technology, Delft 2628, Zuid-Holland, Netherlands)

Abstract: To efficiently select track irregularity random samples for satisfying the ergodicity requirements of excitation sources in stochastic dynamics and reliability analysis in vehicle-track system, the weak-stationarity and similarity spectral of track irregularities were introduced to propose a track irregularity probabilistic model. Using the discrete probability integration and statistical approaches, the massively measured track irregularity time histories were divided into multiple time-domain sequences. The statistical power spectral density distribution of each sequence was calculated by the spectral analysis method. Then, using the matrix-based method, the set representation of the power spectral density function of track irregularities was obtained.

收稿日期:2017-12-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51678507);西南交通大学轨道交通工程动力学创新引智基地项目(B16041)
作者简介:徐 磊(1988-),男,湖南华容人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆-轨道时空非线性振动研究。
导师简介:翟婉明(1963-),男,江苏靖江人,西南交通大学教授,工学博士,中国科学院院士。

It was assumed that the power spectral densities could be linearly accumulated at different frequencies, allowing the probabilities of entire spectra line to be obtained using the power spectral density probability distribution of a single frequency. The representative track irregularity spectra were selected through the commonly random simulation methods, and the track random irregularities were inversely simulated. The height and direction track irregularities of high-speed railway about 269 km were measured. Based on the vehicle-track coupled dynamics theory, the calculation results between the track irregularity probabilistic model and track irregularity stochastic model was compared from the aspects of the simulated amplitude of track irregularity and the probability density distribution for dynamic response in the vehicle-track system to verify the validity and high efficacy of the track irregularity probabilistic model. Calculation result shows that when taking the track random irregularities caused by the two models as excitation sources, the difference of the obtained probability entropies of vehicle-track system dynamic response between the two models is less than 2%. Both models can accurately express the excitation characteristics of track irregularities. The stochastic and probabilistic models need 131 and 33 random samples, respectively, to guarantee the consistent probability density distributions between the simulation and measurement, and the probabilistic model has higher computation efficiency. Under the presented computational condition, the wheel-rail forces and car body accelerations are 38-152 kN and $-0.042g$-$0.043g$, respectively, and are respectively less than the limits of wheel-rail forces (170 kN) and car body accelerations ($0.25g$) in *Code for High Speed Railway Design* (TB 10621—2014). The track irregularity status of the investigated high-speed line is sufficient to guarantee the running safety and riding comfort of the vehicle. 1 tab, 7 figs, 25 refs.

Key words: railway engineering; track irregularity; probabilistic model; random vibration; vehicle-track coupled dynamics; stochastic model

Author resumes: XU Lei(1988-), male, doctoral student, leix_2013@163.com; ZHAI Wan-ming(1963-), male, professor, academician of Chinese Academy of Sciences, PhD, wmzhai@swjtu.edu.cn.

0　引　言

车辆-轨道系统的随机振动特性主要来源于激振源和系统参数的随机性，考虑到车辆-轨道系统理论计算条件与实际物理、力学状态间的差异，以及常规计算中激振源和车线参数的不完备性与时效不变性，亟待开展车辆-轨道系统的随机分析[1-6]。

目前，在考察轨道不平顺激励源的随机性时，一般采用轨道不平顺功率谱密度函数的统计平均值（简称轨道谱），通过不同谐波分量的相位随机组合反演轨道不平顺随机序列，以此作为车辆-轨道系统的随机激励源。然而，轨道谱仅能表达某一线路区间中轨道不平顺幅值-频率的统计平均状态。在轨道不平顺样本容量较大时，则要充分考虑计算效率的问题。显然，取轨道不平顺的平均谱为系统激励源，只能算出代表性轨道不平顺状态下的铁路系统动力学响应，无法获得整条线路几何状态下的系统动力学行为，从而导致系统可靠度评估、概率分析等工作存在较大误差。

迄今为止，以法国科研人员在轨道不平顺随机模型方面的研究最为突出。Perrin 等提出的轨道不平顺随机模型（Track Irregularity Stochastic Model, TISM）主要利用 Karhunen-Loève（K-L）展开和混沌多项式来表达轨道不平顺随机过程，实现了对大量实测不平顺信号的压缩与相关性识别[7]；Panunzio 等采用几乎与文献[7]相同的方法建立了轨道不平顺随机模型，并开展了车辆动力学的相关研究[8]；Lestoille 等结合 TISM，采用自回归滑动平均模型（Auto-Regressive Moving Average Model, ARMA）和最小二乘法模拟了轨道不平顺的时变规律，分析了列车的长时效动力性能[9]。上述工作主要采用信号处理方法将轨道不平顺视为一般的非平稳、相关随机信号，并未从不平顺的本质特征出发，未能提出更高效、更简洁的轨道不平顺随机模拟方法。

