

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0130-12

引用格式: 周春阳, 白鑫, 张俊博, 等. 典型轨道梁截面的高速磁浮列车-轨道梁耦合动力响应[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 130-141.

Citation: Zhou Chunyang, Bai Xin, Zhang Junbo, et al. Coupled dynamic response of high-speed maglev train-track beam based on typical track beam section[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 130-141.

典型轨道梁截面的高速磁浮列车-轨道梁 耦合动力响应

周春阳¹, 白鑫², 张俊博³, 张泽辉³, 张 骞⁴

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道科学技术研究发展中心, 北京 100081;

4. 青岛大学 机电工程学院, 山东 青岛 266071)

摘 要: 为探索典型轨道梁截面对高速磁浮列车-轨道梁系统动力响应的影响规律, 基于UM与Simulink联合仿真平台, 建立高速磁浮列车-轨道梁耦合动力学模型, 研究工型、T型、II型、V型和箱型5种典型轨道梁截面以及车速、轨道梁阻尼比、支座刚度对系统动力响应的影响。结果表明: 磁浮列车在 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 运行条件下, 各截面轨道梁的跨中垂向位移、跨中垂向加速度及车体垂向加速度均在规定的限值范围内, 其中T型截面轨道梁与工型截面轨道梁综合动力性能相对更优; 随着车速增加, T型截面轨道梁在车速为 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时出现动力响应峰值, 工型截面轨道梁的动力响应则随速度增加而增大; 阻尼比取值范围在0.03~0.08时, 其对轨道梁位移和车体垂向加速度影响较小, 跨中垂向加速度随阻尼比增大而降低, 其中T型截面轨道梁的加速度峰值减小了 $0.472\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 工型梁的加速度峰值减小了 $0.264\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; 支座刚度取值范围在 $10\sim 1\,000\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 随着支座刚度的增大轨道梁垂向加速度减小, 但车体垂向加速度会一定程度增大。研究成果可为高速磁浮轨道梁的截面选型和结构参数设计提供理论支撑。

关键词: 磁浮列车; 轨道梁; 轨道梁截面; 阻尼比; 支座刚度; 耦合系统动力响应

中图分类号: U266.4; U237

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.10

相较于传统轮轨系统, 高速磁悬浮在速度、安全、能耗与噪声控制等方面均展现出显著优势^[1-3]。我国时速 600 km 高速磁悬浮列车的成功研制, 标志着该技术向工程应用迈出了关键一步。而列车-轨道梁耦合动力响应是轨道交通无法回避的核心问题。

磁悬浮列车借助电磁力实现车体悬浮与前进, 由于悬浮运行时与轨道梁之间存在间隙, 消除了摩擦力, 因此仅需较小驱动力即可高速运行。基于这种非接触的运行特性, 常导型高速磁悬浮系统形成了独特的列车-轨道-桥梁结构, 为保障其可靠性,

需对系统平顺性及轨道桥结构动力性能进行评估^[4-5]。试验与数值计算是常用方法。Han等^[6]推导了3个自由度的简化车辆-导轨模型的耦合运动方程, 对桥梁固有频率、阻尼比等因素对系统动力学的影响进行了数值和试验分析。Zhao等^[7]研究了悬浮控制系统、柔性轨道梁的动态特性, 并探索了车辆在悬浮控制系统作用下, 悬浮间隙及轨道梁跨中垂向位移随磁悬浮列车速度的变化规律。Li等^[8]建立了将比例-积分-微分(以下简称PID)主动悬架控制作为悬浮力的磁浮列车-桥梁-控制器耦合模型, 计算和分析了中低速磁浮列车运行时桥

收稿日期: 2025-11-03; 修订日期: 2026-07-21

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2024YJ167)

第一作者: 周春阳(1990—), 女, 辽宁辽阳人, 副研究员。Email: zhoucy@rails.cn

通讯作者: 白鑫(1973—), 男, 内蒙古包头人, 研究员。E-mail: baixin2000@rails.cn

梁和车身的垂直振动响应。Chen 等^[9]通过对不同刚度的轨道梁耦合系统进行动力学仿真与试验,研究了轨道梁刚度对耦合系统的振动响应影响。Li 等^[10]通过对不同刚度轨道梁垂直车桥耦合动力响应的研究,分析和验证了中低速磁浮列车对轨道梁的适应性。近年来,众多学者在磁浮列车-轨道梁耦合问题中开始重视地震、雨雪等极端外界环境对磁浮列车-轨道梁耦合振动的影响^[11-17]。以往的研究侧重单一特定轨道梁截面工况下的中低速磁浮车桥耦合研究,对不同的典型轨道梁工况下的高速磁浮车-轨道梁耦合研究相对较少,对该方面开展研究,可以为 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速磁悬浮列车的车桥匹配提供可借鉴的研究方法,并提供理论支撑。

