



# 桥梁类型对中低速磁浮车桥耦合振动影响研究

马亚群<sup>1</sup>, 马卫华<sup>1,2</sup>, 罗世辉<sup>1</sup>, 李苗<sup>1</sup>, 胡俊雄<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为探明桥梁类型对“时速160 km中低速磁浮车辆-桥梁”耦合振动的影响规律, 文章首先建立了考虑主动悬浮与被动导向作用的车辆多体动力学模型, 完成车体模态分析; 其次, 建立25 m简支梁、2×25 m和3×25 m连续梁有限元模型, 进行桥梁模态分析; 随后, 使用UM软件集成车辆、悬浮控制、轨道与桥梁子系统, 构建“车辆-桥梁”耦合动力学模型, 采用实测轨道不平顺作为激励, 对3编组车辆在速度20~160 km/h内通过不同类型的桥梁进行仿真分析。仿真结果表明, 全速度域下各系统动态响应指标均满足规范要求。其中, 车体振动受悬挂模态主导, 桥梁类型对车辆系统动态响应影响较小, 但多跨连续梁下车辆动态响应性能比单跨简支梁更优; 桥梁子系统受桥梁类型影响显著, 单跨25 m简支梁某些相关的动态响应指标高于多跨连续梁。随着车速提升, 车辆子系统响应幅值递增; 桥梁低频振动在车速100 km/h和140 km/h下容易受车辆共振周期激励, 车速与轨道不平顺增大会加剧耦合振动。多跨连续梁下的车辆动力性能更优, 车体垂向最大加速度为0.49 m/s<sup>2</sup>, 平稳性指标最大值为1.81, 悬浮间隙波动未超过4 mm, 桥梁跨中垂向位移最大为L/11211, 均满足规范要求。

**关键词:** 铁路桥梁; 中低速磁浮; 动力学模型; 车辆-桥梁耦合振动; 动力学分析

**中图分类号:** U237

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2026)02-0096-10

## 0 引言

随着城市交通拥堵问题日益严重, 中低速磁浮交通系统作为一种具有舒适性高、转弯半径小、爬坡能力强、噪声污染小等优势的新型轨道交通制式, 在城市及市域轨道交通领域得到了越来越广泛的关注与应用<sup>[1]</sup>。磁浮交通系统通过电磁力实现车辆与轨道的无接触悬浮和导向, 与传统轮轨交通系统在动力学特性上存在显著差异, 尤其在通过桥梁等柔性结构时, “车辆-桥梁”间的动态相互作用成为影响系统性能的核心问题<sup>[2]</sup>。

在中低速磁浮交通系统中, 桥梁作为重要的基础设施, 其结构形式及其特性对车辆运行的安全性与舒适性有着至关重要的影响<sup>[3-4]</sup>。其中, 简支梁桥由于结构简单、施工方便、造价相对较低等优点, 成为中低速磁浮线路常用的桥梁形式<sup>[5]</sup>。然而, 对于相同跨度的简支梁桥与连续梁桥, 不同的结构特征将直接影响桥梁的整体刚度分布、质量分布和动力特性<sup>[6-7]</sup>, 进而对以电磁力为耦合媒介的磁浮车辆运行安全性、平稳性和乘坐舒适性产生复杂影响<sup>[8]</sup>。因此, 系统研究两种不同桥梁类型对“车辆-桥梁”耦合振动的影响, 对完善磁浮交通系统动力学理论和指导工程实践均具有重要意义。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (52402480); 国家博士后科学基金项目 (2024M762698)

**通信作者:** 马卫华, 男, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁浮列车悬浮架设计、磁浮列车动力学研究工作; E-mail: mwh@swjtu.edu.cn

**引用格式:** 马亚群, 马卫华, 罗世辉, 等. 桥梁类型对中低速磁浮车桥耦合振动影响研究[J]. 机电传动, 2026(2): 96-105.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.011.

**Citation:** MA Yaqun, MA Weihua, LUO Shihui, et al. Research on influence of bridge types on vehicle-bridge coupled vibration in medium- and low-speed maglev systems[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 96-105.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.011.

在“磁浮车辆-桥梁”耦合振动研究领域, 国内外学者已开展了大量工作。早期的研究主要集中于悬浮控制系统的设计与稳定性分析, 揭示了控制系统参数对悬浮间隙和系统动态性能的关键作用<sup>[9-10]</sup>。因此, 部分学者开展悬浮控制系统对“车辆-桥梁”耦合振动影响研究。例如, 文献[11]提出一种自适应反推控制方法, 建立了弹性轨道单点磁悬浮系统的非线性动力学模型, 并通过台架试验验证该控制方法的稳定性。文献[12]使用显式时域法对控制系统进行优化研究, 通过对3编组磁浮列车穿越多跨简支梁桥的仿真分析, 结果表明, 该文提出的悬浮控制系统优化方法可使磁浮列车在随机轨道不平顺作用下的悬浮稳定性得到显著提升。

随着研究深入, 学者逐步建立了更为精细的耦合动力学模型, 涵盖了车辆、悬浮控制系统和桥梁结构<sup>[13]</sup>。文献[14]为分析桥梁特性和控制参数对“车辆-桥梁”耦合振动的影响规律, 建立了“磁浮车辆-桥梁-控制系统”耦合动力学模型。文献[15]搭建了一个带有控制的“车辆-桥梁”耦合模型, 车辆悬浮间隙主要受到车速、轨道不平顺和挠跨比的影响, 其中挠跨比的影响尤为显著。文献[16]建立一种带有控制的“车辆-桥梁”耦合模型, 并对其进行振动分析, 评估悬浮系统稳定性。文献[17]分析了不同速度的车辆通过25 m简支梁桥时的桥梁动态特性, 研究表明简支梁的纵向加速度、纵向挠度均随着列车速度的增加而增加。近年来, 中低速磁浮交通系统的动力学研究向高效建模与精准控制发展。在高效建模方面, 向量式有限元法凭借其在非线性耦合系统中的求解优势, 已成功应用于磁浮列车磁力耦合系统的建模与数值分析, 实现了“磁浮-轨道-桥梁”耦合体系的快速、精准求解<sup>[18]</sup>。在悬浮控制方面, 随着误差交叉耦合、滑模协同控制等先进方法的提出, 有效提升了多电磁铁悬浮系统的稳定性与抗干扰能力, 显著改善了磁浮车辆在柔性桥梁上的悬浮响应<sup>[19]</sup>。