保证轨道不平顺随机激励源的完备性，建立高效可行的轨道不平顺随机模拟方法，是实现车

辆-轨道系统动力可靠度评估的重要基础。采用谱分析方法对轨道随机不平顺进行研究是一项成熟且易为工程技术人员接受的技术。Xu 等提出的轨道不平顺概率模型(Track Irregularity Probabilistic Model, TIPM)[3,10]已被引入轨道不平顺敏感性分析[11]、概率关系[12]、地震[13]、可靠性分析[14-16]等研究领域。鉴于此,本文进一步以轨道不平顺实测数据和车辆-轨道耦合动力学为基础,从轨道不平顺及其激扰下的系统动力响应概率分布出发,对比分析轨道不平顺概率模型与轨道不平顺随机模型的计算结果,以进一步验证轨道不平顺概率模型的可靠性和高效性,为轨道不平顺随机模拟方法和车辆-轨道系统随机分析、可靠度评估提供可行的技术手段。

1 轨道不平顺随机模型(TISM)

将轨道不平顺 τ 归结为高低 τ_1、方向 τ_2、水平 τ_3 和轨距 τ_4 这 4 种类型,即

$$\tau = \left\{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\right\} \tag{1}$$

通过区段划分,可知轨道不平顺实测集 $X(s)$ 为

$$X(s) = \left\{\boldsymbol{X}_{\tau_1,i}(s), \boldsymbol{X}_{\tau_2,i}(s), \boldsymbol{X}_{\tau_3,i}(s), \boldsymbol{X}_{\tau_4,i}(s) \mid i = 1,2,\cdots,N_t; s \in [0, S/N_t]\right\} \tag{2}$$

式中:S 为所有检测数据的区段总长度;s 为每个样本的区段长度;N_t 为样本总数;i 为样本编号。

基于 K-L 展开方法,可进一步将轨道不平顺的模拟信号 $\boldsymbol{X}$ 表示为[7,17]

$$\boldsymbol{X} = \sum_{k=1}^{N_s} \sqrt{\lambda_k}\boldsymbol{\mu}_k \eta_k \tag{3}$$

式中:η_k 为相互独立的随机变量;$\boldsymbol{\mu}_k$ ($k=1,2,\cdots,N_s$)为 $\boldsymbol{X}$ 的特征向量;λ_k 与 $\boldsymbol{\mu}_k$ 对应的特征值;k 为模拟样本序号;N_s 为截断阶数。

K-L 展开的实质是将随机场分解为一系列不相关的随机变量和确定系数,这种展开方式对任意随机场均收敛,且具有最小均方误差[17]。在 TISM 中,通过设置截断阶数 $N_s \leqslant N_t$ 使计算量降低,同时保证了轨道不平顺信号间的相关性[7]。

2 轨道不平顺概率模型(TIPM)

2.1 轨道不平顺谱-累积概率关系

对于轨道随机不平顺,式(2)中的序列均为空间幅值及其时域演化值,因为它是铁路线路长期实测数据的汇总。一般而言,S 很大,若全部输入车辆-轨道耦合动力学模型进行统计分析,计算效率会很低,但可以从概率意义上把握其研究框架,将轨道不平顺空间实测样本 $\boldsymbol{X}_{\tau_j,i}(s)$ ($j=1,2,3,4$,为不平顺类型编号)视为能量有限的信号序列。假定 $\rho(\cdot)$ 为功率谱算子,对样本空间(式(2))进行计算,可形成等效样本频域集 $\Psi(\omega)$,即

$$\Psi(\omega) = \left\{P_{\tau_1,i}(\omega), P_{\tau_2,i}(\omega), P_{\tau_3,i}(\omega), P_{\tau_4,i}(\omega) \mid \omega \in [\omega_l, \omega_u]\right\} \tag{4}$$

$$P_{\tau_j,i}(\omega) = \rho(\boldsymbol{X}_{\tau_j,i}(s)) \tag{5}$$

式中:ω 为离散频率;ω_u、ω_l 分别为上、下限截止频率;$P_{\tau_j,i}(\omega)$为功率谱密度样本。

对不同频率下的功率谱密度进行概率密度分布计算,则

$$\begin{cases} P_{\tau_j,\omega}(p_k) = \Gamma(P_{\tau_j,i}(\omega)) \\ p_l = \min(P_{\tau_j,i}(\omega)) \\ p_u = \max(P_{\tau_j,i}(\omega)) \end{cases} \tag{6}$$

式中:$\Gamma(\cdot)$为功率谱密度算子;$p_k \in [p_l, p_u]$,为功率谱密度点,p_l、p_u 分别为功率谱密度的下、上限;$P_{\tau_j,\omega}(p_k)$为 τ_j 型轨道不平顺在频率 ω 下且功率谱密度为 p_k 的概率密度分布。

由概率密度分布的数学性质可知

$$\int_{p_l}^{p_u} P_{\tau_j,\omega}(p_k)\mathrm{d}p \approx 1 \tag{7}$$

可得频率为 ω,不平顺类型为 τ_j 时的功率谱密度 $P_{\tau_j}(\omega)$的累积概率分布 $C_{\tau_j,\omega}(p)$为

$$C_{\tau_j,\omega}(p_k) = \int_{-\infty}^{p} P_{\tau_j,\omega}(p_k)\mathrm{d}p \tag{8}$$