本文利用多体系统动力学仿真分析软件 Universal Mechanism (以下简称 UM) 建立磁浮列车多体动力学模型,并依托 Matlab/Simulink 建立悬浮控制器模型进行联合仿真,研究磁浮列车-轨道梁耦合动力响应规律。重点研究不同速度级下典型截面轨道梁的磁浮列车-轨道梁耦合系统的动力响应,并

探讨不同轨道梁阻尼和梁支座刚度等参数下的磁浮列车-轨道梁耦合系统的动力响应,揭示其影响规律,以为高速磁悬浮交通工程建设提供理论支持。

1 磁浮列车-轨道梁耦合模型

1.1 磁浮列车模型

基于常导磁悬浮列车的工作原理,通过动力学软件 UM 建立磁悬浮车辆三维模型。车辆模型主体结构包括磁悬浮车体、悬浮架系统和传感器等。

悬浮架系统由 1 个构架、2 个导向电磁铁和 2 个悬浮电磁铁组成。构架和电磁铁之间通过铰接、悬挂力元和磁浮力元连接,形成一系悬挂;悬浮架与车体之间通过空气弹簧和阻尼器线性力元连接,形成二系悬挂。悬浮架系统中共有 8 个磁浮力元,分别为 4 个悬浮力元和 4 个导向力元,每节车体有 4 个悬浮架系统,单节车辆共有 78 个自由度,整车为 3 节编组。磁浮列车车体模型如图 1 所示,车体模型参数见表 1。

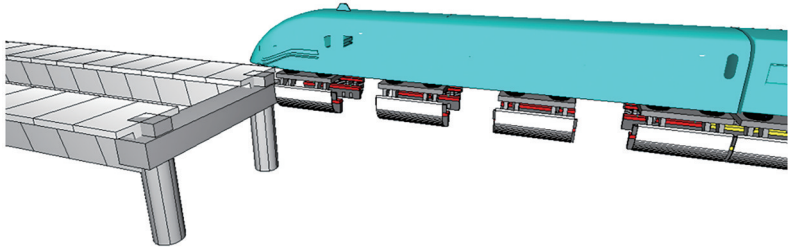


图 1 磁浮列车车体模型

表 1 磁浮列车车体模型参数

名称	质量/kg	长度/m	转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
头车	59 000	28.0	2.5×10^5
中间车	57 000	24.0	2.3×10^5
悬浮架	1 500	3.5	4.0×10^2
悬浮电磁铁	390	3.0	8.0×10^1
导向电磁铁	390	3.0	8.0×10^1

1.2 轨道梁模型库

基于铁木辛柯梁理论,采用 UM 动力学仿真软件建立磁浮轨道梁模型。单跨轨道梁采用梁单元模拟,桥梁支座采用 6 向刚度和 6 向阻尼力元模拟,单跨柔性轨道梁模型如图 2 所示。在建立磁悬浮轨道线路模型时,每跨为 25 m,共设置 40 跨,总长 1 000 m。

磁浮列车轨道梁的截面设计需综合考虑结构强度、刚度、轻量化,电磁兼容性以及制造工艺等因素。考虑磁浮技术路线和线路条件,可能适应 600

$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 高速磁浮列车运行的轨道梁截面众多,经调研相关文献^[3],选取现有常用的 5 种典型轨道梁截面开展研究。

图 3 给出了 5 种典型轨道梁截面,图中 r 为转角半径。

工型截面轨道梁一般采用预应力混凝土,抗扭刚度。工型梁具有良好的空气动力学性能,内部可布置电缆、管线及悬浮电磁铁轨道,见图 3 (a),上海高速磁浮线 TR08 采用了工型截面轨道梁。

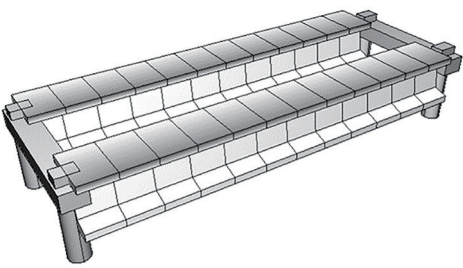
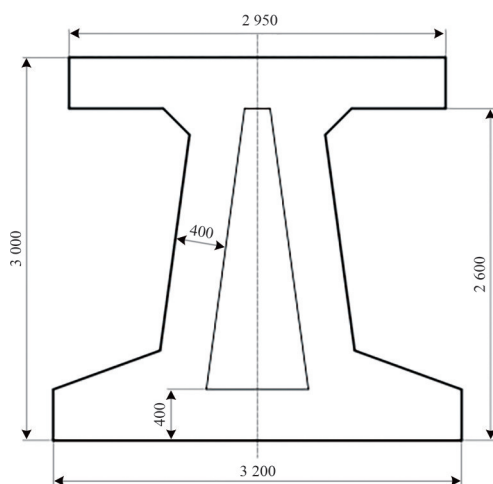
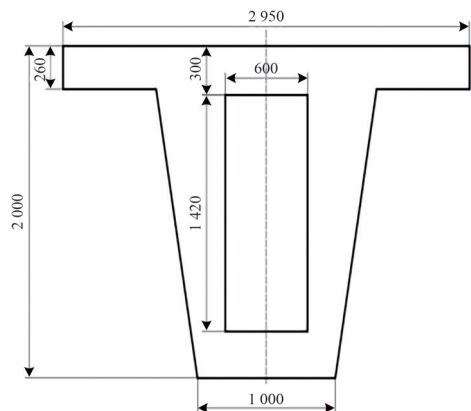


