

考虑轨道不平顺随机性的车轨耦合系统动力可靠度分析

王 伟¹, 张亚辉^{*1}, 欧阳华江^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 利物浦大学 工程学院, 英国 利物浦 L69 3GH)

摘要: 将轮轨力预估格式的迭代求解方法与子集模拟法相结合, 给出了一种考虑轨道不平顺随机性的车轨耦合系统动力可靠度求解方法, 从提高确定性响应求解效率和减少确定性响应求解次数两方面, 提高了系统可靠度求解效率. 算例以 CRH2 新造动车组为研究对象, 获得车辆在直线轨道上的横向平稳性指标和曲线通过时的车轮脱轨系数分别超出各自限度值的失效概率. 通过与直接 Monte Carlo 模拟 (DMCS) 对比, 验证了所给方法的计算精度和效率. 同时研究了不同波长范围内的随机轨道不平顺对车辆系统动力可靠度的影响, 获得了与已有研究文献较为一致的规律, 进一步验证了方法的正确性.

关键词: 车轨耦合系统; 随机轨道不平顺; 动力可靠度; 子集模拟法

中图分类号: U270.11; U238 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201902001

0 引言

轨道不平顺本质上为一随机过程, 其形成和发展是多种随机因素共同作用的结果. 轨道不平顺的存在加剧了轮轨间的相互作用力, 加速了车轨系统零部件的疲劳和磨损, 降低了列车运行安全和乘坐舒适性能. 因此, 开展考虑轨道不平顺随机性的车轨耦合系统动力可靠度问题研究, 对开展新型车辆设计、车辆动力学性能评估以及线路维护等工作具有理论指导意义^[1].

近年来, 考虑轨道不平顺随机性的车轨系统动力可靠度问题获得了国内外研究人员的广泛关注. Perrin 等^[2-3]基于轨道不平顺实测数据建立了非平稳、非高斯的轨道不平顺四维随机场模型, 应用 VAMPIRE 商业软件建立了车辆动力学模型, 获得了随机轨道不平顺影响下的车体加速度、轮轨力等响应指标的概率密度函数曲线. Xu 等^[4-5]提出了轨道不平顺概率模型, 建立了三维车辆/板式轨道耦合系统动力学模型, 应用概率密度演化方法获得了车体横向加速度、轮轨横向力等响应指标的均值、标准差以及概率密度函数演化曲线. Zhu 等^[6]建立了 27 自由度车辆模型和三跨桥连

续梁有限元模型, 采用轮对与钢轨密贴假设, 应用虚拟激励法研究了随机轨道不平顺对车辆运行安全和平稳性能的影响规律. Zeng 等^[7]建立了 31 自由度车辆动力学模型和板式轨道/7 跨桥连续梁有限元模型, 采用轮对与钢轨密贴假设, 考虑了轮轨横向蠕滑率的影响, 应用虚拟激励法研究了随机轨道不平顺和地震联合作用下对车辆和桥梁随机响应统计特性的影响规律.

上述研究主要从获得系统随机响应统计特性的角度开展, 而针对直接得到车轨耦合系统失效概率的研究则相对较少. Mohammadzadeh 等^[8]应用 SIMPACK 软件, 结合重要采样方法和响应面方法获得了车轮脱轨系数极限状态函数的数学表达式以求解失效概率. 虽然响应面方法能够近似表示车轨耦合系统的非线性响应曲面, 但仍需要大量的样本^[9]. 重要采样法虽可减少计算所需的样本数, 但该方法仅在低维或失效域较简单的情况下才能取得良好效果^[10], 无法高效应用于具有复杂失效域的车轨耦合系统动力可靠度求解.

为此, 本文将已被广泛应用于多个工程领域结构可靠度问题研究^[11-16]的子集模拟法^[17-18]与

收稿日期: 2018-11-10; 修回日期: 2019-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672060, 11672052).

作者简介: 王伟(1982-), 男, 博士生, E-mail: wangwei2019@126.com; 张亚辉*(1972-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangyh@dlut.edu.cn; 欧阳华江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: H. Ouyang@liverpool.ac.uk.