轨道不平顺功率谱线之间具有相似性[18],可假定同一条谱线上各频率点功率谱密度的累积概率 U 相同,由式(8)可知 U 与 p_k 的关系为

$$p_k(U) = C_{\tau_j,\omega}^{-1}(U) \tag{9}$$

式中:$C_{\tau_j,\omega}^{-1}(U)$为 τ_j 型轨道不平顺在频率 ω 下功率谱密度累积分布的反函数。

集合整个频域中的 $p_k(U)$构成轨道不平顺累积概率谱 $P_{\tau_j,U}(\omega)$,进一步可将式(4)等效为

$$\Psi(U,\omega) = \left\{P_{\tau_1}(U,\omega), P_{\tau_2}(U,\omega), P_{\tau_3}(U,\omega), P_{\tau_4}(U,\omega) \mid U \in [U_l, U_u]\right\} \tag{10}$$

式中:$\Psi(U,\omega)$为以 U 和 ω 为变量的功率谱样本集;U_u、U_l 分别为累积概率的上、下限。

通过式(10),原始的轨道不平顺空间集(式(2))已转化为频率-累积概率的函数。将 4 种不平顺类

型作为相互独立的随机变量，可知频率为 ω，累积概率为 U 时的功率谱密度 $P_{\tau_j}(U,\omega)$ 为相互独立的概率子集，其 U-ω 联合概率密度函数需满足

$$\int_{\omega_l}^{\omega_u}\int_{U_l}^{U_u} C_{\tau_j}(U,\omega)\mathrm{d}U\mathrm{d}\omega = 1 \tag{11}$$

式中：$C_{\tau_j}(U,\omega)$ 为 τ_j 类型不平顺的 U-ω 联合概率密度函数。

式(10)、(11)已完整包含原始轨道不平顺实测数据的幅值、频率与概率信息，可得累积概率谱的概率密度分布 $C_{\tau_j}(U)$ 为

$$C_{\tau_j}(U) = \int_{\omega_l}^{\omega_u} C_{\tau_j}(U,\omega)\mathrm{d}\omega \tag{12}$$

采用时-频转换方法将累积概率谱 $P_{\tau_j,U}(\omega)$ 转化为相应的时程集合 $\boldsymbol{X}_{\tau_j,U}(s)$，而此幅值序列的出现概率 $P(\boldsymbol{X}_{\tau_j,U}(s))$ 为

$$P(\boldsymbol{X}_{\tau_j,U}(s)) = \int_{\omega_l}^{\omega_u}\int_{U-\Delta U}^{U} C_{\tau_j}(U,\omega)\mathrm{d}U\mathrm{d}\omega \tag{13}$$

式中：ΔU 为累积概率的离散间隔。

根据式(13)可得到轨道随机不平顺时程集合 $\boldsymbol{X}_{\tau_j,U}(s)$ 的概率分布，采用随机模拟方法，如超立方抽样法、舍选法、数论法等，即可实现任意轨道不平顺类型的幅值-频率全尺度联合模拟。轨道随机不平顺时程集合 $\boldsymbol{X}_{\tau_j,U}(s)$ 与累积概率谱 $P_{\tau_j,U}(\omega)$ 一一对应，可由时-频转换方法获得。

2.1　功率谱时-频转换方法

陈果等基于傅里叶变换基本原理，提出一种数值反演方法[19]。在此基础上，本文按如下简化步骤实现轨道不平顺空间序列的随机模拟。

(1)对于轨道不平顺的单边功率谱，确定其频域采样点数 W_r，且 W_r 为 2 的整数次幂，上、下截止波长为 L_u、L_l(上、下截止频率为 $1/L_l$、$1/L_u$)，取原始频域范围为 $0\sim 1/L_l$。由于周期图法估计出的功率谱具有周期性，且为偶对称序列，将其转化为双边谱 $S(f)$，其中 f 为频率点，则频率间隔 Δf 为

$$\Delta f = 2W_r/L_l \tag{14}$$

对不在频率区间 $[1/L_l, 1/L_u]$ 中的功率谱密度置零。

(2)对于空间离散序列 $b(n)(n=1,2,\cdots,N_l)$，通过离散傅里叶变换可得

$$|X(k)| = |\zeta[b(n)]| = \sqrt{(2W_r)^2 S(k)} = 2W_r\sqrt{S(f=k\Delta f)\Delta f} \tag{15}$$

式中：$\zeta(\cdot)$ 为离散傅里叶变换算子；$X(k)$ 为频谱；n 为离散点序号；N_l 为总的离散点数。

(3)计算独立相位序列 ξ_n，其各分量均值为 0，ξ_n 为复数，且 $|\xi_n|=1$，设

$$\xi_n = \cos(\varphi_n) + \mathrm{i}\sin(\varphi_n) = \mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi_n} \tag{16}$$

