

地铁预制轨道结构体系乘坐舒适性可靠度评估

李同宽, 张玄一*, 赵衍刚

北京工业大学建筑工程学院, 北京

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

本文建立了地铁预制板式无砟轨道结构的有限元模型和地铁列车的多体动力学模型, 将两个模型组合成为车-轨耦合模型, 进行了仿真模拟计算, 并根据仿真结果对地铁列车运行过程中的乘坐舒适性进行了可靠度评估。通过结果来看, 相较于正态分布, 地铁列车的竖向振动加速度极值更符合极值分布, 在120 km/h的速度以下的时候, 列车运行过程中乘坐舒适度随列车运行速度的变化不明显, 在当前服役状态下, 地铁运行过程中的可靠性指标符合规范要求, 并表现出较高的安全性和稳定性。但是在超过120 km/h的运行速度之后, 地铁乘坐舒适性具有更高的超越概率, 地铁列车竖向振动加速度有更大的概率超出限值, 可能会影响乘客乘车体验。

关键词

预制轨道结构, 乘坐舒适性, 可靠度评估

Reliability Evaluation of Ride Comfort of Subway Prefabricated Track Structure System

Tongkuan Li, Xuanyi Zhang*, Yangang Zhao

The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

This paper establishes a finite element model of the subway precast slab ballastless track structure and a multibody dynamics model of the subway train. These two models are combined into a

*通讯作者。

文章引用: 李同宽, 张玄一, 赵衍刚. 地铁预制轨道结构体系乘坐舒适性可靠度评估[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1177-1186. DOI: 10.12677/hjce.2025.145126

vehicle-track coupling model, which is used for simulation and calculation. Based on the simulation results, the ride comfort of subway trains during operation is evaluated for reliability. The results show that, compared to the normal distribution, the vertical vibration acceleration extremes of the subway train are more consistent with the extreme value distribution. Below a speed of 120 km/h, the change in ride comfort with respect to the train's speed is not significant. Under the current service conditions, the reliability indices of the subway operation meet the regulatory requirements and exhibit high safety and stability. However, when the operating speed exceeds 120 km/h, the subway ride comfort shows a higher probability of exceeding the limit, and the vertical vibration acceleration of the subway train has a greater likelihood of exceeding the threshold, which may affect the passenger experience.

Keywords

Prefabricated Track Structure, Ride Comfort, Reliability Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为有效应对当前各大城市地铁轨道网络快速、大规模建设的迫切需求,我国地铁借鉴高速铁路的无砟轨道技术,结合地铁轨道施工的特点,将预制无砟轨道结构引入地铁轨道结构,形成了与高速铁路轨道结构类似的地铁预制轨道结构,其同样包括钢轨、扣件系统、预制轨道板、自密实混凝土调整层、限位结构(门型筋+凹槽)、土工布隔离层、弹性垫层及钢筋混凝土基底。随着我国的地铁运行里程、移动速度以及乘坐人数的增加,人们也越来越重视地铁运行过程中的乘坐舒适度。列车运行的舒适性,除了与速度有关外,还与列车结构参数、轨道结构参数、激励等有关,而这些因素均具有随机性,因此采用可靠度评估方法来评估地铁运行过程中乘客乘坐舒适性是一条比较合适的途径。

对于前期地铁预制轨道结构的研究主要集中在尺寸方面,张睿等[1]以北京新机场线时速为 160 km 的要求在高速铁路 CRTSIII 型板式轨道的基础上对道床结构进行了重新设计,使其更适应地铁的运行情况。李俊玺等[2]借鉴我国高速铁路轨道方面的先进技术,对上海市轨道交通 12 号线的预制轨道板技术创新提出了改进意见。刘伟斌等[3]通过总结和分析当前地铁现浇整体道床轨道存在的技术缺陷和施工不足,设计并提出了一种满足地铁运营环境需求的新型板式轨道结构体系。