针对“车辆-桥梁”耦合振动相关研究, 部分学者探讨了车辆运行速度、轨道几何不平顺、桥梁结构形式、桥梁挠跨比等因素对系统动力响应的影响规律。研究表明, 桥梁的低频振动模态对磁浮车辆的运行平稳性影响显著<sup>[20]</sup>, 而连续梁结构在减小悬浮间隙波动方面通常优于简支梁<sup>[21]</sup>。然而, 现有研究大多聚焦于简支梁或特定跨数连续桥梁的动力响应分析, 而关于2种不同桥梁类型对“时速160 km中低速磁浮车辆-桥梁”耦合系统振动特性影响的系统性对比研究尚显不足。桥梁类型的变化不仅改变了桥梁的自振频率与振型<sup>[22]</sup>, 还可能通过影响车辆在桥梁区段的运行时间和相邻跨间的动力干涉效应<sup>[23]</sup>, 改变整个耦合系统的共振特性和动力响应水平。

基于上述分析, 本文以时速160 km中低速磁浮交

通系统为研究对象, 旨在通过建立一套包含完整的车辆多体动力学模型、精细化电磁悬浮控制系统模型、2种不同桥梁结构有限元模型(简支梁、多跨连续梁)的耦合系统动力学模型, 采用理论分析、多体建模、试验验证和仿真分析相结合的研究方法, 系统研究桥梁类型对“车辆-桥梁”耦合振动的影响规律, 具体分析了2种不同桥梁类型的动力响应特征、车辆运行品质的变化, 揭示其内在联系。本研究成果将为中低速磁浮线路的桥梁设计与选型提供科学依据, 对提升磁浮车辆运行安全性与乘坐舒适性提供技术支持, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 耦合动力学模型

### 1.1 车辆模型

以采用中置式悬浮架技术方案的中低速磁浮车辆为例, 车辆由Mc1、M、Mc2共3节车编组而成, 单节车辆包含5个悬浮架(分别用1#~5#指代), 相邻悬浮架之间通过固定滑台或移动滑台连接, 如图1所示。

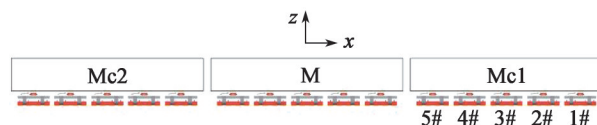


图1 磁浮车辆编组

Fig. 1 Maglev train formation

根据空簧中置式磁浮车辆动力学模型的运动学关系, 基于多刚体动力学理论, 在多体动力学软件中, 通过调用部件几何外形, 定义各部件铰接运动关系和相对位置关系, 并赋予其相关质量、惯量等参数, 完成结构的连接和装配, 从而实现中低速磁浮车辆多刚体动力学建模。图2为单节车的动力学模型示意图, 表1为空簧中置式磁浮车辆主要计算参数<sup>[20]</sup>。

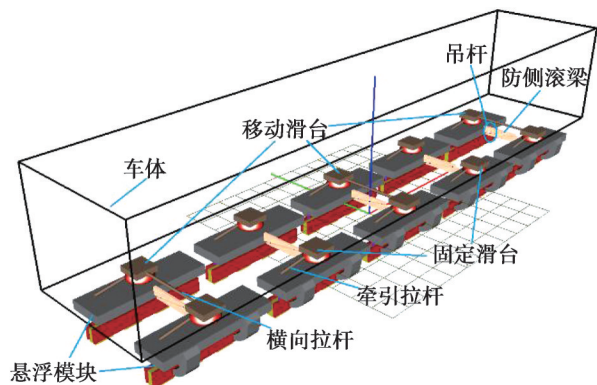


图2 单节车辆动力学模型

Fig. 2 Dynamical model of single car

研究团队使用多体动力学软件进行车体模态分析得知, 车体的振动模态频率大多在2 Hz以下, 具体的车体姿态模态频率如表2所示。

表1 磁浮车辆主要参数

Table1 Main parameters of maglev vehicle

| 参数名称                              | 参数值     |
|-----------------------------------|---------|
| 车体 (AW3) 质量/kg                    | 23 445  |
| 车体绕x轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )   | 19 972  |
| 车体绕y轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )   | 349 411 |
| 车体绕z轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )   | 351 664 |
| 悬浮模块质量/kg                         | 1 225   |
| 悬浮模块绕x轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 72      |
| 悬浮模块绕y轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 914     |
| 悬浮模块绕z轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 908     |
| 防侧滚梁质量/kg                         | 27.5    |
| 防侧滚梁绕x轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 2.28    |
| 防侧滚梁绕y轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 0.12    |
| 防侧滚梁绕z轴的转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 2.23    |
| 额定悬浮间隙/mm                         | 8.5     |
| 轨距/mm                             | 1 860   |
| 电磁铁长度/mm                          | 2 800   |
| 相邻悬浮模块纵向间距/mm                     | 2 880   |
| 空气弹簧横向跨距/mm                       | 1 928   |

表2 车体模态仿真结果

Table2 Modal simulation results of carbody

| 振型   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|------|-------|-------|
| 下心滚摆 | 0.24  | 13.12 |
| 摇头   | 0.37  | 5.08  |
| 点头   | 0.78  | 16.21 |
| 浮沉   | 0.92  | 19.56 |
| 上心滚摆 | 1.18  | 17.52 |

1.2 悬浮控制模型

悬浮力和导向力在磁浮车辆中发挥着承载、导向的重要作用。本文在单个悬浮模块上考虑4个悬浮力元，并对应相关的电磁铁线包数量。由于中低速磁浮车辆未设置独立的导向电磁铁，其导向力由悬浮力的横向分力提供，考虑到后续计算采用U形电磁铁控制模型，且均为直线工况通过。悬浮力元的工作原理是通过传感器测得电磁铁与轨道间的相对位移、速度等信息，并将其反馈给悬浮力元，悬浮力元计算得到对应的作用力，再将其反馈给车辆系统<sup>[24]</sup>。

根据电磁理论，若不考虑导磁体磁阻、电磁回路中漏磁，则电磁力 $F_e$ 可表示为<sup>[25]</sup>

$$F_e = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \cdot \left(\frac{i}{d}\right)^2 \tag{1}$$

式中： $\mu_0$ 为真空磁导率，取 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$  H/m； $N$ 为电磁铁线圈匝数，取 $N=320$  匝； $A$ 为有效磁极面积，取 $A=0.019\ 6\text{ m}^2$ ； $i$ 为电磁铁电流； $d$ 为悬浮间隙。

电磁力本身存在不稳定性，需要通过对悬浮电磁

铁电流进行主动控制来实现稳定悬浮。在实际工程应用中，悬浮间隙与振动加速度通常使用传感器直接测量，但振动速度信号却难以直接获取<sup>[23]</sup>。为此，根据Luenberger观测器理论引入状态观测器<sup>[9]</sup>，推导出式(2)所示的速度信号表达式。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \theta + 2\xi_0\omega_0(d-\delta) \\ \dot{\theta} = a + \omega_0^2(d-\delta) \end{cases} \tag{2}$$

式中： $d$ 、 $a$ 分别为传感器实测的悬浮间隙和垂向振动加速度； $\xi_0$ 、 $\omega_0$ 分别为观测器的阻尼比和特征频率； $\delta$ 、 $\theta$ 为观测的悬浮间隙和垂向振动速度。