式中：φ_n 为服从 $0\sim 2\pi$ 的均匀分布的随机变量。

频谱 $X(k)$ 为

$$X(k) = 2W_r\xi(k)\sqrt{S(f=k\Delta f)\Delta f} \tag{17}$$

由对称条件可得频谱 $X(\Delta s)(\Delta s=1,\cdots,2W_r)$，其中：$\Delta s$ 为离散的频率点。

(4)将得到的复序列 $X(\Delta s)$ 进行逆傅里叶变换可获得轨道随机不平顺模拟信号。

3　动力模型与计算条件

3.1　车辆-轨道耦合动力模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论[20]，采用多刚体动力学方法建立车辆动力学子模型，采用有限元方法建立轨道子模型[10]，并采用新型轮轨空间耦合模型将车辆子系统与轨道子系统衔接[21]，从而建立适合于高速铁路无砟轨道分析的车辆-轨道耦合动力学模型。模型中的轮轨法向力用赫兹非线性弹性接触理论计算，轮轨切向蠕滑力用 Kalker 线性蠕滑理论和饱和非线性修正计算[22]。车辆子系统各轮对横向、垂向、侧滚、摇头和点头运动所受到的直线钢轨反力 F_y、F_z、F_φ、F_ψ、F_β 分别为[3]

$$\begin{cases} F_y = F_{yl} + F_{yr} \\ F_z = F_{zl} + F_{zr} \\ F_\varphi = a(F_{zr} - F_{zl}) - r_l F_{yl} - r_r F_{yr} + I_y(\dot{\beta} - \Omega)\dot{\psi} \\ F_\psi = a(F_{xl} - F_{xr}) - a\psi(F_{yl} - F_{yr}) + M_{zl} + \\ \qquad M_{zr} + I_y(\dot{\beta} - \Omega)\dot{\varphi} \\ F_\beta = r_l F_{xl} + r_r F_{xr} + \psi(r_l F_{yl} + r_r F_{yr}) + M_{yl} + M_{yr} \end{cases} \tag{18}$$

式中：F_{xl}、F_{xr}、F_{yl}、F_{yr}、F_{zl}、F_{zr} 分别为左、右轮轨法向力和切向蠕滑力在纵(x)、横(y)和垂(z)向的分量合力；M_{yl}、M_{yr}、M_{zl}、M_{zr} 分别为左、右轮轨蠕滑力矩在 y、z 方向的分量合力矩；a 为 1/2 左右轮轨接触点距离；r_l、r_r 分别为左、右轮轨接触点滚动半径；Ω 为车轮名义滚动半径；I_y 为车轮点头惯量；ψ 为车轮摇头角；$\dot{\varphi}$、$\dot{\beta}$ 为侧滚和点头角速度。

对于轨道子系统，只需将轮对力以反力形式分配给钢轨梁单元节点即可[3,10,23-24]。

3.2　计算条件

基于建立的车辆-轨道耦合动力模型，取行车速度为 350 km·h^{-1}，轨道结构采用 CRTS-Ⅰ型板式直线轨道，车辆系统为 CRH-3 型动力车，以某高速铁路实测轨道高低和方向不平顺为车辆-轨道系统的动力激扰源(图 1)，采样率为 4 点·m^{-1}。

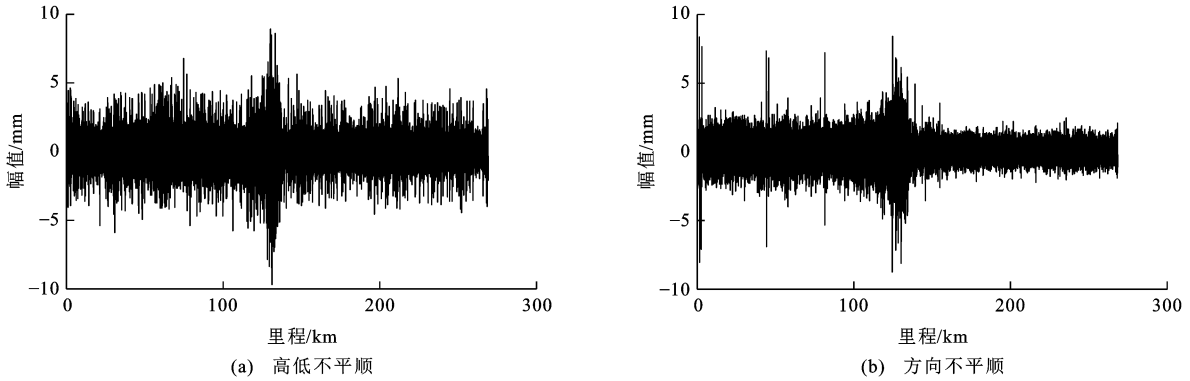

图 1 轨道不平顺

Fig. 1 Track irregularities

4 对比分析

对于随机信号而言，概率密度分布能抓住幅值与统计概率信息，是一种较好的信号处理方式。基于此，主要对 2 种模型的轨道不平顺时域幅值和车辆-轨道系统动力响应进行概率密度分布上的对比分析。