作者提出的基于轮轨预估格式的车轨系统迭代求解方法^[19]相结合,给出一种考虑轨道不平顺随机性的车轨耦合系统动力可靠度求解方法.以 CRH2 新造动车组为研究对象,考虑轨道不平顺的随机性,获得直线轨道上车辆横向平稳性指标和通过曲线轨道时的车轮脱轨系数分别超出各自限度值的失效概率;同时分析不同波长范围轨道不平顺对车辆系统动力可靠度的影响规律,为轨道平顺状态维护进而确保高速列车运行品质提供思路.

1 车轨系统动力学模型

1.1 车轨系统运动方程

将车辆和轨道考虑为两个子系统,分别建立运动方程.以 CRH2 动车组为研究对象,建立 35 自由度车辆多刚体动力学模型^[20],如图 1 所示.每个刚体均考虑横移 y 、浮沉 z 、侧滚 φ 、点头 β 和摇头 ψ 等 5 个方向的自由度,刚体间采用弹簧/阻尼并力元连接.假定车辆运行速度 v 保持不变.考虑了车辆在曲线轨道上运行,如图 1(b) 所示,图中 φ_{sup} 为曲线轨道超高角, h_{sup} 为曲线轨道超高.

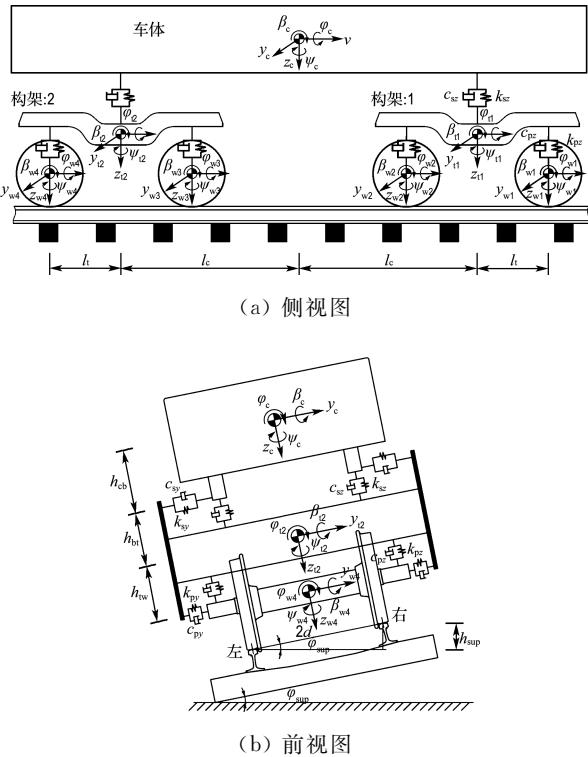


图 1 三维车辆动力学模型

Fig. 1 Three dimensional dynamic model of railway vehicle

在静平衡状态下建立车辆系统运动方程,可写成如下矩阵形式:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{X}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{X}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{X}_v = \mathbf{F}_{vt}$$
 (1)

式中: $\mathbf{M}_v$ 、 $\mathbf{K}_v$ 、 $\mathbf{C}_v$ 分别为车辆系统质量、刚度 and 阻尼矩阵; $\mathbf{X}_v$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_v$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}_v$ 分别为车辆系统位移、速度和加速度向量. 位移向量 $\mathbf{X}_v$ 的表达式为

$$\mathbf{X}_v = (\mathbf{x}_c^T \quad \mathbf{x}_{t1}^T \quad \mathbf{x}_{t2}^T \quad \mathbf{x}_{w1}^T \quad \mathbf{x}_{w2}^T \quad \mathbf{x}_{w3}^T \quad \mathbf{x}_{w4}^T)^T$$
 (2)

下标 c 、 $t1$ 、 $t2$ 、 $w1$ 、 $w2$ 、 $w3$ 、 $w4$ 分别表示车体、前后构架和 1~4 位轮对. 其中

$$\mathbf{x}_i = (y_i \quad z_i \quad \varphi_i \quad \beta_i \quad \psi_i)^T;$$
$$i = c, t1, t2, w1, w2, w3, w4$$
 (3)

车辆系统所受荷载向量 $\mathbf{F}_{vt}$ 考虑了曲线轨道几何参数的影响,可表示为

$$\mathbf{F}_{vt} = (\mathbf{F}_c^T \quad \mathbf{F}_{t1}^T \quad \mathbf{F}_{t2}^T \quad \mathbf{F}_{w1}^T \quad \mathbf{F}_{w2}^T \quad \mathbf{F}_{w3}^T \quad \mathbf{F}_{w4}^T)^T$$
 (4)

式中: $\mathbf{F}_c$ 、 $\mathbf{F}_{t1}$ 、 $\mathbf{F}_{t2}$ 分别为车体和前后构架所受荷载向量, $\mathbf{F}_{wi}$ ($i=1\sim4$) 分别为 1~4 位轮对所受荷载向量.