在关于预制轨道结构的可靠度评估方面,李宇翔等[4]利用 ANSYS 和 SIMPACK 两个软件建立了路基上 CRTSI 型无砟轨道的车-轨耦合系统模型,通过对模型的计算得出动力响应,从而进行了对列车运行安全性和舒适性的可靠度分析。王富伟等[5]则是通过 ANSYS 和 SIMPACK 两个软件建立了桥上 CRTSII 型板式轨道和高速列车的耦合模型,加入轨道不平顺激励之后进行计算得出随机振动响应,从而进行高速列车运行安全性与舒适性的可靠度分析。Zhu 等[6]通过数论方法和谱方法,提出了一种基于概率密度演化方法的高速铁路简支梁桥-轨道系统地震后运行可靠性评估方法。Li 等[7]根据脱轨系数和车轮卸载率,建立了无砟轨道的适用性极限状态函数,评估了无砟轨道结构的服役可靠性。

本文选择地铁车辆与预制板式无砟轨道作为研究对象,重点围绕地铁运行中的乘坐舒适性可靠度问题开展深入研究与分析。本文采用有限元软件 ANSYS 与多体动力学软件 SIMPACK 建立车-轨耦合模型,考虑轨道不平顺的随机性,结合可靠度理论,对地铁列车运行过程中的乘坐舒适性的可靠度进行评估。

2. 车 - 轨耦合模型

2.1. 轨道模型

本研究中，地铁预制板式无砟轨道有限元模型是通过 ANSYS APDL 参数化建模语言建立的。因为地铁预制轨道结构是借鉴高铁 CRTSIII型无砟轨道的结构衍生出来的新型轨道结构，因此同高铁无砟轨道类似，结构构件主要包括钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板、土工布隔离层。钢轨类型为标准型 CHN60 轨；轨道板长度为 4700 mm，宽度为 2300 mm，厚度为 200 mm，混凝土强度等级为 C50；自密实混凝土强度等级为 C35，厚度为 80 mm；底座板混凝土强度等级为 C35，板内对称布置两个长 0.7 m，宽 0.4 m，高 0.08 m 的凹槽，与尺寸相同的自密实混凝土凸台相互贴合，实现结构的限位功能。轨道结构整体模型与各部分模型示意图如图 1 所示。

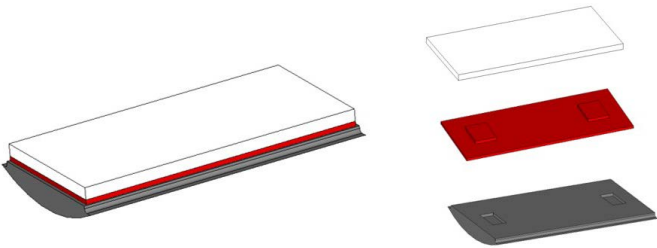


Figure 1. Rail section diagram and track structure model diagram
图 1. 钢轨截面图与轨道结构模型图

2.2. 车体模型

本文使用 SIMPACK 软件进行地铁车辆模型的建立，城市轨道交通车辆属于一个高度复杂的系统，包括车厢、车轴、车轮、转向架等众多部件。在建立动力学模型时，通常需忽略对整体系统影响较小或无明显作用的因素。通过对城市轨道交通车辆各组成结构连接方式的分析，可以采用铰接、约束及力元等形式表达不同结构之间的连接关系，从而形成城市轨道交通车辆动力学的拓扑图[8]。拓扑图如图 2 所示。车辆的前转向架和后转向架是完全相同的，四个轮对也是完全相同的，因此建模的时候先建立轮对的模型，再建立转向架的模型，之后将转向架和两个轮对封装成一个子结构，再进行与车体模型的连接。本文所采用的车体模型以地铁 A 型车为原型，建立的轮对、转向架与车体模型如图 3 所示。

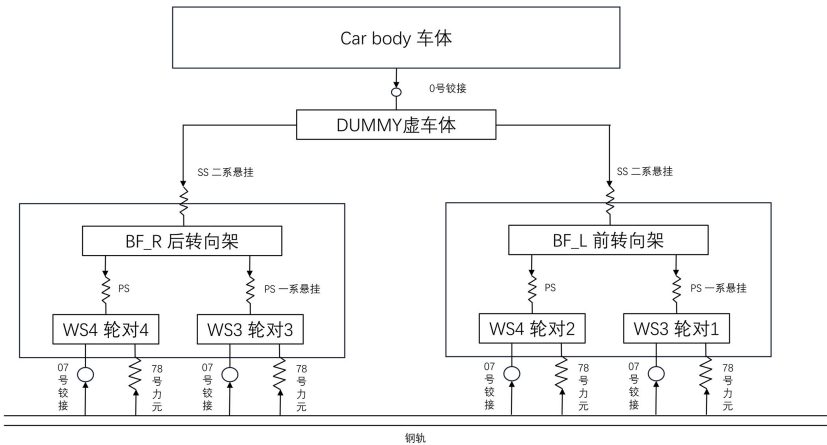


Figure 2. Topology diagram of the dynamics of subway rail vehicles
图 2. 地铁轨道车辆动力学拓扑图