进一步通过“位移-速度-加速度”反馈得到目标悬浮电流 $i$ ，其计算公式为<sup>[26]</sup>

$$i = i_0 + k_p(\delta - d_0) + k_d\theta + k_a a \tag{3}$$

式中： $k_p$ 为间隙反馈系数，取 $k_p=6\ 000$ ； $k_d$ 为速度反馈系数，取 $k_d=100$ ； $k_a$ 为加速度反馈系数，取 $=0.2$ ； $i_0$ 为额定悬浮电流，取 $i_0=25\text{ A}$ ； $d_0$ 为额定悬浮间隙。

中低速磁浮车辆导向是通过U形电磁铁与F轨之间发生横向错位时产生的电磁力横向分力进行被动导向的<sup>[27]</sup>。单个电磁铁的横向力 $F_y$ 和垂向力 $F_z$ 可表示为：

$$\begin{cases} F_y = F_e \cdot \frac{2d}{\pi\omega} \cdot \arctan \frac{l}{d} \\ F_z = F_e \left( 1 + \frac{2d}{\pi\omega} + \frac{2l}{\pi\omega} \cdot \arctan \frac{l}{d} - \frac{|l|}{W} \right) \end{cases} \tag{4}$$

式中： $W$ 为单侧磁极宽度，取 $W=28\text{ mm}$ ； $l$ 为横向偏移量值， $l\leq\pm14\text{ mm}$ 。

综合所述，在Simulink中建立单个悬浮控制点模型，如图3所示。

1.3 轨道-桥梁模型

在磁浮桥梁振动中，需综合考虑梁体的弯曲、扭转振动，以及梁体因梁下支座弹性而发生的刚体振动。图4所示的简支梁建模方案能够反映桥梁的实际支撑条件。

本文所涉及的桥梁采用长沙磁浮快线单线简支梁形式，图5为截面尺寸，单跨桥梁系统共有2根轨排，每根（包含轨缝）长为12.5 m，轨缝宽度为30 mm，相邻F轨之间通过I型伸缩接头连接。

为了方便系统集成，本文采用有限元方法对桥梁进行弹性建模，并开展相应的模态分析，如图6所示。

在有限元模型中，桥梁的弹性模量和泊松比分别为34.5 GPa和0.17，F轨和轨枕的弹性模量、泊松比分别为206 GPa和0.30。其中，F轨和桥梁均采用Solid185单元，轨枕采用Shell63单元。图6中仅展示了不同类型桥梁一阶横向模态，其余模态如表3所示。桥梁低阶模态主要表现为整体变形，一阶最大频率值12.66 Hz显然满足《中低速磁浮交通设计规范》(CJJ/T 262—2017)<sup>[28]</sup>中对桥梁竖向一阶固有频率的要求。

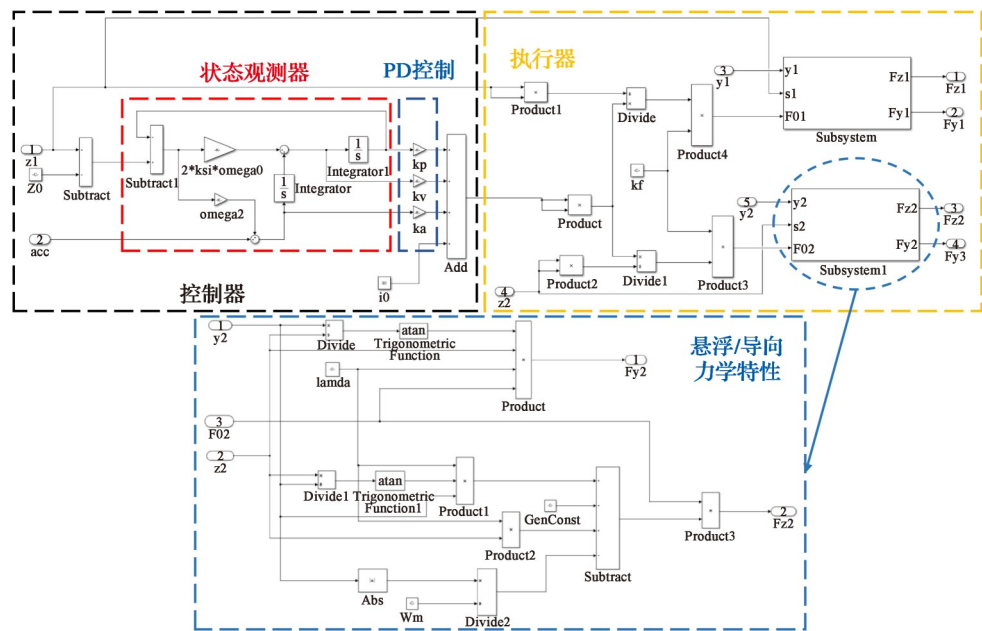


图 3 单个悬浮控制点模型

Fig. 3 Model of single suspension control point

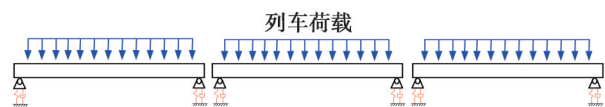


图 4 简支梁建模方案

Fig. 4 Modeling scheme for simply supported beams

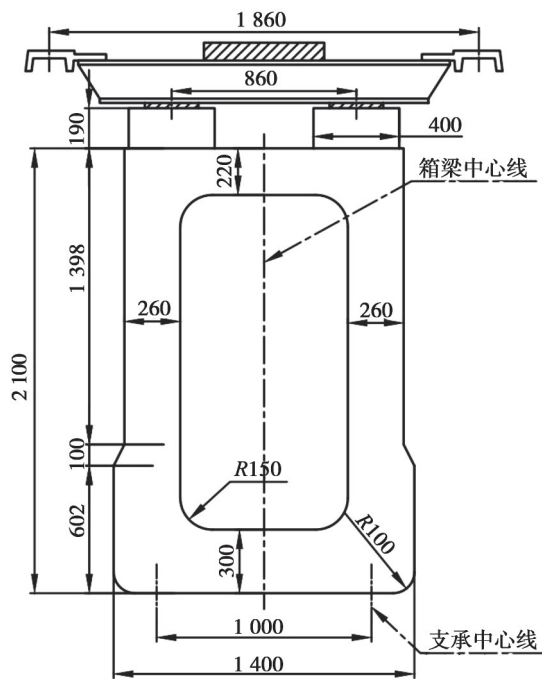
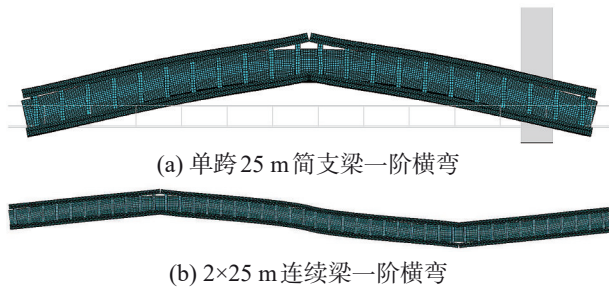


