

# 路基沉降下地铁车辆 - 轨道耦合动力学分析

付伟华<sup>1</sup>, 乔枫<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>内蒙古铁路投资集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年7月6日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年8月7日

## 摘要

基于车辆 - 轨道耦合动力学理论, 本文创新性地建立了地铁B型车辆 - 浮置板轨道 - 路基耦合系统动力学模型, 重点研究了路基不均匀沉降对行车安全的影响。通过系统参数分析发现: (1) 车辆动力响应随沉降波长呈先增后减趋势; (2) 动力响应与沉降幅值呈正相关, 控制沉降幅值是确保行车安全的关键; (3) 在典型沉降工况(波长15 m/幅值15 mm)下, 车速提升会显著加剧轮轨动态作用、车体振动及轮重减载率。研究成果为城市轨道交通路基沉降防控和列车速度优化提供了重要理论依据。

## 关键词

路基不均匀沉降, 车辆 - 轨道耦合动力学, 地铁振动响应, 动力学分析

# Dynamic Analysis of Metro Vehicle-Track Coupled System under Subgrade Settlement

Weihua Fu<sup>1</sup>, Feng Qiao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Inner Mongolia Railway Investment Group Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 30<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 7<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Based on the theory of vehicle-track coupled dynamics, this study innovatively establishes a coupled dynamic model of a B-type metro vehicle-floating slab track-subgrade system, with a focus on investigating the impact of subgrade differential settlement on operational safety. Parametric analysis reveals that: (1) the dynamic response of the vehicle first increases and then decreases with settlement wavelength; (2) the dynamic response is positively correlated with settlement amplitude,

\*通讯作者。

indicating that controlling the amplitude is critical to ensuring safe operation; and (3) under typical settlement conditions (wavelength of 15 m and amplitude of 15 mm), an increase in train speed significantly intensifies wheel-rail dynamic interaction, car body vibration, and wheel load reduction rate. The findings provide important theoretical support for subgrade settlement control and train speed optimization in urban rail transit systems.

## Keywords

Uneven Subgrade Settlement, Vehicle-Track Coupled Dynamics, Metro Vibration Response, Dynamics Analyze

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

城市轨道交通作为一种高效的公共交通方式, 凭借其速度快、效率高、客运量大、噪音小以及节省土地资源等优点, 保障了人们出行的便利性与安全性。然而, 城市轨道交通在建设 and 运营过程中也面临着诸多问题, 其中路基不均匀沉降问题尤为突出。城市轨道交通线路通常穿越复杂的地质条件, 受到填料不均匀、地基流变及地下水侵蚀等复合作用, 路基容易发生不均匀沉降。这种不均匀沉降可能导致轨道结构变形, 影响轨道的平顺性和稳定性, 进而影响列车的运行安全和舒适性。在极端情况下, 不均匀沉降可能引发轨道断裂、列车脱轨等严重事故, 危及乘客的生命安全。因此, 研究地铁路基不均匀沉降引起的轨道结构变化以及地铁车辆-轨道-路基耦合系统动力学特性, 探究其对列车运行安全和乘客舒适性的影响具有重要意义。