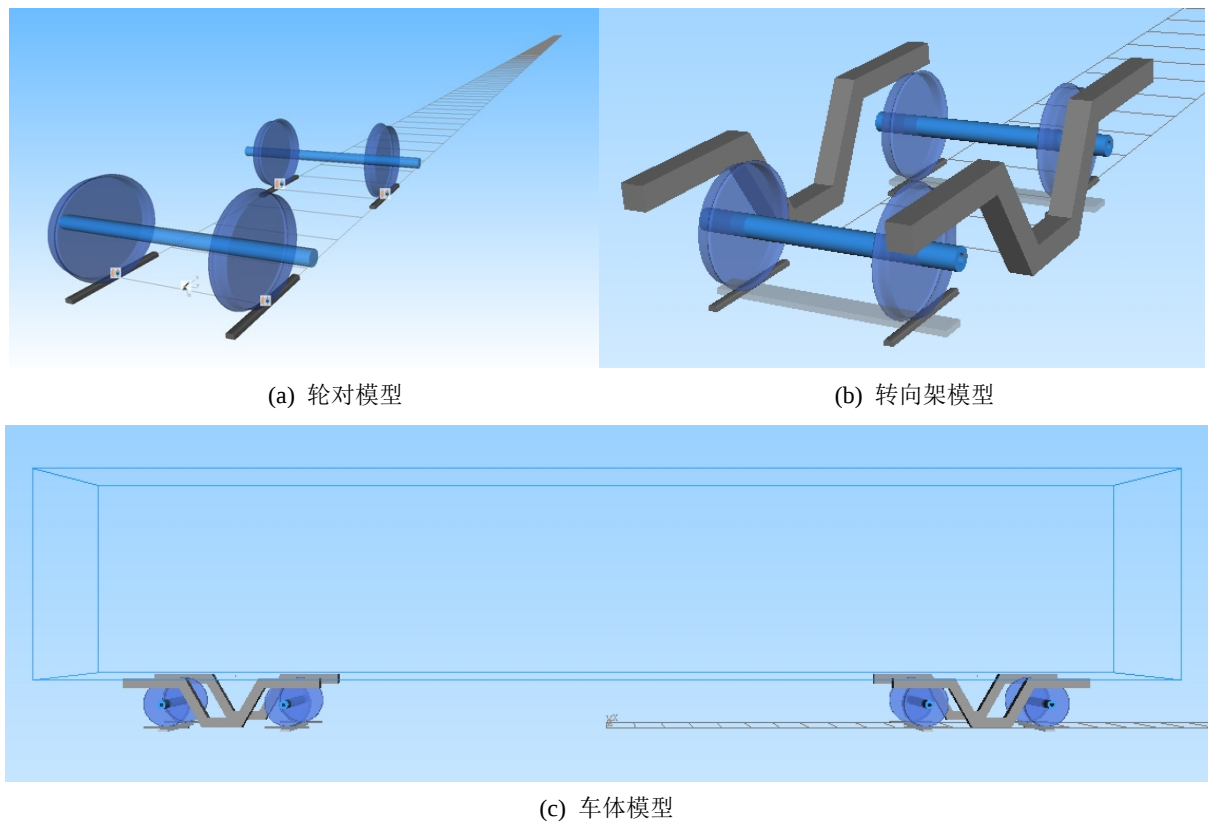


Figure 3. Wheelset, bogie and vehicle body model

图 3. 轮对、转向架与车体模型

2.3. 车 - 轨耦合模型

本文采用 SIMPACK 软件内置的柔性轨道模块进行车轨耦合分析, 通过将轨道结构柔性体信息(*.FBI 文件)导入求解器, 并与车辆动力学模型联合求解。具体实现中, 车辆与轨道分别建模为两个独立系统, 在求解过程中采用交替迭代的方式进行分析。车辆系统的动力响应与轨道系统的柔性特征信息通过轮轨接触的离散点实现数据交换, 包括位移、速度以及接触力。每个积分步内, 车辆与轨道模型独立计算, 并反复迭代直至两系统所有自由度的计算误差达到预定的收敛标准, 然后再继续进行下一积分步。该方法无需显式将轨道结构作为柔性体加入整体模型, 轨道特征仅通过 FBI 文件导入, 简化了模型建立过程, 提升了求解效率, 适用于车辆 - 轨道系统的耦合振动分析。