图 5 简支梁截面尺寸

Fig. 5 Sectional dimensions of simply supported beam



(c) 3×25 m 连续梁一阶横弯

图 6 不同桥梁模态振型仿真

Fig. 6 Simulated modal shapes for bridge types

表 3 不同桥梁模态频率

Table 3 Modal frequencies of bridge types

| 桥梁类型       | 振型      | 模态频率/Hz |
|------------|---------|---------|
| 25 m 简支梁   | 一阶横弯    | 5.51    |
|            | 一阶竖弯    | 8.92    |
|            | 二阶竖弯    | 17.28   |
|            | 二阶横弯    | 22.31   |
| 2×25 m 连续梁 | 一阶反对称横弯 | 5.57    |
|            | 一阶正对称横弯 | 7.22    |
|            | 一阶反对称竖弯 | 8.80    |
|            | 一阶正对称竖弯 | 12.66   |
| 3×25 m 连续梁 | 一阶正对称横弯 | 5.45    |
|            | 一阶反对称横弯 | 6.33    |
|            | 一阶正对称竖弯 | 8.11    |
|            | 一阶反对称竖弯 | 10.06   |

1.4 模型耦合及验证

通过子结构建模方法, 分别建立车辆子系统、桥梁子系统和悬浮控制子系统, 使用多体动力学软件UM 集总各子系统, 建立了包含完整悬浮控制系统和精细化轨道结构的“3 编组空簧中置式磁浮车辆-桥梁”耦合动力学模型, 如图 7 所示。目前, 我国尚无统一的中低速磁浮轨道不平顺谱, 故本文后续仿真采用图 8 所示的长沙磁浮快线实测轨道不平顺谱<sup>[29]</sup>。

本文研究对象为轨距 1 860 mm 的磁浮车辆, 由于暂无该轨距车辆线路试验数据, 因此建立“轨距 1 900 mm (悬挂) 中置式中低速磁浮车辆-桥梁”耦合动力

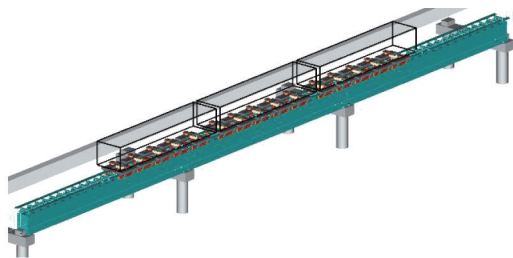


图7 车辆-桥梁耦合动力学模型

Fig. 7 Vehicle-bridge coupled dynamical model

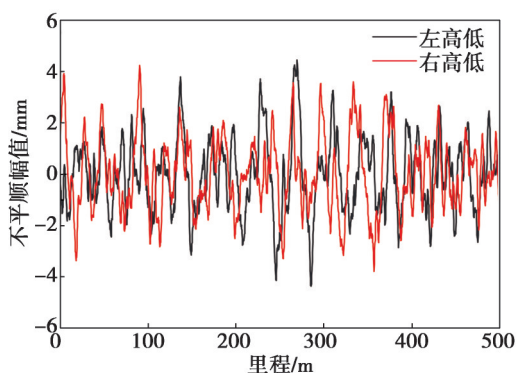
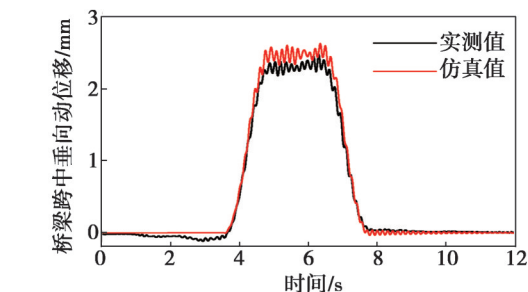


图8 轨道不平顺

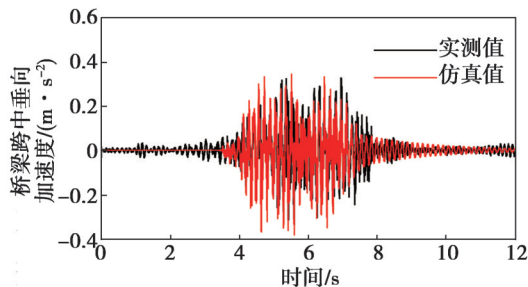
Fig. 8 Track irregularity

学模型, 并采用上海临港试验线实测结果对本文采用的建模方法进行验证。

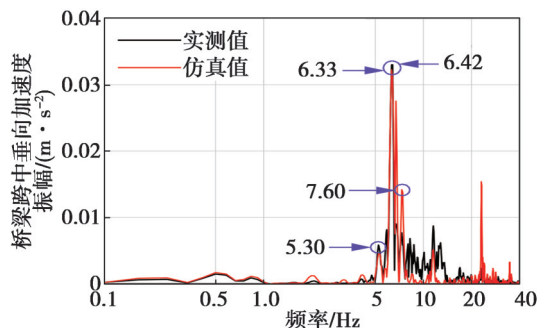
图9为编组车辆以60 km/h通过25 m简支梁时桥梁动态响应的实测结果与仿真时域、频域结果的对比。由图9(a)可知, 桥梁跨中垂向动位移实测结果与仿真曲线的上升与下降趋势基本相同, 幅值也较为接近。由图9(b)和图9(c)可知, 桥梁跨中垂向加速度的实测结果与仿真得到的时域结果较为接近, 实测和仿真得到的垂向加速度主频分别为6.42 Hz和6.33 Hz, 对应桥梁系统的一阶垂弯频率7.40 Hz。此外, 仿真结果还存在5.30 Hz与7.60 Hz的主频, 其中5.30 Hz这一频率由轨



(a) 桥梁跨中垂向动位移时域图



(b) 桥梁跨中垂向加速度时域图



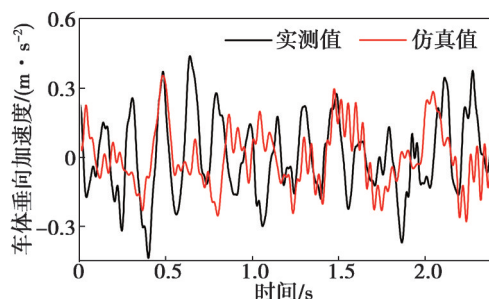
(c) 桥梁跨中垂向加速度频域图

图9 桥梁动态响应实测与仿真对比

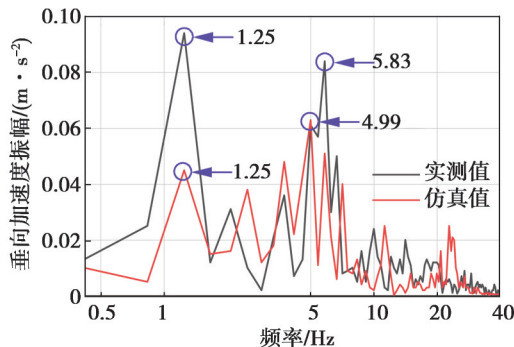
Fig. 9 Comparison between measured and simulated bridge dynamic responses