轨道系统动力学模型由钢轨和轨枕组成^[21],如图 2 所示. 钢轨模拟为连续弹性离散点支撑基础上的有限长 Euler-Bernoulli 简支梁,考虑横向、垂向和扭转 3 个方向的振动. 轨枕模拟为刚体,考虑横向、垂向和侧滚 3 个方向的自由度. 轨枕与钢轨之间以及轨枕与地基之间在横向、垂向方向均用弹簧和黏性阻尼并力元连接,忽略地基运动.

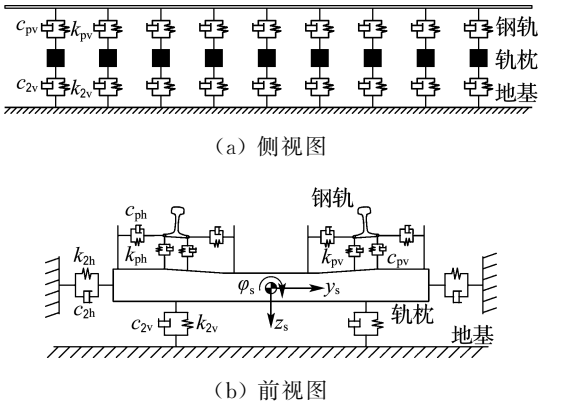


图 2 两层轨道动力学模型

Fig. 2 Two-layer track system dynamic model

轨道系统运动方程可表示为

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{X}_t = \mathbf{F}_{tv}$$
 (5)

式中: $\mathbf{M}_t$ 、 $\mathbf{K}_t$ 、 $\mathbf{C}_t$ 分别为轨道系统的质量、刚度和阻尼矩阵; $\mathbf{X}_t$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_t$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}_t$ 分别为轨道系统的位移、速

度和加速度向量; $\mathbf{F}_{iv}$ 为轨道系统所受荷载向量。

1.2 轮轨相互作用模型

轮轨相互作用模型是求解车轨耦合系统动力响应的关键。为考虑实际的轮轨型面和轨道系统振动对轮轨力的影响,应用翟婉明提出的新型轮轨空间接触几何关系模型^[22]求解轮轨接触几何关系。求得轮轨接触点位置及相应的几何参数后即可进行轮轨力的求解。轮轨法向力根据非线性赫兹弹性接触理论求解^[22],以考虑轮轨瞬时脱离情形。轮轨蠕滑力应用 FASTSIM 算法^[23]求解。

1.3 随机轨道不平顺

对于考虑实际轮轨型面的车轨耦合系统来说,一般在时域内应用数值积分方法求解系统动力响应。因此需获得轨道不平顺的空间域样本作为输入。轨道不平顺的统计特性常用功率谱密度函数表示,可应用基于谱表示的时频转换方法得到轨道不平顺样本。由于 ARMA 方法对平稳或非平稳随机过程均适用,且计算效率高于小波变换方法^[24],本文应用 ARMA 方法生成轨道不平顺的空间样本曲线^[25]。轨道谱选用德国低干扰单边谱^[26]。由于车轨系统动力响应求解过程中,轨道不平顺一般以单侧钢轨不平顺的形式输入,需先将 ARMA 方法获得的轨道不平顺样本转换为单侧钢轨不平顺样本^[27],然后以位移和速度方式叠加到钢轨响应上,进而影响轮轨接触几何关系、轮轨法向力和蠕滑力的求解。

1.4 动力响应求解

车轨系统动力响应采用作者提出的基于轮轨力预估格式的迭代方法求解^[19]。该方法通过对轮轨力的高效预估和构造松弛函数解决了常规迭代过程不易收敛或迭代次数过多等问题,相较于常规迭代方法,在保证计算精度的前提下提高了计算效率。其计算精度和效率通过与常规迭代方法以及 NUCARS 软件计算结果的对比得以验证^[19]。