近些年来, 众多学者针对路基不均匀沉降对车辆-轨道耦合系统的动力特性的影响做出较多研究, 主要围绕有砟轨道、高铁无砟轨道和地铁浮置板轨道。

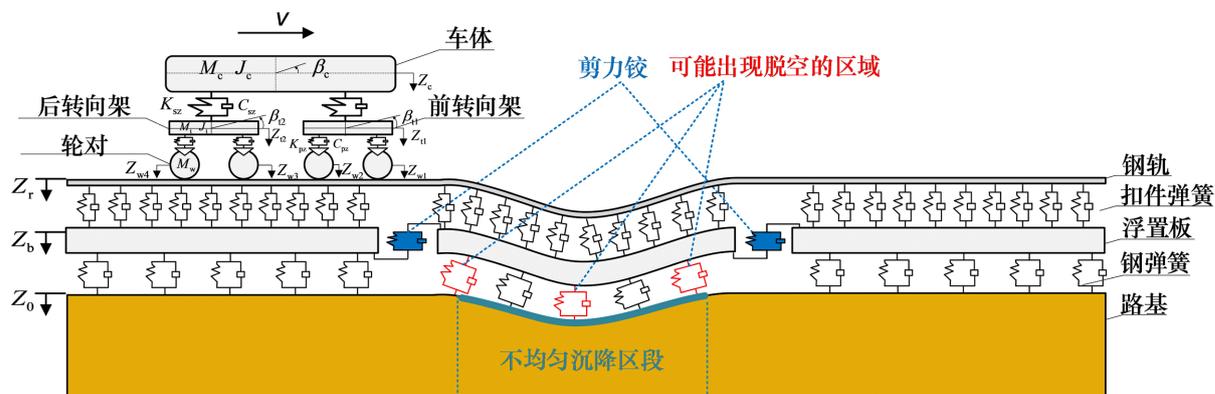
赵志国[1]构建车辆-轨道多体动力学模型, 明确了沉降对安全性与舒适性的影响及其临界阈值; 余翠英[2]等采用 DEM-MFBD 耦合方法建立 2.5 维有砟轨道模型, 从细观角度揭示了轨枕空吊与结构变形机制; 肖源杰[3]等基于多体动力学-有限元耦合模型, 提出迭代算法量化沉降对动力响应的直接影响。张乾[4]与 Sun [5]等分别基于混凝土损伤理论及有限元方法, 研究了沉降对无砟轨道结构损伤和动力特性的影响; 王健壹[6]等进一步建立考虑混凝土损伤与钢筋分布的 CRTS III 型精细模型, 为沉降区轨道维护提供理论支持。张克平[7]等结合地铁车辆, 分析沉降对车辆动力学性能的影响; Zhang [8]等则通过车辆-曲线轨道-隧道耦合模型, 揭示了沉降波形参数与曲线半径对轮轨动力作用的共同影响, 指出在沉降幅值较大或曲线半径较小时, 横向振动与外轮减载更为明显。

总结现有研究可知, 目前关于铁路路基沉降的研究已取得了丰富的成果, 但其中关于地铁车辆-轨道耦合系统的不均匀沉降分析仍较为有限。故本文通过建立考虑路基沉降的地铁车辆-浮置板轨道-路基垂向动力相互作用模型, 采用数值积分算法仿真了地铁车辆运行时, 路基不均匀沉降对地铁车辆-轨道耦合系统动力特性的影响。

## 2. 考虑路基沉降的地铁车辆-浮置板轨道-路基系统动力学模型

本文基于车辆-轨道耦合动力学理论, 建立了考虑路基沉降的地铁车辆-浮置板轨道动力学仿真模型[9], 如图 1 所示。模型包含地铁车辆子系统、浮置板轨道子系统、轮轨非线性相互作用、路轨非线性

相互作用和轨道不平顺。



**Figure 1.** Metro vehicle-floating slab track-roadbed coupled dynamic model considering roadbed settlement  
**图 1.** 考虑路基沉降的地铁车辆-浮置板轨道-路基耦合动力学模型

其中, 车辆模型采用 B 型地铁车, 并将其模拟为 1 个车体的浮沉和点头运动、前后 2 个转向架的浮沉和点头运动和 4 个轮对的垂向运动的共计 10 个自由度的多刚体系统, 分别通过弹簧-阻尼元件进行连接。轨道模型采用减振效果优良的浮置板轨道, 整体结构自下而上分别为路基、钢弹簧、浮置板、扣件弹簧和钢轨, 其中钢轨被看作是两段简支的欧拉梁, 浮置板视为两端自由的欧拉梁, 扣件系统、钢弹簧系统和路基采用离散的弹簧-阻尼元件进行模拟, 路基不均匀沉降作为力的边界条件设置于浮置板轨道与路基的连接处, 可任意调整型式和大小。本文仿真模拟所采用的车辆、轨道和路基的基本参数如表 1 所示。