车 - 轨耦合模型如图 4 所示:

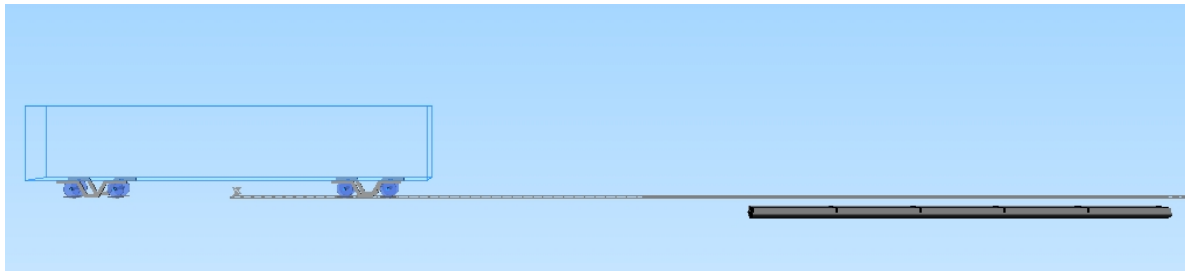


Figure 4. Vehicle-rail coupling model

图 4. 车 - 轨耦合模型

3. 乘坐舒适性可靠度分析

3.1. 可靠指标的选取

车辆运行平稳性通常被用来表示车辆的振动性能，这是衡量车辆运行性能的重要技术指标，而车体的振动加速度就是评价乘客乘坐舒适性最直接的指标，因此，本文决定采用车辆竖向加速度作为乘坐舒适性的评价指标。

国际上普遍采用平稳性指标来评价轨道车辆的运行性能，其中 Sperling 指标基于大量实验数据制定，主要用于衡量车辆运行品质和乘客乘坐舒适度。Sperling 指标为轨道交通系统的舒适度评价提供了定量分析方法，在车辆设计与优化中具有重要应用价值，平稳性指标 W 由下式表示：

用于运行品质的评价指标

$$W = \sqrt[10]{\frac{a^3}{f}} \times 0.896 \quad (1)$$

用于舒适度的评价指标

$$W = \sqrt[10]{\frac{a^3}{f} F(f)} \times 0.896 \quad (2)$$

式中： a ——振动加速度(cm/s^2)

f ——振动频率(Hz)

$F(f)$ ——与振动频率有关的修正系数，根据经验得出，见表 1。

Table 1. Correction parameters

表 1. 修正系数

$f = 0.5 \sim 5.9 \text{ Hz}$	$F(f) = 0.325 f^2$
$f = 5.9 \sim 20.0 \text{ Hz}$	$F(f) = 400/f^2$
$f > 20.0 \text{ Hz}$	$F(f) = 1$

3.2. 随机轨道不平顺的生成

目前由于我国还没有建立起统一的不平顺谱密度表达式，对地铁轨道来说美国的五级轨道不平顺谱是最贴近我国实际情况的，因此本文采用美国五级不平顺谱来生成轨道随机不平顺作为轨道激励以方便计算。

美国轨道不平顺谱是一个以粗糙度常数和截断频率表示的偶次函数，其波长范围很广，可以达到 1.521 m~304.8 m，轨道谱的级别分为六级，其功率谱密度表达式如下：

轨道高低不平顺：

$$S_v(\Omega) = \frac{k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \text{cm}^2 \cdot \text{m/rad} \quad (3)$$

轨道水平及轨距不平顺：

$$S_c(\Omega) = S_g(\Omega) = \frac{4k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2)(\Omega^2 + \Omega_s^2)} \text{cm}^2 \cdot \text{m/rad} \quad (4)$$