道不平顺导致, 而7.60 Hz这一频率产生的原因主要是在建模时车辆与轨道间的电磁力是通过离散化的悬浮力元来模拟的, 当车辆以60 km/h的速度通过柔性桥梁时会产生相应的通过频率。

图10为编组车辆以60 km/h通过25 m简支梁时车辆动态响应实测结果与仿真时域、频域结果的对比。



(a) 车体垂向加速度时域图



(b) 车体垂向加速度频域图

图10 车辆动态响应实测与仿真对比

Fig. 10 Comparison between measured and simulated vehicle dynamic responses

由图10可知, 仿真得到的车体垂向加速度波形与实测波形接近, 整体变化趋势类似, 仿真结果幅值比实测结果略大一些。仿真结果幅值与实测结果不一致, 认为是在试验过程中存在环境振动、轨道基础不均匀沉降、传感器安装误差等随机因素所导致, 而仿真模型中未考虑此类随机干扰, 并且建模过程中的简化处理和理想化假设均可能导致实测值与仿真值出现一定偏差, 但实测结果与仿真得到的加速度主频较为接近, 说明编组车辆的动力学模型能够准确反映车体的低频

振动特性。

综上所述,通过仿真计算得到的“车辆-轨道-桥梁系统”的动态响应与线路试验实测结果吻合良好,验证了本文建立的刚柔耦合动力学模型的准确性,说明本文采用的“车辆-桥梁”耦合模型具有较高精度。

2 动力学评定指标

对于车辆系统而言,旅客的乘坐舒适度是评价车辆系统运行性能的重要指标,以车体振动加速度和平稳性指标进行评价,在《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)<sup>[30]</sup>中规定车体振动加速度不超过2.5 m/s<sup>2</sup>,平稳性指标不超过2.5,而对于悬浮控制系统而言,在《城市轨道交通中低速磁浮车辆悬浮控制系统技术条件》(GB/T 39902—2021)<sup>[31]</sup>中规定在车辆运行时的动态悬浮间隙偏差不超过±4 mm,而对于电磁铁横向偏移目前并无标准,通常以电磁铁上横向滑橇与轨道不发生机械接触为限值,即横向偏移不超过14 mm。

对于桥梁,通常以桥梁的挠曲变形量和振动加速度作为桥梁的评定指标。依据《中低速磁浮交通设计规范》(CJJ/T 262—2017)对轨道支承结构的一般规定,混凝土简支梁在车辆静荷载作用下,其梁体垂向最大动位移不超过L/3800,而在车辆侧向导向力、小半径约束力、离心力、风力、温度的作用下,梁体横向最大动位移不超过L/2000;对于桥梁振动加速度而言,一般参考传统轮轨铁路桥梁方面的相关标准进行评价,《磁浮铁路技术标准(试行)》(TB 10630—2019)<sup>[32]</sup>规定无砟桥面的垂向振动加速度不大于5.0 m/s<sup>2</sup>,当车辆通过时,桥跨结构在荷载平面的横向振动加速度不超过1.4 m/s<sup>2</sup>。本文动力学评定指标如表4所示。

表4 动力学评定指标  
Table 4 Dynamics evaluation indices

| 类别 | 指标名称                            | 指标值      |
|----|---------------------------------|----------|
| 车辆 | 垂/横向平稳性                         | ≤2.5     |
|    | 车体垂向和横向加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) | ≤2.5     |
|    | 悬浮间隙偏差/mm                       | [−4,4]   |
|    | 横向侧偏量/mm                        | [−14,14] |
| 桥梁 | 横向变形限值                          | L/2000   |
|    | 垂向变形限值                          | L/3800   |
|    | 横向振动加速度/(m·s <sup>-2</sup> )    | ≤1.4     |
|    | 垂向振动加速度/(m·s <sup>-2</sup> )    | ≤5       |

3 结果分析与讨论

为研究不同桥梁类型对“车辆-桥梁”耦合系统动

态响应的影响,对AW3载荷下3编组车辆通过不同类型桥梁进行仿真分析,通过速度为20~160 km/h,步长为20 km/h,共包含8个速度变量。图11~图14为车辆以不同车速通过3种不同类型桥梁时车辆系统动态响应统计结果。在图11和图12中,车体振动加速度和平稳性计算指标均为Mc1车沿前进方向侧端部数据,悬浮架振动加速度和电磁铁动态响应均为Mc1车1#悬浮架沿前进方向侧端部数据。

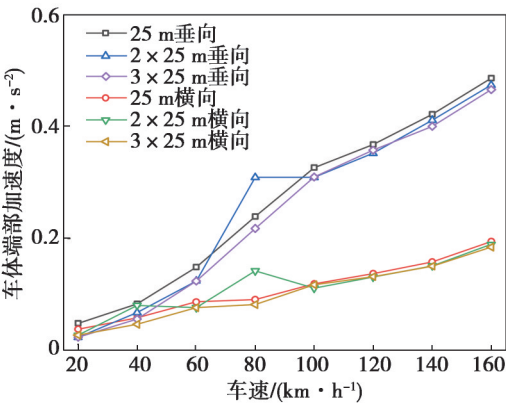


图11 车体振动加速度幅值  
Fig. 11 Amplitudes of carbody vibration acceleration

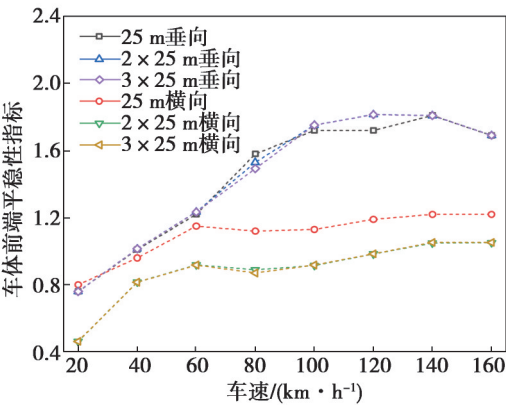


图12 车体平稳性  
Fig. 12 Carbody stability

由图11和图12可知,车体振动主要受悬挂模态影响,桥梁类型的改变对车体振动的影响较小。车辆通过25 m简支梁时的车体振动加速度与平稳性指标比通过多跨连续梁时大,尤其是横向平稳性指标,产生该现象的原因主要是相较于单跨简支梁,多跨连续梁载荷、刚度分布较为均匀,并且约束能力较强,在受到外部激励时,可向其他跨梁传递和分布激励能量,减少局部振动和冲击影响。随着车速的增加,车体振动加速度与平稳性指标均呈现递增趋势,最大振动加速度与平稳性指标分别为0.49 m/s<sup>2</sup>和1.81,满足相应标准要求。