**Table 1.** Basic parameters of metro vehicle, floating slab track, and subgrade system  
**表 1.** 地铁车辆、浮置板轨道和路基系统基本参数

轨道参数	取值	车辆参数	取值
钢轨弹性模量	$2.1 \times 10^{11}$ Pa	车体质量	36,805 kg
钢轨截面惯性矩	$3.217 \times 10^{-5}$ m <sup>4</sup>	转向架质量	2533 kg
钢轨每延米质量	79.6 kg	轮对质量	1488 kg
扣件间距	0.625 m	轴距	2.3 m
扣件垂向刚度	$3 \times 10^7$ (N/m)	车辆定距	12.6 m
扣件垂向阻尼	$2.5 \times 10^4$ (N*s/m)	车体点头转动惯量	$1.6 \times 10^6$ (kg/m <sup>2</sup> )
浮置板密度	2500 (kg/m <sup>3</sup> )	转向架点头转动惯量	$2.32 \times 10^3$ (kg/m <sup>2</sup> )
浮置板弹性模量	$3.6 \times 10^{10}$ Pa	一系悬挂刚度	$2.768 \times 10^6$ (N/m)
路基弹簧垂向刚度	$1 \times 10^7$ (N/m)	一系悬挂阻尼	$1.5 \times 10^4$ (N*s/m)
路基弹簧垂向阻尼	$5 \times 10^4$ (N*s/m)	二系悬挂刚度	$3.56 \times 10^5$ (N/m)
剪力铰刚度	$1 \times 10^8$ (N/m)	二系悬挂阻尼	$2.5 \times 10^4$ (N*s/m)
路基支承刚度	$1.9 \times 10^8$ (Pa/m)	车轮滚动圆半径	0.42 m

车辆模型和轨道模型通过轮轨相互作用进行耦合, 仅考虑轮轨法向力, 通过 Hertz 非线性接触理论来模拟车辆子系统与轨道子系统之间的相互作用, 其轮轨垂向力为:

$$P_j(t) = \begin{cases} \left[ \frac{1}{G} \delta Z_j(t) \right]^{-3/2}, & \delta Z_j(t) > 0 \\ 0, & \delta Z_j(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

基于上述简化, 可推导出车辆-轨道耦合系统的振动方程, 如式。

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & M_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_v \\ A_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_v & 0 \\ 0 & C_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_v \\ V_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_v & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_v \\ Z_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_v \\ P_t \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, 下角标  $v$ 、 $t$  分别代表车辆系统和轨道系统;  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别表示质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;  $A$ 、 $V$ 、 $Z$  分别为加速度、速度、位移向量;  $P$  为广义载荷向量, 包括重力和轮轨接触力。

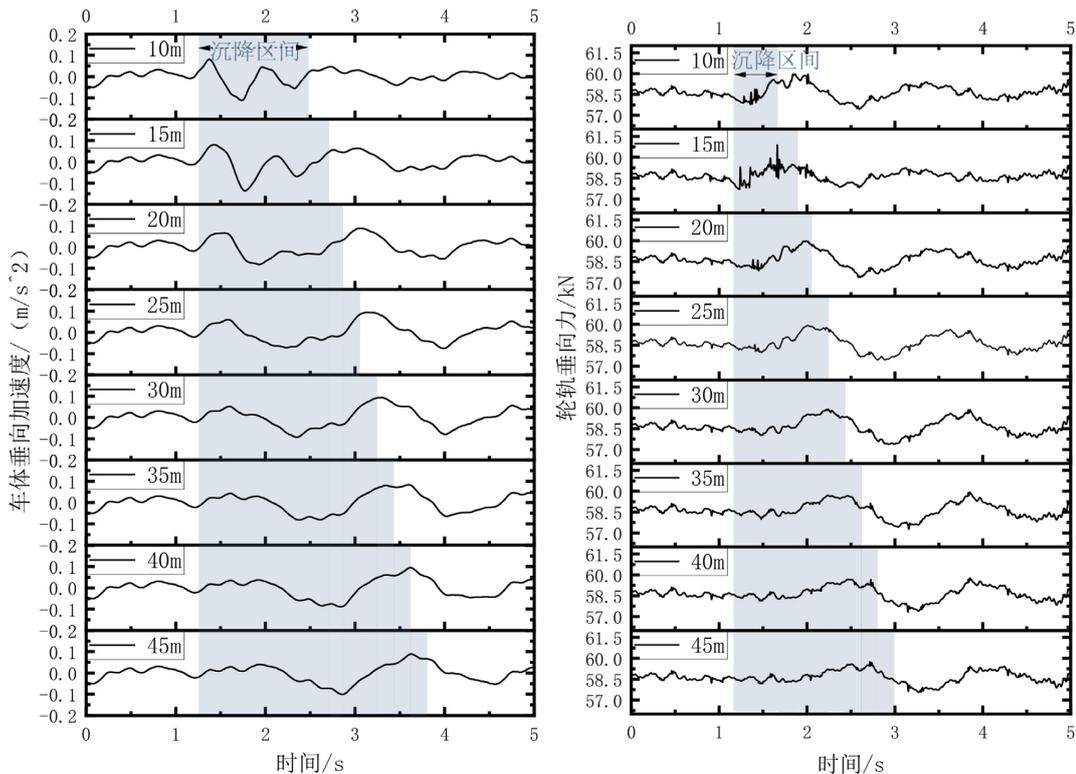
路基不均匀沉降成因复杂、形式多样, 在研究路基不均匀沉降对列车走行性及浮置板轨道结构受力影响时, 国内采用较多的为下凹全波余弦型曲线。本文亦采用该沉降曲线, 通过对路基面各支承节点施加强制位移, 实现对路基不均匀沉降的模拟。