4.1 轨道不平顺时域幅值分布

由图 1 可知：给出的轨道不平顺是从约 269 km 的线路区段实测获得，但对于车辆-轨道耦合动力计算而言，计算量颇大。采用 2 种轨道不平顺随机模型可以极大减少计算量。对于原始检测不平顺，以 500 m 为 1 个样本长度，可将轨道不平顺划分为 538 个区间，即式(2)中的 $N_t=538$。采用 TISM，根据特征值所占权重(图 2)，保证模拟信号有 95%的原始信息量，算得截断阶数 $N_s=131$，即减少了 75.65%的计算量。

由式(13)获取不同轨道不平顺样本谱的概率密度分布，而后采用数论选点法[14]进行 2 个随机变量(高低不平顺和方向不平顺)的样本谱选取和时-频转换。计算结果表明，取 $N_s=33$ 时即可获得满意效果。采用 TISM、TIPM 这 2 种模型获得的所有时域样本见图 3、4，不平顺幅值统计概率密度分布见图 5，可知：基于 TISM、TIPM 获得的轨道不平顺时域样本统计概率密度分布与实测值的相对误差分别为 9.51%、9.49%；2 种模型均能在较小计算样本量的情况下保证大量原始轨道不平顺幅值统计信息不丢失。

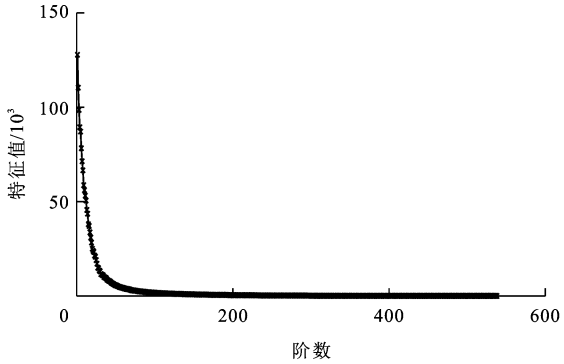

图 2 不同样本的特征值

Fig. 2 Eigenvalues of different samples

4.2 动力响应

以 TISM、TIPM 这 2 种模型中轨道随机不平顺为车辆-轨道系统的激励输入时，需要检验动力响

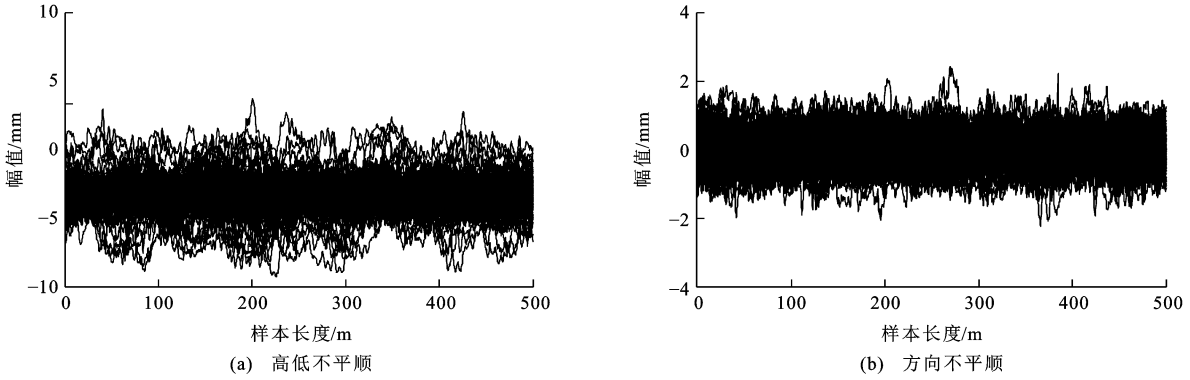

图 3 轨道不平顺的代表样本(TISM)

Fig. 3 Representative samples of track irregularities (TISM)

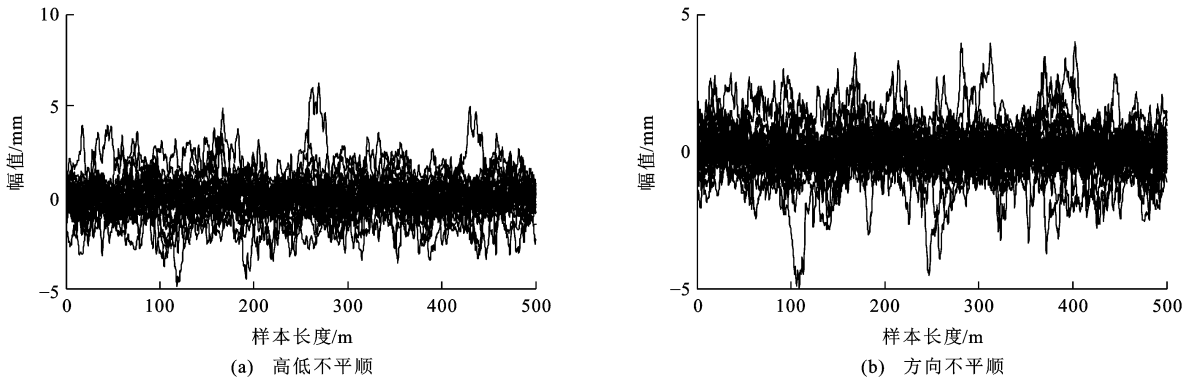

图 4　轨道不平顺的代表样本(TIPM)