由图13和图14可知,桥梁类型的改变对悬浮架振动和电磁铁位移动态响应的影响较小。随着车速的增加,悬浮架振动加速度、电磁铁悬浮间隙波动幅值和电磁铁横向偏移量均呈现递增的趋势,悬浮架振动加

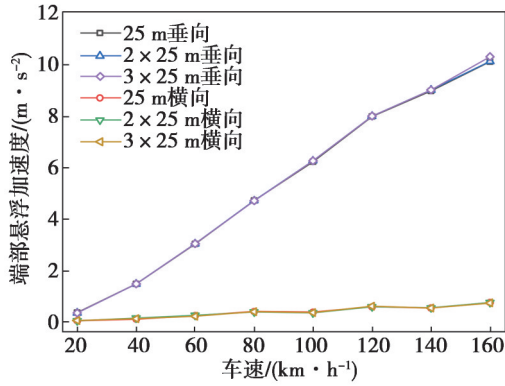


图13 悬浮架振动加速度

Fig. 13 Vibration acceleration of levitation frame

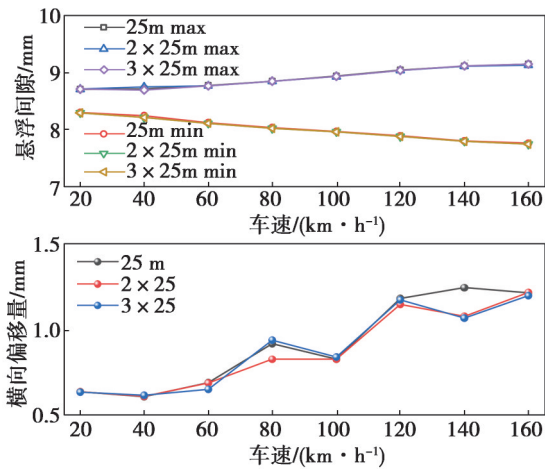


图14 电磁铁动态响应

Fig. 14 Dynamic response of electromagnet

速度最大值为  $10.33 \text{ m/s}^2$ 。由图14可知，通过不同类型桥梁时的悬浮间隙波动范围保持在  $\pm 4.0 \text{ mm}$  以内，这表明车辆通过不同类型桥梁时具有良好的悬浮稳定性，体现了加入主动悬浮控制的优异性能。

图15和图16为通过仿真计算得到的桥梁跨中振动加速度和动位移。

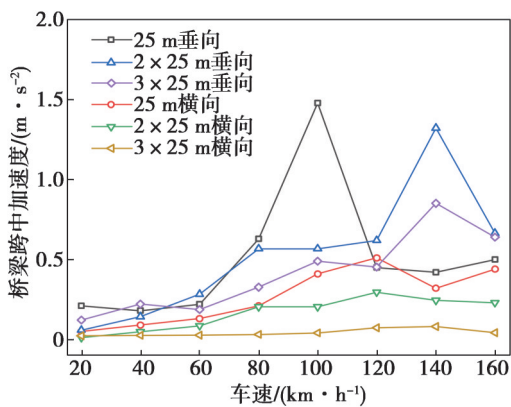


图15 桥梁跨中振动加速度

Fig. 15 Bridge mid-pan vibration acceleration

图15和图16的曲线表明，当悬浮车辆速度为  $100 \text{ km/h}$  和  $140 \text{ km/h}$  时，桥梁跨中垂向振动加速度幅值较大。这是由于车辆悬浮电磁铁与轨道直接作用，并且

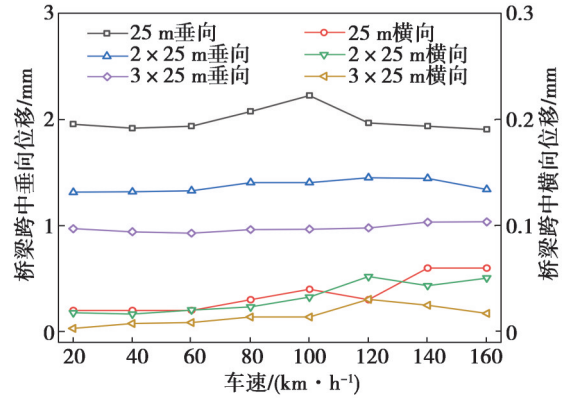


图16 桥梁跨中动位移

Fig. 16 Bridge mid-span dynamic displacement

固定安装在车辆悬浮架处，车辆以不同速度通过时容易对轨道产生不同的周期激励。本文研究车辆悬浮架长度为  $2.8 \text{ m}$ ，通过式(5)可以分别计算得到在上述速度下会对桥梁形成  $9.9 \text{ Hz}$  和  $13.9 \text{ Hz}$  的周期激励，与桥梁的一阶垂弯特征频率  $8.9 \text{ Hz}$ 、 $12.7 \text{ Hz}$  和  $10.1 \text{ Hz}$  接近，容易产生较大的耦合振动。随着车速的增加，车体加速度较大，激励时间较短，振动激发不充分，桥梁垂向加速度有所减小。

$$f = \frac{v}{L} \quad (5)$$

式中： $f$ 为车辆激励频率； $v$ 为车辆速度； $L$ 为车辆悬浮架长度。

当悬浮车辆在全速度域下通过不同桥梁类型时，桥梁跨中垂向和横向加速度幅值分别为  $1.48 \text{ m/s}^2$  和  $0.51 \text{ m/s}^2$ ，分别小于标准要求的  $5 \text{ m/s}^2$  和  $1.4 \text{ m/s}^2$ ；桥梁跨中垂向位移最大值为  $L/11211$ ，小于标准要求  $L/3800$ ，桥梁跨中横向位移均在  $0.1 \text{ mm}$  之内，满足相关要求。相较于多跨连续梁， $25 \text{ m}$  简支梁振动响应较大，尤其垂向方向的振动响应，由于其主要为低频振动，随着车速提升和轨道不平顺激励，车辆振频更容易接近其低振频率，因此加大耦合振动响应幅值。针对桥梁跨中振动加速度和动位移指标， $3 \times 25 \text{ m}$  连续梁的指标结果优于  $2 \times 25 \text{ m}$  连续梁，但在实际工程应用中不能仅考虑增加连续梁跨数以降低“车辆-桥梁”耦合振动响应水平，还应综合考虑运用环境、建设成本等因素，选择适用的连续梁跨数。