轨道方向不平顺：

$$S_a(\Omega)=\frac{k\cdot A_v\cdot\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2+\Omega_c^2)}\text{cm}^2\cdot\text{m/rad}$$

(5)

式中： $S(\Omega)$ ——功率谱密度函数； k ——安全系数，一般取 $k=0.25$ ； Ω ——空间角频率； Ω_c 、 Ω_s ——截断频率； A_v 、 A_a ——粗糙度常数。

轨道级别的粗糙度常数和截断频率如表 2 所示。

Table 2. AAR parameters of U.S. orbital spectrum
表 2. 美国轨道谱 AAR 参数

参数		各级轨道的参数值					
符号	单位	6	5	4	3	2	1
A_v	$\text{cm}^2/\text{rad}/\text{m}$	0.0339	0.2095	0.5376	0.6816	1.0181	1.2107
A_a	$\text{cm}^2/\text{rad}/\text{m}$	0.0339	0.0762	0.3027	0.4128	1.2107	3.3634
Ω_s	rad/m	0.4380	0.8209	1.1312	0.8520	0.9308	0.6046
Ω_c	rad/m	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245

本研究采用 MATLAB 编程实现了路面不平顺谱的模拟，基于标准的功率谱密度(PSD)函数，生成了路面随机激励信号。程序根据给定的车速、波长区间和路面谱特征参数，首先在频域内构建指定波段范围内的不平顺功率谱密度曲线；然后，为了得到时域的随机路面不平顺信号，引入随机相位并执行反傅里叶变换(IFFT)。随机相位的生成首先需要随机生成一个介于 0 和 2π 之间的数值，这个值代表了每个频率点的相位，这个相位是从均匀分布中随机选取的。接着，通过余弦和正弦函数将生成的相位转化为复数形式，复数的实部是相位的余弦值，虚部是相位的正弦值。最后，将这个复数形式的相位与对应频率点的振幅进行相乘，得到包含振幅和相位信息的复数谱。同时，利用频谱分析方法(Welch 法)对生成的时域信号进行验证，与理论谱进行对比分析，以确保仿真结果的准确性和可靠性。最终输出了路面不平顺的位移信号和相应的速度信号，为后续车辆振动响应分析提供输入基础。生成的轨道高低不平顺和水平不平顺如图 5 和图 6 所示。