$$Z_0(x) = \frac{A}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) \right) \quad (3)$$

式中,  $Z_0$  为线路某位置路基沉降量,  $x$  为线路纵向某位置处坐标,  $A$  为沉降波幅, 即沉降最大幅值,  $l$  为沉降波长。

### 3. 路基不均匀沉降幅值对地铁车辆 - 轨道耦合系统的影响

#### 3.1. 路基不均匀沉降波长的影响

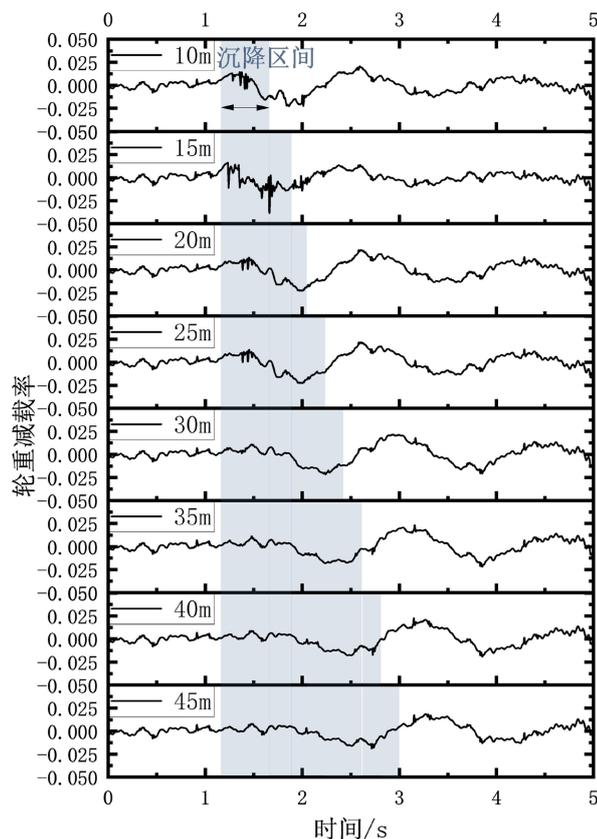


(a) Car body vertical acceleration

(a) 车体垂向加速度

(b) Wheel-rail vertical force

(b) 轮轨垂向力



(c) Wheel load reduction rate  
(c) 轮重减载率

**Figure 2.** Effect of roadbed settlement wavelength on vehicle dynamics  
**图 2.** 路基沉降波长对车体动力学的影响

为研究路基不均匀沉降波长对车辆系统动力学特性影响规律, 选取路基不均匀沉降幅值为 15 mm, 车辆行驶速度为 80 km/h, 分别就不同路基沉降波长工况下车辆系统动力学响应规律进行分析, 假设正方向为竖直向下, 负值表示加速度方向向上。结果如图 2 所示, 其中阴影部分代表沉降区间。

由图 2(a)可以看出, 在同一沉降幅值, 不同沉降波长下车体垂向加速度的曲线变化规律基本一致。结合图 3(a)可知, 沉降波长从 10 m 到 15 m 时, 车体垂向加速度的峰值越来越大; 从 15 m 到 45 m 时, 车体垂向加速度的峰值越来越小, 且峰值降低的速度放缓。上述规律反映了沉降波长的扩大在一定程度上缓和了车辆系统的振动程度, 同时也延长了车辆垂向振动衰减的时间。

图 2(b)为轮轨垂向力随着波长变化的规律, 对应其轮轨垂向力最大值变化规律。随着沉降波长的增大, 轮轨垂向力先增大后减小, 且在 20 m 波长为 8 组实验的最大值。

轮重减载率是根据轮轨力及静轮重计算出的动力学指标, 如图 2(c)所示, 轮轨垂向力在沉降中点达到较小, 车辆在经过路基沉降区域时先后经历满载 - 增载 - 再满载, 对应车辆下坡 - 爬坡 - 驶出沉降区的过程。