2 子集模拟法求解车轨耦合系统可靠度

车轨耦合系统失效定义为车辆运行过程中的特定响应指标 $g(t, \boldsymbol{\theta})$ 超出给定的限度值 b 。以车轮脱轨系数为例,介绍如何应用子集模拟法求解车轮脱轨系数大于限度值 $b=0.8$ 的失效概率。子集模拟法的基本思想为引入一系列递增的中间限度值 $0 < b_1 < b_2 < \dots < b_m = b$, 构成一系列具有嵌

套关系的中间失效事件即 $F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_m = F$, 其中 m 为子集模拟法层数。由于中间失效事件的嵌套特性,系统的失效概率 P_f 可表示为 $P(F_1)$ 与一系列条件概率 $P(F_j | F_{j-1})$ 的乘积,即

$$P_f = P(F_1) \prod_{j=2}^m P(F_j | F_{j-1}) = \prod_{j=1}^m P_j \quad (6)$$

式中: $P_1 = P(F_1)$, $P_j = P(F_j | F_{j-1})$, $j=2, 3, \dots, m$ 。

P_1 可通过一次 DMCS 模拟得到,即

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N I_{F_1}(\boldsymbol{\theta}_h^{(1)}) \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_h^{(1)}$ ($h=1, 2, \dots, N$) 为根据概率密度函数 $q(\boldsymbol{\theta})$ 生成的样本, N 为每层样本数; $I_{F_1}(\boldsymbol{\theta})$ 为失效指示函数,当系统失效时取 1, 否则取 0。

条件概率 P_j ($j=2, 3, \dots, m$) 计算所需的样本需根据条件概率密度函数 $q(\boldsymbol{\theta} | F_j) = q(\boldsymbol{\theta}) I_{F_j}(\boldsymbol{\theta}) / P(F_j)$ 获得。然而,由于 $q(\boldsymbol{\theta} | F_j)$ 是一个复杂的,甚至无法显式表达的函数,很难直接根据该概率密度函数进行抽样。为此,可采用 MMA(modified Metropolis algorithm)算法^[17]得到满足给定条件概率密度函数的样本。获得相应的样本后,条件概率 P_j 可通过下式计算得到:

$$P_j = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N I_{F_j}(\boldsymbol{\theta}_h^{(j)}) \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_h^{(j)}$ ($h=1, 2, \dots, N$) 为根据条件概率 $q(\boldsymbol{\theta} | F_j)$ 生成的样本。通过自适应选取合适的限度值 b_j , 可以保证中间失效概率为一个确定性的值,即 $P_j = p_0$, $j=1, 2, \dots, m$ (一般取 $p_0=0.1$)。将式(7)和(8)代入式(6)中,系统的失效概率可表示为

$$P_f = p_0^{m-1} \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N I_{F_m}(\boldsymbol{\theta}_h^{(m)}) \quad (9)$$

子集模拟法求解车轨耦合系统可靠度流程如下:

步骤 1 输入每层样本数 N 和每层失效概率 p_0 。

步骤 2 设置 $i=0$, 同时根据概率密度函数 $q(\boldsymbol{\theta})$ 应用 ARMA 方法生成 N 个随机轨道不平顺样本 $\boldsymbol{\theta}_h^{(i)}$, 上标 $i=0$ 表示样本对应 Monte Carlo 模拟, 此时对应子集模拟法的第 1 层即 $j=1$ 。

步骤 3 计算轨道不平顺样本 $\boldsymbol{\theta}_h^{(i)}$ 对应的脱轨系数最大值 $\tilde{g}(\boldsymbol{\theta}_h^{(i)}) = \max(|g(t, \boldsymbol{\theta}_h^{(i)})|)$, $h=1, 2, \dots, N$, 共得到 N 个值, 然后统计 N 个值中大于限定值 0.8 的个数 $n_i^{(i)}$ 。

步骤 4 判断 $n_i^{(i)} / N \geq p_0$ 条件是否满足。若

条件不满足,则令 $i=i+1$ 并转至步骤 5 继续循环计算;若满足,则计算结束并跳转至步骤 7 输出计算结果。

步骤 5 将脱轨系数最大值 $\tilde{g}(\theta_h^{(i-1)})$ 按降序排列并记为 $G_1^{(i-1)}, G_2^{(i-1)}, \dots, G_N^{(i-1)}$, 根据排序后的第 Np_0 和第 Np_0+1 个响应值计算中间限度值 $b_i = (G_{Np_0}^{(i-1)} + G_{Np_0+1}^{(i-1)})/2$, 则 $P_i = p_0$ 自动满足。同时将对应的轨道不平顺样本 $\theta_h^{(i-1)}$ 重新排序, 记为 $\mathbf{X}_1^{(i-1)}, \mathbf{X}_2^{(i-1)}, \dots, \mathbf{X}_N^{(i-1)}$ 。