## 4 结论

本文对3编组车辆在全速度域下通过不同桥梁类型的“车辆-桥梁”耦合动力学响应进行了仿真分析，主要结论如下：

①  $25 \text{ m}$  简支梁的跨中垂向振动加速度最大为  $1.48 \text{ m/s}^2$ ，而  $3 \times 25 \text{ m}$  连续梁跨中垂向振动加速度最大仅为  $0.92 \text{ m/s}^2$ ；所有桥梁跨中垂向位移最大值为  $L/11211$ ，远小于规范要求的限值  $L/3800$ 。多跨连续梁在均布载

荷与刚度、增强约束方面表现更优,能显著降低桥梁振动响应,在实际桥梁设计中可通过合理增加跨数以降低“车辆-桥梁”的耦合振动影响。

②在全速度域,多跨连续梁下的车体垂向加速度最大值为 $0.47\text{ m/s}^2$ ,平稳性指标最大值为1.81,25 m简支梁下的车体垂向加速度最大值为 $0.49\text{ m/s}^2$ ,平稳性指标最大值为1.81,二者差值均小于5%;悬浮间隙波动均未超过 $\pm 4\text{ mm}$ ,满足相关规范要求。车辆系统响应主要受悬挂模态控制,桥梁类型变化对其影响有限,可为车辆动力学优化提供一定参考。

③桥梁子系统在车速 $100\text{ km/h}$ 和 $140\text{ km/h}$ 下容易受到车辆系统的周期激扰,车辆产生的激扰频率分别为 $9.9\text{ Hz}$ 和 $13.9\text{ Hz}$ ,与桥梁一阶垂弯特征频率接近,容易引发共振,导致桥梁振动响应增大;当车速高于 $140\text{ km/h}$ 时,因激励时间较短,桥梁振动激发不充分,垂向加速度降至 $1.0\text{ m/s}^2$ 以下。在实际线路设计中,应尽量避免车辆以车速 $100\sim 140\text{ km/h}$ 长时间通过该类型桥梁,必要时可通过调整梁体结构或控制车辆运行策略减少共振影响。

④本研究以25 m跨度为基础,开展了单跨25 m简支梁、 $2\times 25\text{ m}$ 和 $3\times 25\text{ m}$ 连续梁的车桥耦合振动仿真分析,在全速度域下各系统响应均满足规范要求。后续可进一步开展不同桥梁类型、不同跨度、曲线段,以及实际运营线路的耦合振动试验,结合向量式有限元法等高效计算模型,全面评估多种因素综合作用下的系统动力学行为。

## 参考文献:

- [1] 龚俊虎,谢海林,鄢巨平,等.全速度谱系磁浮交通的技术发展与应用前景[J].城市轨道交通研究,2020,23(9): 61-64.  
GONG Junhu, XIE Hailin, YAN Juping, et al. Development and application prospect of full-speed spectrum maglev transportation technology[J]. Urban mass transit, 2020, 23 (9): 61-64.
- [2] 徐飞,罗世辉,邓自刚.磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J].铁道学报,2019,41(3): 40-49.  
XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41 (3): 40-49.
- [3] 梁潇,陈峰,傅庆湘.160 km/h中速磁浮交通系统的关键技术问题[J].城市轨道交通研究,2019,22(9): 21-26.  
LIANG Xiao, CHEN Feng, FU Qingxiang. Key technical issues on 160 km/h medium-speed maglev transit system[J]. Urban mass transit, 2019, 22(9): 21-26.
- [4] 韩霄翰,李忠继,池茂儒.轨道梁结构对中低速磁浮车轨耦合振动的影响[J].铁道机车车辆,2019,39(5): 36-42.  
HAN Xiaohan, LI Zhongji, CHI Maoru. Influence of track beam structure on the mid-low maglev vehicle-rail coupling vibration[J]. Railway locomotive & car, 2019, 39(5): 36-42.
- [5] EL Hankari S, RACHID D, KHALID R. Resonance and cancellation phenomena in partially clamped simply supported beam bridges under moving trains[J]. Structures, 2022, 41(1): 1247-1256. DOI:10.1016/j.istruc.2022.05.075.
- [6] 李小珍,王渝文,胡启凯,等.不同桥跨对中低速磁浮列车-简支梁系统竖向耦合振动影响机理研究[J].振动与冲击,2022,41(19): 8-15.  
LI Xiaozhen, WANG Yuwen, HU Qikai, et al. Influence mechanisms of different bridge spans on vertical coupled vibration of low and medium speed maglev train-simply supported beam system[J]. Journal of vibration and shock, 2022, 41(19): 8-15.
- [7] 周宏.中低速磁悬浮列车-多跨简支梁桥耦合振动分析[J].土木工程与管理学报,2021,38(1): 93-99.  
ZHOU Hong. Simulation analysis on coupled vibration of multi-span simple-supported bridge with middle and low speed maglev vehicle[J]. Journal of civil engineering and management, 2021, 38(1): 93-99.
- [8] LIU Shaohui, JIANG Lizhong, ZHOU Wangbao, et al. Dynamic response analysis of multi-span bridge-track structure system under moving loads[J]. Mechanics based design of structures and machines, 2023, 51(10): 5669-5687. DOI: 10.1080/15397734.2021.2010569.
- [9] CHEN Xiaohao, MA Weihua, LUO Shihui. Study on stability and bifurcation of electromagnet-track beam coupling system for EMS maglev vehicle[J]. Nonlinear dynamics, 2020,101(4):2181-2193.DOI:10.1007/s11071-020-05917-8.
- [10] ZHANG Lingling. Vibration analysis and multi-state feedback control of maglev vehicle-guideway coupling system [J]. Electronic research archive, 2022, 30(10): 3887-3901. DOI: 10.3934/era.2022198.
- [11] ZHU Pengxiang, ZHANG Te, ZHOU Danfeng, et al. Research on magnetic levitation control method under elastic track conditions based on backstepping method[J]. Mathematics, 2024, 12(13): 2134. DOI: 10.3390/math12132134.
- [12] CHEN Ran, LU Zhourui, SU Cheng, et al. Stochastic optimization of levitation control system for maglev vehicles subjected to random guideway irregularity[J]. Journal of sound and vibration, 2025, 594: 118682. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118682.
- [13] ZHOU Fei, LI Xionglong. Coupled dynamics modeling and validation of maglev vehicle and bridge systems[J]. Actuators, 2025, 14(3): 107. DOI: 10.3390/act14030107.
- [14] 邓永权,罗世辉,梁红琴,等.基于SIMPACK的磁悬浮车辆耦合动力学性能仿真模型[J].交通运输工程学报,2007,7(1): 12-15.  
DENG Yongquan, LUO Shihui, LIANG Hongqin, et al. Simulation model of maglev coupling dynamics performance based on SIMPACK[J]. Journal of traffic and trans-