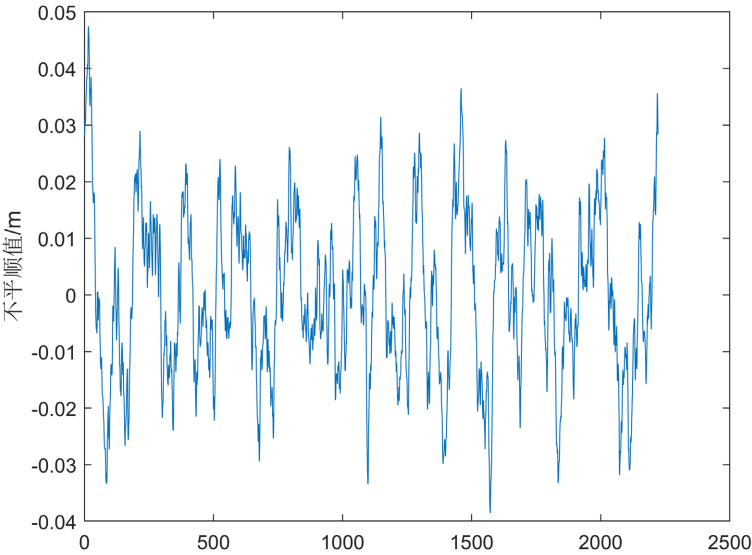


Figure 5. Uneven track height
图 5. 轨道高低不平顺

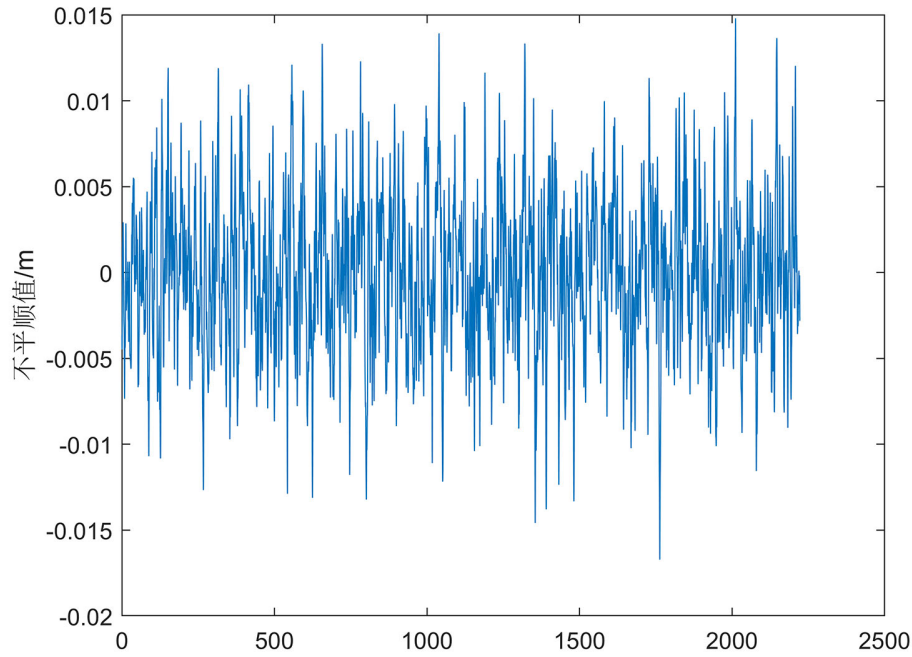


Figure 6. Uneven track level
图 6. 轨道水平不平顺

3.3. 基于尾部修正极值分布的非平稳随机激励下结构动力可靠性分析

Weng 等[9]提出的动力可靠度方法是非常适合本文的研究内容的, 该方法可以实现对结构在非平稳随机激励作用下小概率失效事件的高效、精确评估, 其计算方法如下:

首先通过随机过程仿真法生成非平稳随机激励的样本函数,

$$f_j(t) = g(t) \sqrt{2} \sum_{i=1}^m \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega} \cos(\omega_i t + \theta_{i,j}), \quad j=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

之后进行结构动力响应分析, 获得结构极值响应的样本数据,

$$Z_i = \max_{t \in [0, T]} |Y_i(t)|, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

利用核密度估计(KDE)初步估计极值分布的概率密度函数,

$$f_z^{KDE}(z) = \frac{1}{N \sqrt{2\pi w^2}} \sum_{i=1}^N \exp \left[-\frac{(z - z_i)^2}{2w^2} \right] \quad (8)$$

提出的 EVD 模型分为主体区域和尾部区域。

主体区域(截断 - 偏移广义对数正态分布, SGLD)表达式为:

$$f_z(z) = \frac{\alpha}{z-b} \exp \left[-\frac{1}{r\sigma^r} \left| \ln \left(\frac{z-b}{\theta} \right) \right|^r \right], \quad b < z \leq z^* \quad (9)$$

尾部区域(单调指数模型)表达式为:

$$f_z^T(z) = -\ln(10) [A_1 A_2 \exp(A_1 z) + A_3] \cdot 10^{A_2 \exp(A_1 z) + A_3 z + A_4}, \quad z > z^* \quad (10)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为尾部分布模型的参数, 通过最小二乘法确定。

完整的 EVD 表达式为

$$f_z(z) = \begin{cases} \frac{\alpha}{z-b} \exp \left[-\frac{1}{r\sigma^r} \left| \ln \left(\frac{z-b}{\theta} \right) \right|^r \right], & b < z \leq z^* \\ -\ln(10) [A_1 A_2 \exp(A_1 z) + A_3] \cdot 10^{A_2 \exp(A_1 z) + A_3 z + A_4}, & z > z^* \end{cases} \quad (11)$$

最后通过下面的公式进行可靠度(失效概率)的计算

$$P_f = \int_{\delta}^{+\infty} f_z(z) dz \quad (12)$$

3.4. 模型仿真计算结果

生成了 700 条轨道不平顺波分别对列车运行速度为 60 km/h、80 km/h、100 km/h 和 120 km/h 的列车运行速度进行了 700 次的计算。在获得了四种不同运行速度下的计算结果统计样本之后,使用可靠度计算方法进行分布的模拟,四种速度下的分布模拟情况如图 7 所示。由图 7 可知,极值分布模拟的情况良好。