步骤 6 将前 Np_0 个轨道不平顺样本 $\mathbf{X}_k^{(i-1)}$ ($k=1, 2, \dots, Np_0$) 作为种子, 采用 MMA 算法生成 $N(1-p_0)$ 个新轨道不平顺样本, 共得到 N 个服从条件分布 $q(\cdot | F_i)$ 的轨道不平顺样本 $\theta_h^{(i)}$, 然后转至步骤 3 计算轨道不平顺样本 $\theta_h^{(i)}$ 激励下的车轮脱轨系数最大值。

步骤 7 输出结果: 子集模拟法总层数 $m=i+1$; 子集模拟法总样本数量 $N_t = N + N(1-p_0) \times (m-1)$; 子集模拟法得到的失效概率 $P_i = p_0^{m-1} n_i^{(m-1)} / N$ 。

由于将小失效概率表示为一系列较大条件概率的乘积, 且条件域内的样本采用 MMA 方法抽样生成, 从而减少了计算所需的样本数, 提高了计算效率。

3 数值算例

应用本文方法计算了 1~100 m 波长范围的随机不平顺激励下的 CRH2 新造车辆在直线轨道段的横向平稳性指标和通过曲线轨道段的车轮脱轨系数分别超出各自限度值的失效概率。通过与 DMCS 计算结果对比, 验证本文方法的计算精度和效率。另外通过改变不平顺的最长截止波长或最短截止波长, 研究不同波长范围的轨道不平顺对车辆运行平稳可靠度和脱轨安全可靠度的影响规律。车辆和轨道系统参数详见文献[19]。

3.1 直线轨道车辆运行平稳可靠度

车辆运行平稳性能可用横向平稳性指标衡量, 其值越大表明平稳性能越差。新造车辆的平稳性指标等级应为优, 因此限度值取 2.5^[28]。平稳性指标取前后测点位置处平稳性指标的最大值。车辆运行速度 $v=200$ km/h, 距离 $s=600$ m, 积分步长 $\Delta t=1 \times 10^{-4}$ s。

图 3 给出了本文方法和 DMCS 两种方法获得的车辆横向平稳性指标大于 2.5 的失效概率分布曲线。层失效概率 p_0 取 0.1, 每层样本数 N 取

200, 经过 5 层计算本文方法即可达到目标值, 此时样本总数 N_t 为 920。作为参考, 进行了样本数分别为 920 和 5 000 的两次 DMCS 模拟。从图 3 可知, 当失效概率大于 1×10^{-3} 时, 本文方法与 5 000 个样本的 DMCS 结果较为吻合, 但当失效概率小于 1×10^{-3} 时, 两者差异显著, 这主要是因为 DMCS 结果存在着不确定性, 5 000 个样本不足以收敛到小于 1×10^{-3} 。采用与本文方法同样样本数的 DMCS 所得失效概率仅能收敛到大于 2.5×10^{-2} 。与 DMCS 对比结果表明, 当车辆横向平稳性指标大于 2.5 的失效概率处于较低水平时, 本文方法采用少量样本即可达到较高的计算精度, 表明本文方法可高效用于直线轨道上车辆运行平稳可靠度问题研究。

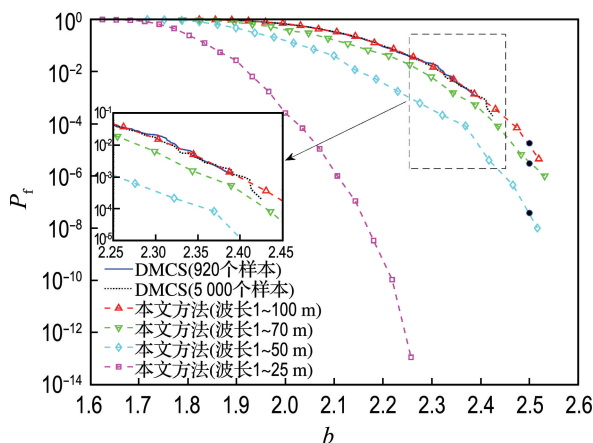


图 3 横向平稳性指标失效概率分布曲线对比
Fig. 3 Comparison of failure probability distribution curves of lateral ride quality index