### 3.2. 路基不均匀沉降幅值的影响

本节以路基不均匀沉降波长 15 m, 车辆速度 80 km/h, 分析沉降幅值由 10 mm 等间距扩大到 45 mm 时地铁车辆 - 轨道耦合系统动力响应的变化规律, 其他计算参数不变。

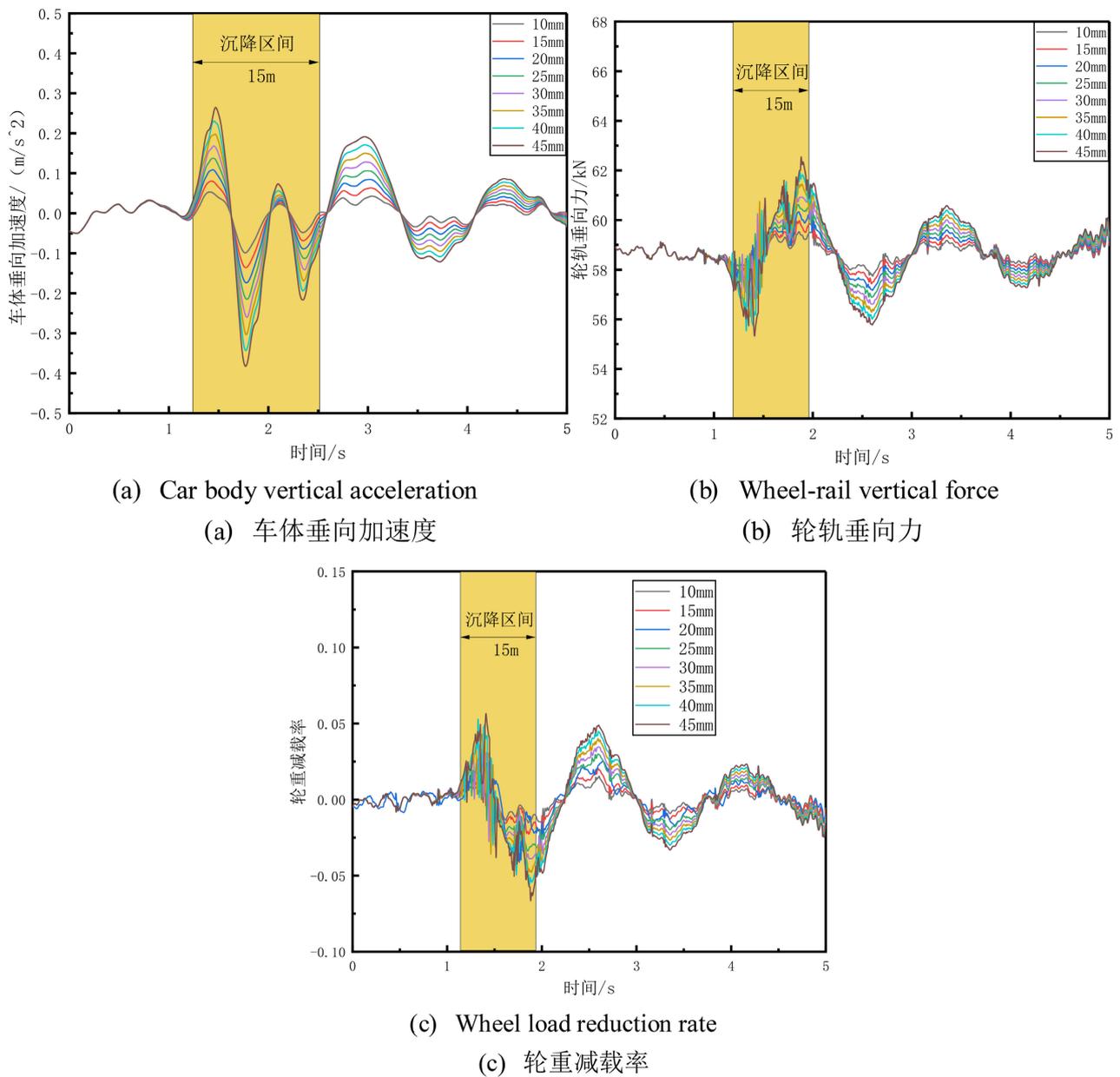


Figure 3. Impact of roadbed settlement amplitude on vehicle dynamics

图 3. 路基沉降幅值对车体动力学的影响

图 3(a)为不同沉降幅值条件下车体垂向加速度时程曲线。由图 3(a)可知, 地铁车辆在尚未进入路基沉降区域时, 受到轨道结构的影响, 车体产生较小的垂向加速度; 当驶入路基不均匀沉降区域后, 车体向沉降最低点运行, 车体位置降低, 产生向下的垂向加速度并逐渐增大, 直到第一轮对运行至沉降最低点, 此时车体垂向加速度达到最大值; 当车辆完全通过最低点, 车体处于抬升状态, 垂向加速度向上且逐渐增大。