Fig. 4　Representative samples of track irregularities (TIPM)

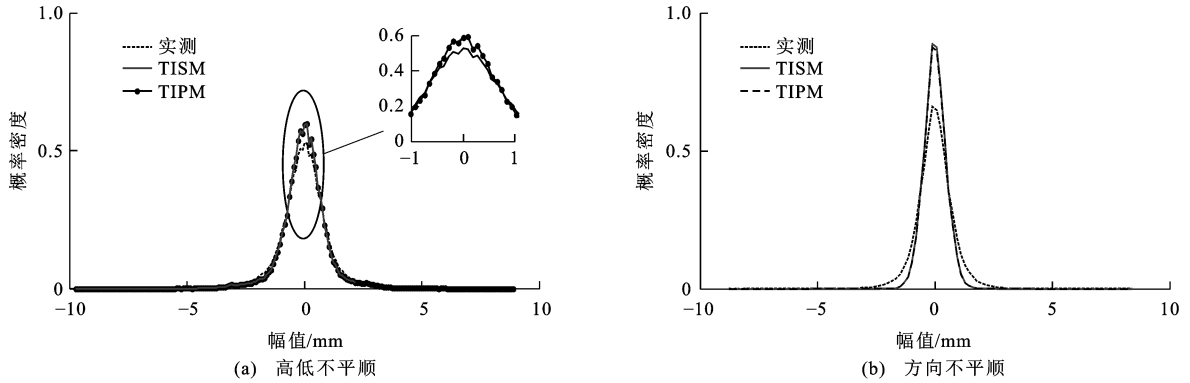

图 5　轨道不平顺幅值概率密度分布

Fig. 5　Probability density distributions of track irregularity amplitudes

应信息的一致性。选取车辆系统的轮轨垂向力、车体垂向加速度和钢轨垂、横向位移与轨道板垂、横向加速度等指标进行 TISM 和 TIPM 在动力学上的对比验证。车辆系统的轮轨垂向力和车体垂向加速度等指标的 TISM 与 TIPM 对比见图 6，其中：g 为重力加速度，采用香农概率熵值 $H(m)$ 评估指标概率分布间的接近程度[25]，即

$$H(m) = -\int p(m)\log_2[p(m)]\mathrm{d}m \tag{19}$$

式中：m 为系统响应值；$p(m)$ 为 m 的概率分布函数。

由图 6 和式(19)可知：对于轮轨垂向力，依据 TISM 和 TIPM 得到的响应熵值分别为 3.41 和 3.43；而对于车体垂向加速度，分别为 3.76 和 3.79。显然，对于车辆系统的垂向动力响应指标(轮轨垂向力和车体垂向加速度)，概率熵差异在 2%以内，表明 TISM 和 TIPM 的结果吻合良好；此外，轮轨力和车体加速度的幅值分别为 38～152 kN 和 −0.042g～0.043g，均未超过《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)中的限值(轮轨力为 170 kN，车体加速度为 0.25g)，说明此轨道不平顺状态较好，

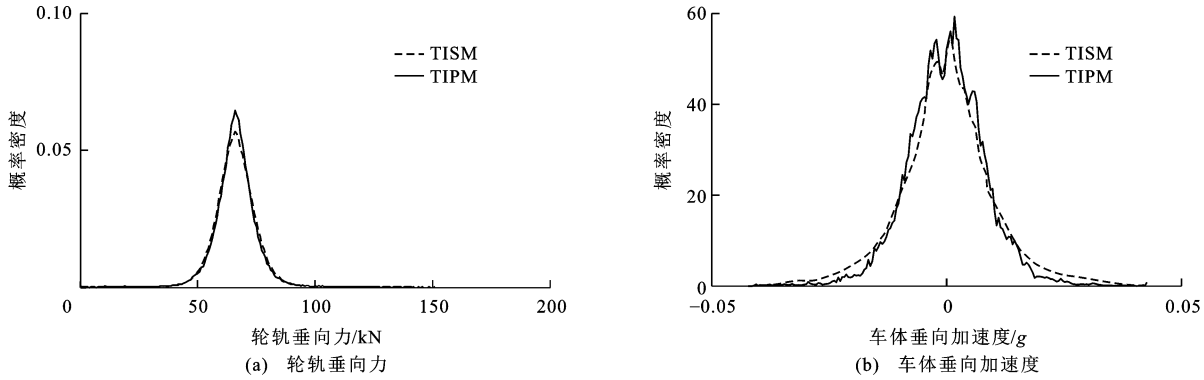

图 6　车辆系统动力指标对比

Fig. 6　Comparison of dynamic indices of vehicle system

行车安全,舒适性可以得到保证。

钢轨垂、横向位移和加速度 4 个指标的 TISM 与 TIPM 概率密度分布见图 7,概率熵的对比结果见表 1,可知:钢轨系统的动力响应分布在 2 种计算模型下获得的概率熵结果十分接近(差异在 1.5% 以内),进一步验证了本文方法的有效性。