图 3 同时给出了不同波长范围内车辆横向平稳性指标失效概率分布曲线, 最短截止波长 1 m 保持不变, 最长截止波长分别为 25、50、70 和 100 m。从图 3 可知, 1~25 m 波长范围内的车辆横向平稳性指标失效概率很小, 以至经过 13 层计算没有出现失效; 经过 8 层计算, 1~50 m 波长不平顺对应的失效概率为 3.83×10^{-8} ; 经过 6 层计算, 1~70 m 波长不平顺下的失效概率为 3.15×10^{-6} ; 经过 5 层计算, 1~100 m 波长对应的失效概率为 1.75×10^{-5} 。结合失效概率分布曲线的变化趋势可知, 25~70 m 特别是 25~50 m 波长不平顺对车辆横向平稳性指标影响较为显著, 而 70 m 以上波长不平顺的影响相对较弱。这主要是因为人体最为敏感的水平振动频率为 1~2 Hz^[29], 处于 25~50 m 波长不平顺激励下车体

振动频率 1.1~2.2 Hz 的范围内, 所得结论与文献[30]较为相符, 验证了本文方法的正确性。

3.2 曲线轨道车辆脱轨安全可靠度

曲线轨道段曲率及超高的变化直接影响着车辆的运行安全性能。车辆运行安全性能可用车轮脱轨系数衡量, 其值越大表明车辆运行安全性能越差。车轮脱轨系数定义为同一位置处的轮轨间横向力与垂向力的比值, 限度值取 0.8^[28]。脱轨系数数值取所有车轮脱轨系数的最大值。曲线轨道几何参数设置如下: 圆曲线半径 800 m, 缓和曲线长 80 m, 圆曲线长 140 m, 超高 80 mm, 曲线总长 300 m。车辆速度 $v=100$ km/h, 积分步长 $\Delta t=1\times 10^{-4}$ s。

图 4 给出了本文方法和 DMCS 两种方法得到的车轮脱轨系数值大于 0.8 的失效概率分布曲线。层失效概率 p_0 取 0.1, 每层样本数 N 取 200, 本文方法经过 5 层计算即达到目标值, 对应的总样本数 N_t 为 920。样本数为 920 和 5 000 的两次 DMCS 结果作为参考解。从图 4 可以看出, 当失效概率大于 1×10^{-3} 时, 本文方法与 5 000 次 Monte Carlo 模拟结果较为吻合, 但当失效概率小于 1×10^{-3} 时, 两者差异显著。样本数与本文方法相同的 DMCS 所得的失效概率仅收敛到 $1\times 10^{-1}\sim 1\times 10^{-2}$ 。表明本文方法可高效评估车辆通过曲线轨道段时的运行安全可靠度。

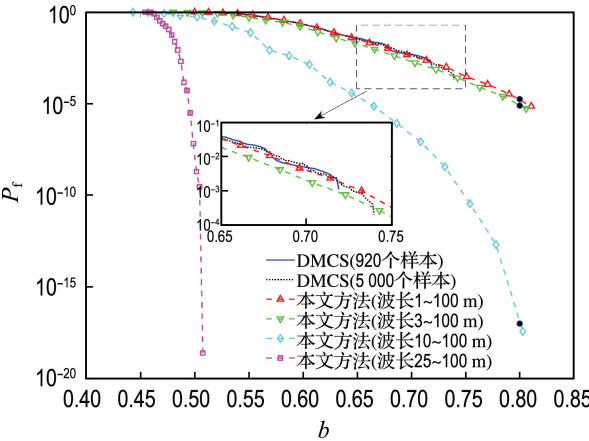


图 4 脱轨系数失效概率分布曲线对比
Fig. 4 Comparison of failure probability distribution curves of wheel derailment coefficient

图 4 同时给出了不同波长范围内的车轮脱轨系数失效概率分布曲线, 最长截止波长 100 m 保持不变, 最短截止波长分别为 1、3、10 和 25 m。由图 4 可知, 25~100 m 波长范围的轨道不平顺激