随着路基不均匀沉降幅值的增加, 车体垂向加速度峰值增大, 当沉降幅值由 10 mm 增加至 45 mm 时, 加速度变化幅值由  $0.153 \text{ m/s}^2$  增大至  $0.594 \text{ m/s}^2$ , 增幅近 2.88 倍。由此可知, 车体加速度对路基沉降幅值较为敏感。

图 3(b)为不同沉降幅值条件下的垂向轮轨力时程曲线。由图 3(b)可知, 在不均匀沉降最低点, 轮轨垂向力出现最大值, 地铁车辆驶入下坡路段时, 轮轨力出现最小值; 随着沉降幅值由 10 mm 增至 45 mm, 轮轨垂向力峰值由 59.53 kN 增至 61.89 kN, 增幅 4%。

沉降幅值时, 车辆在路基不均匀沉降区段内行驶时的轮重减载率如图 3 所示。当沉降幅值由 10 mm 增加至 45 mm 时, 轮重减载率由 0.0154 增加至 0.0487, 增幅约 2.16 倍。

车体垂向加速度和轮重减载率最大值随路基沉降幅值的变化规律如图 4 所示。由图可见, 随着路基沉降幅值的增大, 车体垂向加速度和轮重减载率均呈明显上升趋势, 且整体变化趋势近似线性。这表明路基不均匀沉降会持续加剧车辆的垂向振动响应与轮轨间的载荷不均, 进而对列车运行的平稳性和安全性构成潜在威胁。在较大沉降幅值下, 两项指标的增幅更加显著, 反映出轨道结构抗沉降性能的临界性增强。