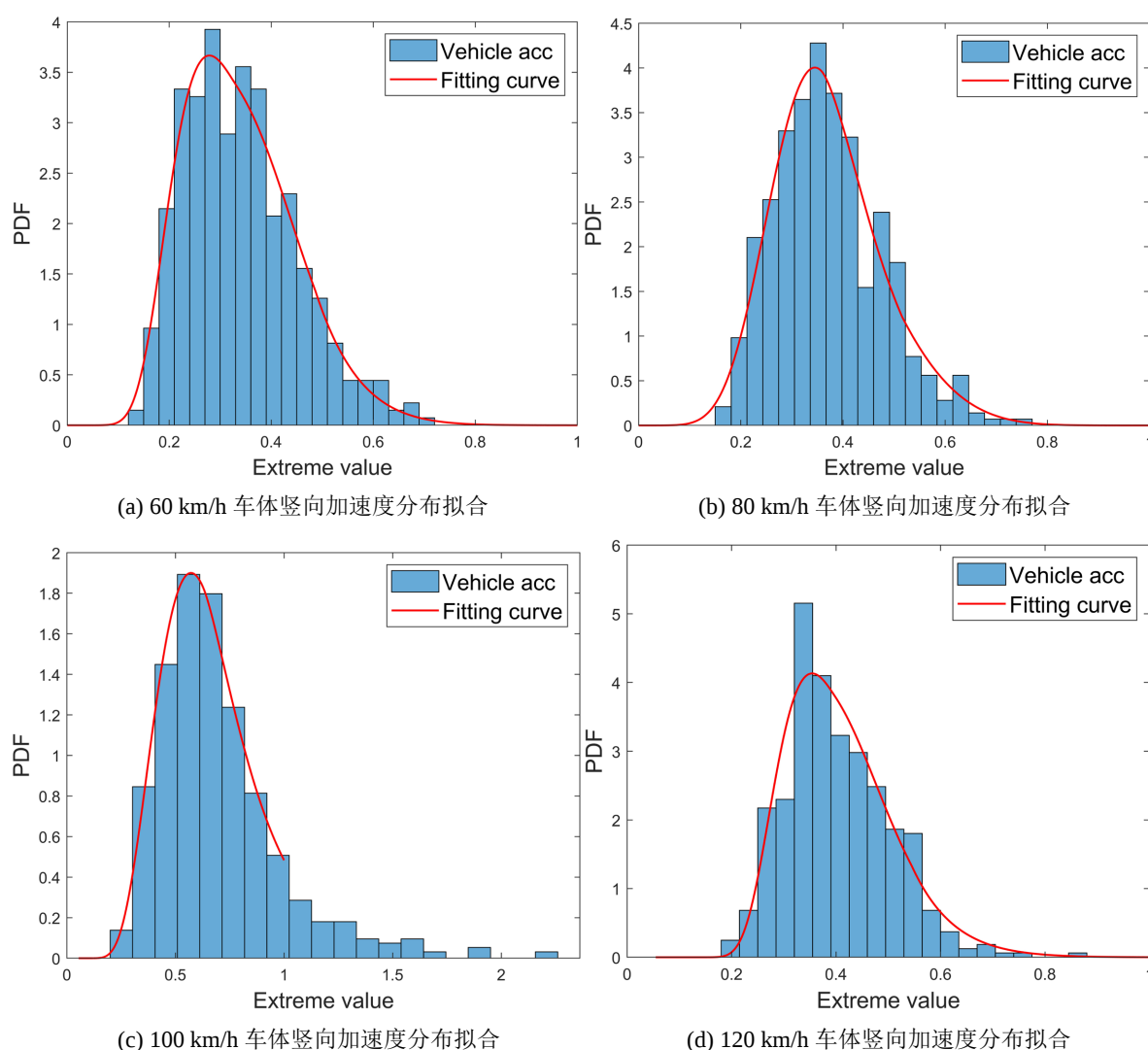


Figure 7. Fitting of peak distributions for vertical acceleration of vehicle body at different velocities