励下的车轮脱轨系数大于 0.8 的失效概率很小, 以至经过 20 层计算没有出现失效; 经过 17 层计算, 10~100 m 波长不平顺下的失效概率为 1.2×10^{-17} ; 经过 5 层计算, 3~100 m 波长不平顺下的失效概率为 8×10^{-6} ; 经过 5 层计算, 1~100 m 波长范围对应的失效概率为 1.8×10^{-5} 。结合失效概率分布曲线的变化趋势可知, 轨道不平顺中 3 m 以下波长成分对车轮脱轨系数的影响较为显著, 而 3 m 以上波长不平顺的影响相对较弱。结论与文献[31]所得结论一致, 进一步验证了本文方法的正确性。

4 结 语

本文将轮轨力预估格式的迭代求解方法与子集模拟法相结合, 给出了一种考虑轨道不平顺随机性的车轨耦合系统动力可靠度评估方法, 从提高单次动力响应求解效率和减少动力响应求解次数两个方面提高了车轨系统动力可靠度求解效率。应用高效的 ARMA 方法获得了随机轨道不平顺空间样本。轮轨相互作用模型详细考虑了实际轮轨型面的影响, 求解了非线性的轮轨接触几何关系和轮轨蠕滑力。

算例给出了 CRH2 新造动车组在直线轨道上的车辆横向平稳性指标大于 2.5 和通过 800 m 半径曲线轨道段的车轮脱轨系数大于 0.8 的失效概率分布曲线。与 DMCS 对比结果表明, 本文方法仅需少量样本即可获得与 5 000 次 DMCS 同样精度的计算结果, 验证了本文方法的计算精度和效率。同时研究了不同波长范围内的随机轨道不平顺对车辆系统动力可靠度的影响, 获得了与已有研究文献较为一致的规律, 进一步验证了本文方法的正确性。

参考文献:

[1] HAIGERMOSER A, LUBER B, RAUH J, *et al.* Road and track irregularities: measurement, assessment and simulation [J]. **Vehicle System Dynamics**, 2015, **53**(7,SD):878-957.
[2] PERRIN G, DUHAMEL D, SOIZE C, *et al.* Quantification of the influence of the track geometry variability on the train dynamics [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2015, **60-61**: 945-957.
[3] PERRIN G, SOIZE C, DUHAMEL D, *et al.* Track irregularities stochastic modeling [J].

- Probabilistic Engineering Mechanics**, 2013, **34**:123-130.
- [4] XU Lei, ZHAI Wanming. A new model for temporal-spatial stochastic analysis of vehicle-track coupled systems [J]. **Vehicle System Dynamics**, 2017, **55**(3):427-448.
- [5] XU Lei, ZHAI Wanming. 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.
- [6] ZHU Yan, LI Xiaozhen, JIN Zhibin. Three-dimensional random vibrations of a high-speed-train-bridge time-varying system with track irregularities [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit**, 2016, **230**(8):1851-1876.
- [7] ZENG Zhiping, ZHAO Yangang, XU Wentao, *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.
- [8] MOHAMMADZADEH S, SANGTARASHHA M, MOLATEFI H. A novel method to estimate derailment probability due to track geometric irregularities using reliability techniques and advanced simulation methods [J]. **Archive of Applied Mechanics**, 2011, **81**(11):1621-1637.
- [9] CHO T, SONG M K, LEE D H. Reliability analysis for the uncertainties in vehicle and high-speed railway bridge system based on an improved response surface method for nonlinear limit states [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2010, **59**(1/2):1-17.
- [10] ENGELUND S, RACKWITZ R. A benchmark study on importance sampling techniques in structural reliability [J]. **Structural Safety**, 1993, **12**(4):255-276.
- [11] TEE K F, KHAN L R, LI Hongshuang. Application of subset simulation in reliability estimation of underground pipelines [J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2014, **130**:125-131.
- [12] WANG Yu, CAO Zijun, AU S K. Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis [J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, **37**(7/8):1015-1022.
- [13] VAHDATIRAD M J, ANDERSEN L V, IBSEN L B, *et al.* Stochastic dynamic stiffness of a surface footing for offshore wind turbines: Implementing a subset simulation method to estimate rare events [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2014, **65**:89-101.
- [14] AU S K, BECK J L. Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis [J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2003, **129**(8):901-917.
- [15] YUAN Jie, ALLEGRI G, SCARPA F, *et al.* Probabilistic dynamics of mistuned bladed disc systems using subset simulation [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2015, **350**:185-198.
- [16] WETZEL C, PROPPE C. Stochastic modeling in multibody dynamics: aerodynamic loads on ground vehicles [J]. **Journal of Computational and Nonlinear Dynamics**, 2010, **5**(3):1-9.
- [17] AU S K, BECK J L. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2001, **16**(4):263-277.
- [18] AU S K, CHING J, BECK J L. Application of subset simulation methods to reliability benchmark problems [J]. **Structural Safety**, 2007, **29**(3):183-193.
- [19] WANG Wei, ZHANG Yahui, OUYANG Huajiang. An iterative method for solving the dynamic response of railway vehicle-track coupled systems based on prediction of wheel-rail forces [J]. **Engineering Structures**, 2017, **151**:297-311.
- [20] ZHAI Wanming, WANG Kaiyun, CAI Chengbiao. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics [J]. **Vehicle System Dynamics**, 2009, **47**(11):1349-1376.
- [21] XIAO Xinbiao, JIN Xuesong, WEN Zefeng. Effect of disabled fastening systems and ballast on vehicle derailment [J]. **Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME**, 2007, **129**(2):217-229.
- [22] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007.
- ZHAI Wanming. **Vehicles-Track Coupling Dynamics** [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [23] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact [J]. **Vehicle System Dynamics**, 1982, **11**(1):1-13.
- [24] MINH N N, MIYATA T, YAMADA H, *et al.* Numerical simulation of wind turbulence and buffeting analysis of long-span bridges [J]. **Journal**