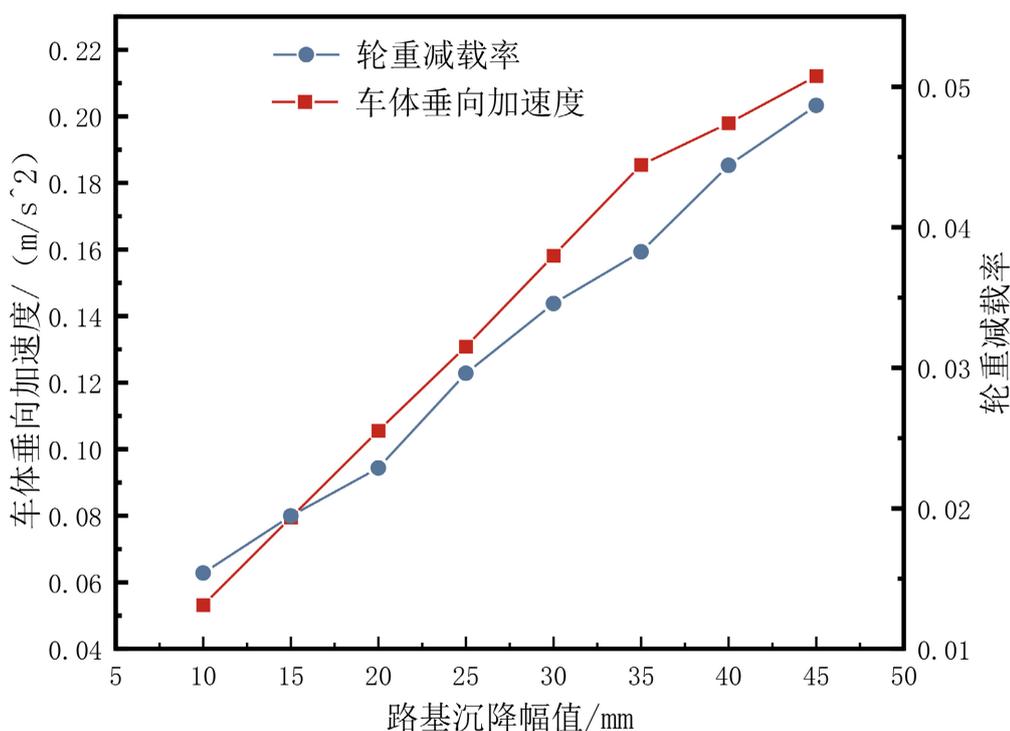
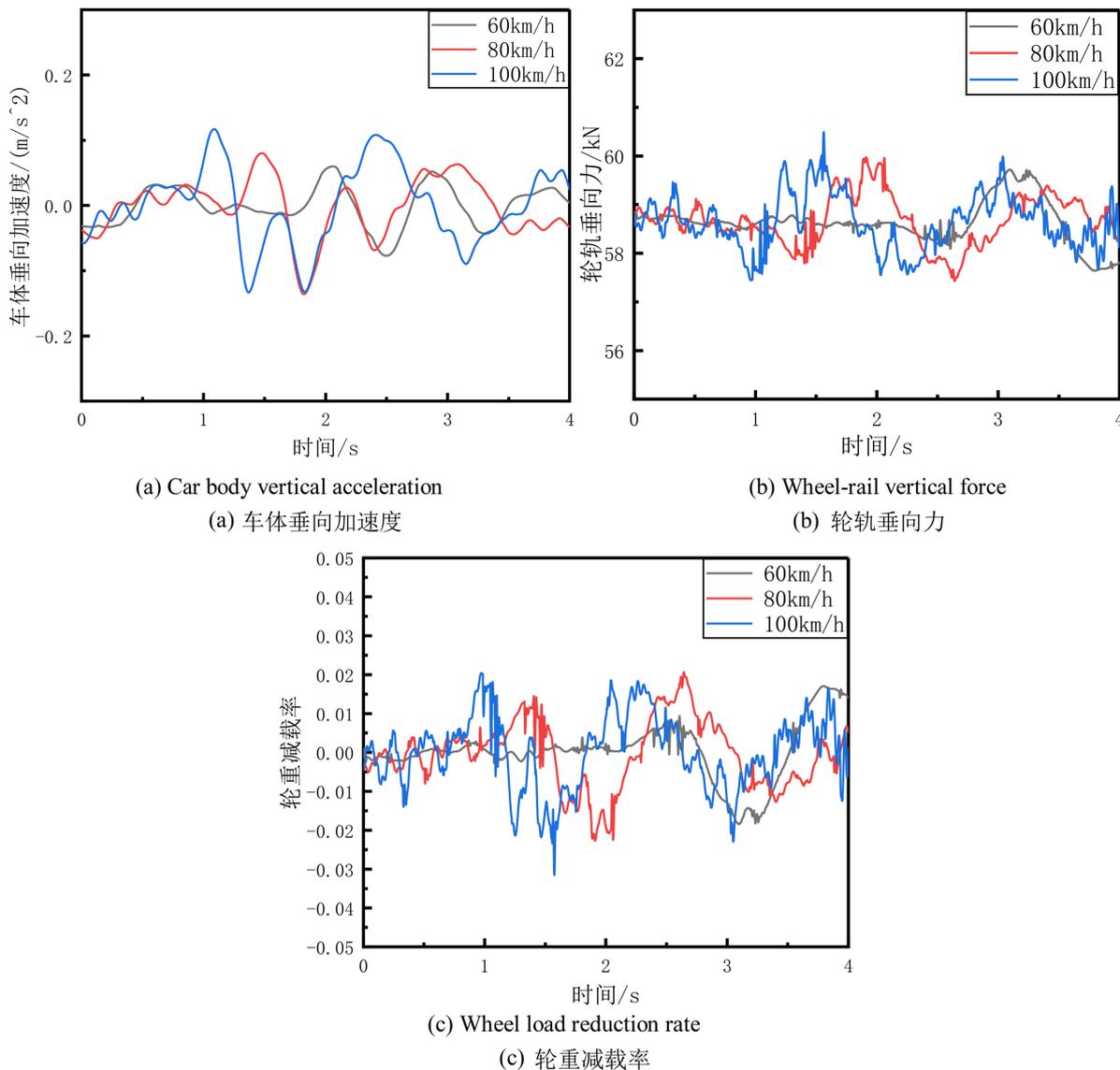