图 7. 不同速度下车体竖向加速度峰值分布拟合

由本章开头可靠度指标的选取, 通过 Sperling 指标确定了车体竖向加速度峰值限值为 0.83 m/s^2 , 则乘坐舒适性极限状态函数为:

$$Z = 0.83 - S_{\text{车辆竖向加速度峰值}} = 0 \quad (13)$$

根据式 12 对式 13 进行计算, 所计算出的超越概率如表 3 所示。

Table 3. Exceedance probabilities at different train operating speeds

表 3. 不同列车运行速度下的超越概率

运行速度	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
超越概率	2.1×10^{-4}	1.8×10^{-4}	3.8×10^{-4}	1.4×10^{-3}

4. 结论

本文开展了随机轨道不平顺激励下地铁预制轨道结构体系乘坐舒适性可靠度研究。具体包括: 建立了地铁预制板式无砟轨道结构有限元模型, 建立了地铁车辆多体动力学模型, 并将两个模型进行组成成为车-轨耦合模型。通过软件随机生成轨道不平顺波作为激励导入模型进行计算, 对模型计算的结果响应进行分析。采用动力可靠度评估方法评估了不同运行速度下的乘坐舒适性可靠度。研究的主要结论如下:

(1) 相较于正态分布, 地铁列车的竖向振动加速度极值更符合极值分布, 之前对于乘坐舒适性的可靠度研究对于模型的结果响应都是使用正态分布进行概率分布拟合, 相较于现实情况来说, 极值分布更贴合实际, 本文使用的方法更能精准地计算乘坐舒适性的可靠度。

(2) 在 120 km/h 的速度以下的时候, 列车运行过程中乘坐舒适度随列车运行速度的变化不明显, 在当前服役状态下, 地铁运行过程中的可靠性指标符合规范要求, 并表现出较高的安全性和稳定性。但是在超过 120 km/h 的运行速度之后, 地铁乘坐舒适性具有更高的超越概率, 地铁列车竖向振动加速度有更大的概率超出限值, 可能会影响乘客乘车体验。在实际的地铁列车运行中, 对于运行速度超过 120 km/h 的地铁列车的轨道要进行及时检修。

(3) 本研究的结论基于地铁列车的竖向振动加速度, 主要适用于中高速范围内(特别是 120 km/h 以下)的地铁系统, 对于其他类型的轨道交通工具(如高速列车)或不同城市的地铁系统, 可能需要进行适当的调整和验证。同时, 极值分布在不同地区、不同运营条件下的适用性需要进一步的实地数据验证。尽管本文提出的 120 km/h 速度阈值为地铁系统的一个关键参考, 但实际应用中应考虑不同车型、轨道条件和运营环境对舒适性和安全性的影响。因此, 建议在不同场景下进行更多的实验和数据收集, 以验证和优化这一速度阈值。

参考文献

- [1] 张睿. 时速 160 km 城市轨道交通预制板整体道床设计与施工[J]. 铁道勘察, 2020, 46(3): 112-116.
- [2] 李俊玺, 曲铭, 曹亮, 王菁. 上海轨道交通 12 号线正线轨道设计要点[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(1): 157-160.
- [3] 刘伟斌, 刘海涛, 赵磊. 地铁运营条件下新型板式轨道设计研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(1): 76-80.
- [4] 李宇翔. 基于 SIMPACK 和 ANSYS 路面上 CRTSI 板式轨道列车运行安全性和舒适性的可靠度分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [5] 王富伟. 桥上 CRTSII 型板式轨道高速列车运行安全性和舒适性的可靠度研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [6] Zhu, Z., Li, X., Gong, W., Zhou, G., Tang, Y. and Zheng, W. (2025) Post-Earthquake Running Reliability Assessment Method of High-Speed Railway Simply Supported Beam Bridge-Track System Based on Probability Density Evolution Method. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463251324242>

- [7] Li, Z., Zhou, Y., Liu, X. and Abdel Wahab, M. (2023) Service Reliability Assessment of Ballastless Track in High-Speed Railway via Improved Response Surface Method. *Reliability Engineering & System Safety*, **234**, Article ID: 109180. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109180>
- [8] 陈龙, 方宇, 潘以成, 杨子墨. 基于 SIMPACK 的城市轨道车辆脱轨安全性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(8): 126-129+133.
- [9] Weng, Y., Lu, Z., Li, P. and Zhao, Y. (2023) Dynamic Reliability Analysis of Structures under Nonstationary Stochastic Excitations Using Tail-Modified Extreme Value Distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **198**, Article ID: 110424. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110424>