- portation engineering, 2007, 7(1): 12-15.
- [15] LEE J S, KWON S D, KIM M Y, et al. A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway bridges[J]. Journal of sound and vibration, 2009, 328(3): 301-317. DOI:10.1016/j.jsv.2009.08.010.
- [16] KIM K J, HAN J B, HAN H S, et al. Coupled vibration analysis of maglev vehicle-guideway while standing still or moving at low speeds[J]. Vehicle system dynamics, 2015, 53(4): 587-601. DOI: 10.1080/00423114.2015.1013039.
- [17] LIANG Xiao, JIANG Tianyong, HONG Yue, et al. Vibration response analysis of simply supported box girder bridge-maglev train in accelerated test of Changsha maglev express[J]. Advances in materials science and engineering, 2020(11): 9563747. DOI: 10.1155/2020/9563747.
- [18] 孙友刚, 徐俊起, 王素梅, 等. 基于向量式有限元法的磁浮列车磁力耦合系统建模与数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1635-1641.  
SUN Yougang, XU Junqi, WANG Sumei, et al. Modeling and numerical analysis of maglev train magnetic coupling system based on vector form intrinsic finite element method [J]. Journal of Tongji university(nature science), 2021, 49(12): 1635-1641.
- [19] 孙友刚, 徐俊起, 贺祯宇, 等. 基于误差交叉耦合的多电磁铁悬浮系统滑模协同控制[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 558-565.  
SUN Yougang, XU Junqi, HE Zhenyu, et al. Sliding mode cooperative control of multi-electromagnet suspension system based on error cross coupling[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 558-565.
- [20] HU Junxiong, MA Weihua, LUO Shihui. Coupled dynamic analysis of low and medium speed maglev vehicle-bridge interaction using SIMPACK[J/OL]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2020, 235: 377-389. DOI: 10.1177/0954409720925676.
- [21] LI Miao, LUO Shihui, MA Weihua, et al. Experimental and numerical investigations of the dynamic responses of low and medium speed maglev train track bridge coupled system [J]. Vehicle system dynamics, 2022, 60(5): 1555-1578. DOI: 10.1080/00423114.2020.1864417.
- [22] 李铁. 160 km/h 空簧中置式磁浮列车-桥梁耦合振动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2024.  
LI Tie. Research on the train-bridge coupled vibration characteristics of a 160 km/h maglev with mid-set air spring[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2024.
- [23] 尚贤洪, 刘宇, 李苗, 等. 中低速磁浮圆曲线钢箱梁桥车致振动响应研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 109-115.  
SHANG Xianhong, LIU Yu, LI Miao, et al. Research on the vehicle-induced vibration of circular curved steel box girder bridge for medium-low-speed maglev[J]. Railway standard design, 2024, 68(4): 109-115.
- [24] 刘清辉, 马卫华, 单磊, 等. 基于试验数据的中低速磁浮列车电磁铁结构参数分析[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 232-243.  
LIU Qinghui, MA Weihua, SHAN Lei, et al. Analysis of electromagnet structure parameters of medium and low speed maglev train based on test data[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2023, 23(6): 232-243.
- [25] LIU Qinghui, LI Miao, MA Weihua, et al. Mechanism of hysteresis effect in levitation electromagnet under large gap fluctuation and its influence on dynamic performance[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2025, 613: 172684. DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172684.
- [26] 尚贤洪. 平面圆曲线通过时中低速磁浮列车-桥梁耦合系统的振动特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.  
SHANG Xianhong. Analysis on vibration characteristics of medium-low-speed maglev train-bridge coupled system negotiating horizontal circular curve[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [27] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.  
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 199-216.
- [28] CJJ/T 262—2017 中低速磁浮交通设计规范[S].  
CJJ/T 262—2017 Code for design of medium and low speed maglev transit[S].
- [29] 李梦雪, 李苗, 张敏, 等. 基于中点弦测法的中低速磁浮轨道不平顺研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(9): 49-55.  
LI Mengxue, LI Miao, ZHANG Min, et al. Research on medium and low speed maglev track irregularity based on mid-chord offset method[J]. Railway standard design, 2023, 67(9): 49-55.
- [30] GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].  
GB/T 5599—2019 Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock[S].
- [31] GB/T 39902—2021 城市轨道交通中低速磁浮车辆悬浮控制系统技术条件 [S].  
GB/T 39902—2021 Technical specification for the levitation control system of medium-low speed maglev vehicle of the urban rail transit[S].
- [32] TB 10630—2019 磁浮铁路技术标准(试行)[S].  
TB 10630—2019 Standard for technology of maglev railway (trial)[S].

# Research on influence of bridge types on vehicle-bridge coupled vibration in medium- and low-speed maglev systems

MA Yaqun<sup>1</sup>, MA Weihua<sup>1,2</sup>, LUO Shihui<sup>1</sup>, LI Miao<sup>1</sup>, HU Junxiong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;  
2. Research Center for Super-High-Speed Evacuated Tube Maglev Transport, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** This paper investigates the influence of bridge type on vehicle-bridge coupled vibration in medium- and low-speed maglev systems (up to 160 km/h). Firstly, a multi-body dynamical model of the vehicle-incorporating active levitation and passive guidance—was established and a carbody modal analysis was conducted; finite element models were then developed and modal analyses were conducted for three bridge types: 25 m simply supported beam, 2×25 m continuous, and 3×25 m continuous beams. Next, a vehicle-bridge coupled dynamical model was developed in UM, which integrates the vehicle, suspension control, guideway, and bridge subsystems. Using measured track irregularities as excitation inputs, simulations were conducted for a three-car formation passing over bridges of the given types at speeds ranging from 20 to 160 km/h. Simulation results show that all dynamic responses indicators for the subsystems meet the relevant specification requirements across the entire speed range. Specifically, suspension modes are identified as the dominant factor governing carbody vibration, indicating a minor effect from bridge types on vehicle response. However, vehicle dynamic responses in the multi-span continuous beams scenario are better compared with the single-span simply supported beams scenario. Bridge responses vary significantly across bridge types: some dynamic response indicators are more pronounced in the 25 m simply supported beam scenario than in the multi-span continuous beams scenario. As vehicle speed increases, response amplitudes rise. Low-frequency bridge vibration is susceptible to periodic resonance excitation when the vehicle operates at 100 km/h and 140 km/h, and both higher speeds and larger track irregularities intensify the coupled vibration. Vehicle dynamic performance is better in the multi-span continuous beams scenario, with the maximum carbody vertical acceleration observed at 0.49 m/s<sup>2</sup>, the maximum Sperling index at 1.81, levitation gap fluctuations not exceeding 4 mm, and the maximum mid-span vertical deflection of  $L/11211$  for the bridge, all of which satisfy the relevant specification requirements.

**Keywords:** railway bridge; medium- and low-speed maglev systems; dynamical model; vehicle-bridge coupled vibration; dynamic analysis

收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-02-13  
责任编辑: 许 浩