Figure 4. Maximum value of vehicle dynamics under the change of roadbed settlement amplitude  
图 4. 路基沉降幅值变化下对车体动力学的最大值

### 3.3. 车辆运行速度的影响

结合我国地铁车辆实际运行情况, 本节选取 60 km/h、80 km/h、100 km/h 三种速度等级, 分析地铁车辆运行速度对存在路基不均匀沉降时地铁车辆-轨道耦合系统典型的影响, 沉降工况设为 15 mm/15 m。

图 5 所示为不同速度等级下地铁车辆经过不均匀沉降区时引起的动力响应。从图中可以看出, 列车运行速度的提高对车辆动力响应有放大作用, 且在车体振动上更为明显。图 5(a)显示, 在车速由 60 km/h 提高到 100 km/h 的过程中, 加速度变化幅值由 0.14 m/s<sup>2</sup> 增至 0.25 m/s<sup>2</sup>, 且驶出沉降区后加速度的持续波动随速度的提高所需的衰减时间延长, 表明车速越高, 路基不均匀沉降随乘车舒适度的影响越大, 且影响持续的距离越长。图 5(b)中, 车体加速度随车速的变化较为明显, 轮轨垂向力的峰值由 59.72 kN 增至 60.5 kN。



**Figure 5.** Effect of driving speed on vehicle dynamic response  
**图 5.** 行车速度对车辆动力响应的影响

#### 4. 结论

本文在已有研究的基础上，建立了地铁车辆 - 浮置板轨道 - 路基耦合系统动力学分析模型，针对我国城市轨道交通广泛应用的地铁 B 型车辆模型，分析了路基不均匀沉降下的路基不均匀沉降波长和幅值、车辆行驶速度引起的车辆系统动力学响应规律，得出如下主要结论：

(1) 车辆系统动力学响应随路基不均匀沉降波长变化呈先增大后减小的规律。当沉降幅值 15 mm 时，系统响应达到峰值，此时轮轨相互作用最为显著；而波长过短或过长时，由于高频振动被悬挂系统过滤或低频变形被车体惯性抑制，动力学响应均逐渐减弱。

(2) 车辆系统动力学响应随路基不均匀沉降幅值变化呈单调递增规律。当沉降波长为 15 m 时，随着沉降幅值的增大，轮轨动态作用、车体振动加速度等关键动力学指标显著上升。因此，控制沉降幅值对保障行车安全具有决定性作用。

(3) 车轨耦合系统的动力响应与车辆运行速度基本呈正相关, 车速提高则动力响应加剧。

## 基金项目

内蒙古自然科学基金(Grant No. 2024MS05035)。

## 参考文献

- [1] 赵志国. 盾构隧道下穿高速铁路有砟轨道路基不均匀沉降分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(S2): 75-78+99.
- [2] 余翠英, 雷红博, 罗文俊, 马斌. 基于 DEM-MFBD 方法的有砟轨道路基不均匀沉降影响分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 10-18.
- [3] 肖源杰, 周思嘉, 畅振兴, 毛建锋, 华文俊, 徐炳隆, 王卫东, 秦怀兵. 路基不均匀沉降下列车-有砟轨道-路基三维耦合系统动力响应分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(12): 4763-4776.
- [4] 张乾, 蔡小培, 钟阳龙, 王启好, 董博. 无砟轨道路基不均匀沉降区高速列车动力特性[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 133-140.
- [5] Sun, S.W., Xu, Q.Y., Fan, H., Xu, Y., Wang, X. and Zhang, Z.L. (2021) Damage Characteristics and Mechanical Properties of CRTS III Track Structure in Curved Sections under Longitudinal Uneven Subgrade Settlement. *Engineering Failure Analysis*, **163**, Article 108607. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108607>
- [6] 王健壹, 余浩伟, 朱胜阳, 王开云. 基于精细化无砟轨道模型的路基不均匀沉降影响研究[J] 铁道建筑, 2025, 65(1): 25-32.
- [7] 张克平, 石广田, 和振兴. 路基不均匀沉降对地铁 A 型车辆动力学特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2020(39): 165-170.
- [8] Zhang, J.F., Zhu, Z.X., Zhu, X.Y., Meng, Y.C. and Chu, W.H. (2023) Study on the Influence of Uneven Settlement and Small Curve Radius on Metro Train Running Safety and Riding Comfort. *Structures*, **51**, 1806-1820. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.094>
- [9] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.