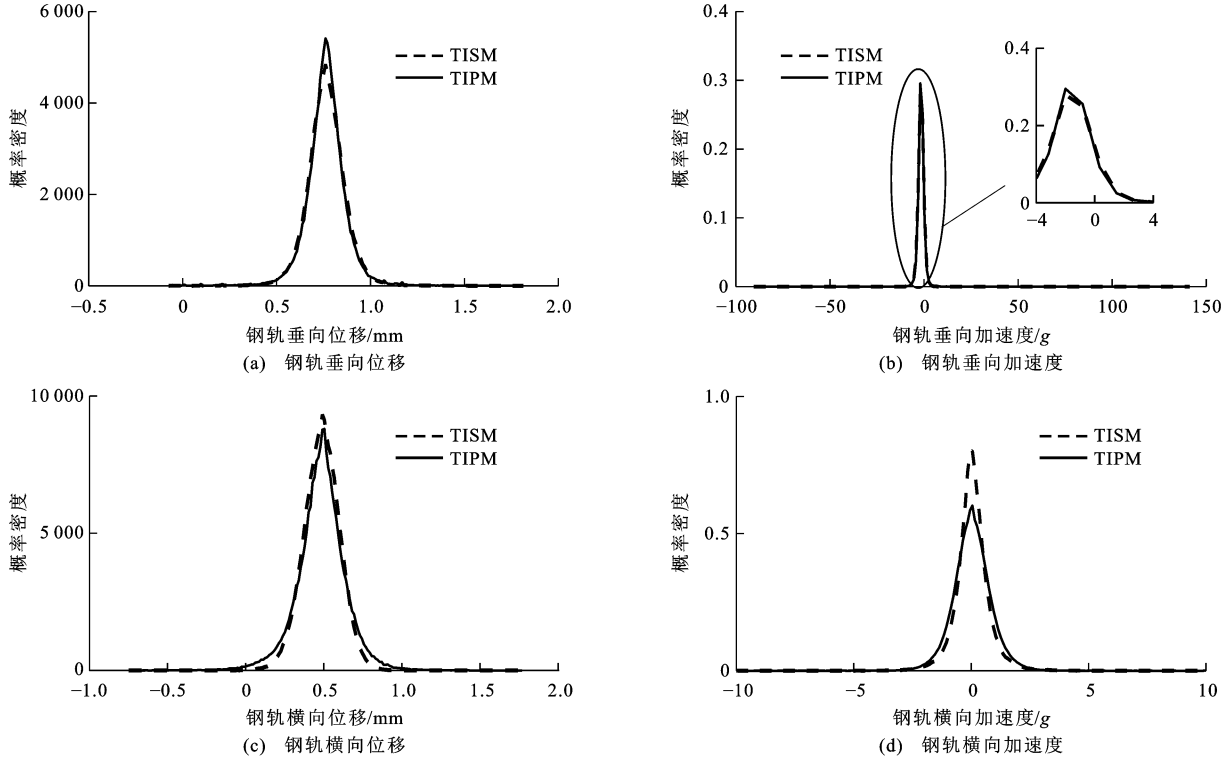

图 7 轨道系统动力指标对比

Fig. 7 Comparison of dynamic indices of track system

表 1 钢轨动力指标的概率熵对比

Tab. 1 Comparisons on probability entropy for dynamic indices of track

动力指标	2 种模型下概率熵	
	TISM	TIPM
垂向位移	3.21	3.20
垂向加速度	4.65	4.60
横向位移	3.10	3.14
横向加速度	3.89	3.82

从车辆-轨道系统的动力响应的概率熵差异(2%以内)来看,TISM 和 TIPM 的结果基本吻合,其响应差异来自于对轨道随机不平顺信息表达的完备程度。在本文的算例中,TIPM 的计算样本仅为 TISM 的 1/4,而随着原始实测数据的增加,轨道不平顺空间样本(式(2))所代表的信息量亦会增加,此时需要增大 TISM 中的截断阶数 N_s 以包含更多的原始数据信息。但对于 TIPM 而言,随着原始实测数据的增加,计算样本并不会随之递增,但会使式(13)中的功率谱概率密度分布更加符合实际。

5 结 语

(1)TISM 主要依靠信号处理手段对实测数据进行特征压缩,TIPM 准确把握了轨道随机不平顺的概率特性。TIPM 以随机模拟的 33 个样本即达到 TISM 用 131 个样本才能达到的计算精度,且动力响应的概率熵差异在 2%以内,有效表明了 TIPM 兼顾计算效率和计算精度两方面的要求。

(2)在当前高速铁路轨道不平顺状态下,即使采用轨道不平顺全概率样本激励,车辆动力响应仍未超过《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)中的限值,行车安全性、舒适性可以得到保证。

(3)本文模型是基于轨道不平顺的平稳随机性和谱线相似性建立的。针对其他复杂环境状态下轨道不平顺所呈现的非平稳与几何相关等特性,还应开展更为广泛工作。

参 考 文 献 :

References :

[1] MAO Jian-feng, YU Zhi-wu, XIAO Yuan-jie, et al. Random dynamic analysis of a train-bridge coupled system involving

random system parameters based on probability density evolution method[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 46: 48-61.