of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, **83**(1):301-315.

[25] SAMARAS E, SHINOZUKA M, TSURUI A. ARMA representation of random processes [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, **111**(3): 449-461.

[26] KNOTHE K, STICHEL S. *Rail Vehicle Dynamics* [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[27] GARG V K, DUKKIPATI R V. *Dynamics of Railway Vehicle Systems* [M]. Toronto: Academic Press Canada, 1984.

[28] 中华人民共和国铁道部. 高速动车组整车试验规范: 铁运[2008]28 号 [S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2008.

Ministry of Railways of the People's Republic of China. Testing of High-speed Electric Multiple Unit on Completion of Construction; No. 28 of Railway Transport [2008] [S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2008. (in Chinese)

[29] 姚建伟. 机车车辆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

YAO Jianwei. *Locomotive and Rolling Stock Dynamics* [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

[30] 高建敏, 翟婉明, 王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究 [J]. *铁道学报*, 2012, **34**(7):83-88.

GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on sensitive wavelengths of track irregularities in high-speed operation [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, **34**(7):83-88. (in Chinese)

[31] 朱志辉, 王力东, 杨 乐, 等. 轨道不平顺短波分量对列车-简支梁桥耦合振动的影响 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, **43**(1):53-60.

ZHU Zhihui, WANG Lidong, YANG Le, *et al.* Effect of short-wavelength components in rail irregularity on the coupled dynamic responses of train and simple-supported bridge [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2016, **43**(1): 53-60. (in Chinese)

Dynamic reliability analysis of vehicle-track coupled systems considering randomness of track irregularities

WANG Wei¹, ZHANG Yahui^{*1}, OUYANG Huajiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Engineering, University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, UK)

Abstract: A solution method for dynamic reliability of vehicle-track coupled systems considering the randomness of track irregularities is presented by combining the wheel-rail force prediction based iterative solution technique with the subset simulation (SS) method. The solution efficiency of system reliability has been improved by improving the solution efficiency and reducing the number of solutions of deterministic responses. Taking a CRH2 new vehicle as an example, the failure probabilities of the lateral ride quality index on the tangent track and the wheel derailment coefficient during curve negotiation exceeding limits are calculated, respectively. The calculation accuracy and the efficiency of the presented method are verified by comparison with the direct Monte Carlo simulation (DMCS). The influence of random track irregularities in different wavelength ranges on the dynamic reliability of vehicle system is also analyzed, and the results are in good agreement with the existing research literatures, which further verifies the correctness of the presented method.

Key words: vehicle-track coupled systems; random track irregularities; dynamic reliability; subset simulation method