[2] ZHU D Y, ZHANG Y H, KENNEDY D, et al. Stochastic vibration of the vehicle-bridge system subject to non-uniform ground motions[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(3): 410-428.

[3] XU Lei, ZHAI Wan-ming. A new model for temporal-spatial stochastic analysis of vehicle-track systems [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(3): 427-448.

[4] 徐　磊，翟婉明. 轨道结构随机场模型与车辆-轨道耦合随机动力分析[J]. 应用数学与力学，2017，8(1)：67-74.
XU Lei, ZHAI Wan-ming. The random field model for track structures and vehicle-track coupled stochastic dynamic analysis[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(1): 67-74. (in Chinese)

[5] 张有为，项　盼，赵　岩，等. 基于对称性的三维车辆轨道耦合系统随机振动虚拟激励方法[J]. 计算力学学报，2013，30(3)：349-355.
ZHANG You-wei, XIANG Pan, ZHAO Yan, et al. Efficient random vibration analysis of 3D-coupled vehicle-track systems based on symmetry principle [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(3): 349-355. (in Chinese)

[6] ZENG Zhi-ping, ZHAO Yan-gang, XU Wen-tao, et al. Random vibration analysis of train-bridge under track irregularities and traveling seismic waves using train-slab track-bridge interaction model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 342: 22-43.

[7] PERRIN G, SOIZE C, DUHAMEL D, et al. Track irregularities stochastic modelling [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013, 34: 123-130.

[8] PANUNZIO A M, PUEL G, COTTEREAU R, et al. Construction of a stochastic model of track geometry irregularities and validation through experimental measurements of dynamic loading[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(3): 399-426.

[9] LESTOILLE N, SOIZE C, FUNFSCHILLING C. Stochastic prediction of high-speed train dynamics to long-term evolution of track irregularities [J]. Mechanics Research Communications, 2016, 75: 29-39.

[10] XU Lei, ZHAI Wan-ming. A novel model for determining the amplitude-wavelength limits of track irregularities accompanied by a reliability assessment in railway vehicle-track dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 260-277.

[11] XU Lei, ZHAI Wan-ming, GAO Jian-min. Extended applications of track irregularity probabilistic model and vehicle-slab track coupled model on dynamics of railway systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(11): 1686-1706.

[12] XU Lei, ZHAI Wan-ming, GAO Jian-min. Global sensitivity analysis for vehicle-track interactions: special attention on track irregularities [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2018, 13(3): 1-12.

[13] XU Lei, ZHAI Wan-ming. Stochastic analysis model for vehicle-track coupled systems subject to earthquakes and track random irregularities [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 407: 209-225.

[14] XU Lei, ZHAI Wan-ming. Probabilistic assessment of railway vehicle-curved track systems considering track random irregularities[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(1): 1-25.

[15] XU Lei, ZHAI Wan-ming, CHEN Zhao-wei. On use of characteristic wavelengths of track irregularities to predict track portions with deteriorated wheel/rail forces[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 104: 264-278.

[16] XU Lei, GAO Jian-min, ZHAI Wan-ming. On effects of rail fastener failure on vehicle/track interactions[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 63(5): 659-667.

[17] BABUŠKA I, NOBILE F, TEMPONE R. A stochastic collocation method for elliptic partial differential equations with random input data [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 2007, 45(3): 1005-1034.

[18] 康　熊，刘秀波，李红艳，等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学：技术科学，2014，44(7)：687-696.
KANG Xiong, LIU Xiu-bo, LI Hong-yan, et al. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, 44(7): 687-696. (in Chinese)

[19] 陈　果，翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报，1999，34(2)：138-142.
CHEN Guo, ZHAI Wan-ming. Numerical simulation of the stochastic process of railway track irregularities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(2): 138-142. (in Chinese)

[20] ZHAI Wan-ming, WANG Kai-yun, CAI Cheng-biao. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1349-1376.

[21] CHEN Guo, ZHAI Wan-ming. A new wheel/rail spatially dynamic coupling model and its verification [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(4): 301-322.

[22] SHEN Z Y, HEDRICK J K, ELKINS J A. A comparison of alternative creep force models for rail vehicle dynamic analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12 (1-3): 79-83.

[23] CHEN Xian-mai, DENG Xiang-yun, XU Lei. A three-dimensional dynamic model for railway vehicle-track interactions [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2018, 13: 1-10.

[24] XU Lei, CHEN Xian-mai, LI Xu-wei, et al. Development of a railway wagon-track interaction model: case studies on excited tracks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 877-898.

[25] DOBOVIŠEK A, MARKOVIČ R, BRUMEN M, et al. The maximum entropy production and maximum Shannon information entropy in enzyme kinetics [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 496: 220-232.