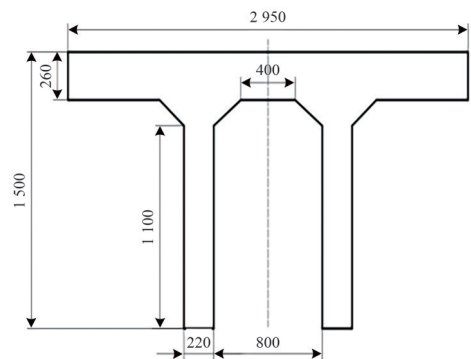
图 2 单跨柔性轨道梁模型



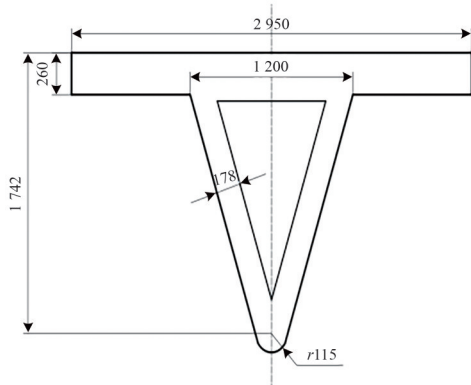
(a) 工型



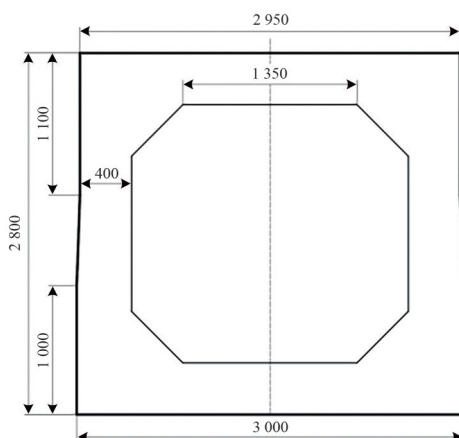
(b) T型



(c) II型



(d) V型



(e) 箱型

图3 典型轨道梁截面 (单位: mm)

T型截面轨道梁多用于磁浮线路,其结构简单,采用预应力混凝土,下部的梁腹板承担剪力和弯矩,内置预应力钢束,上部顶板为悬浮轨道承载平台,承载悬浮轨(F轨)、导向轨及线性电机定子,见图3(b),德国TR07型试验车轨道梁和日本山梨磁浮试验线采用了T型截面轨道梁。II型截面轨道梁(又称倒U型梁或槽型梁)是一种常见的结构形式,尤其适用于中低速电磁悬浮和部分高速磁浮线路,其中悬浮电磁铁可直接安装在顶部内表面,磁路闭合效率高,漏磁少,两侧腹板可屏蔽部分电磁干扰,见图3(c),韩国仁川机场磁浮线采用了II型截面轨道梁。V型轨道梁是一种新型的一体化钢梁轨道梁,其将悬浮、导向、供电等功能集成于一体,通过正V形截面实现结构轻量化和电磁性能优化,其斜腹板内侧安装电磁铁或超导线圈,截面材料分布优化,比一般箱梁减重20%~30%,见图3(d),日本L0系常导磁浮线采用了V型截面轨道梁。箱型截面轨道梁,结构固有频率高,可降低悬浮失稳风险,封闭箱体空腔可布设管线,腹板外侧能固定馈电设备,荷载分散能力好,见图3(e),长沙中低速磁浮线采用了箱型截面轨道梁。5种典型轨道梁截面参数见表2。

当磁浮列车高速运行时,桥梁振动加剧,需考虑剪切和转动的影响。铁木辛克梁理论的核心在于,同时考虑剪切变形和截面转动惯量的影响。轨道梁平动惯性力方程和转动惯性力矩方程分别为

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[kGA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - \psi \right) \right] = q(x, t) \quad (1)$$

$$\rho J \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - kGA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - \psi \right) = 0 \quad (2)$$

表 2 典型轨道梁截面参数

轨道梁横截面属性	面积/m ²	横向惯性矩/m ⁴	垂向惯性矩/m ⁴	纵向惯性矩/m ⁴	抗弯刚度/(GN·m ²)	泊松比
工型梁截面	5.550	2.641 2	1.685 1	0.568 4	91.12	0.2
T 型梁截面	2.681	1.005 0	0.750 8	0.622 5	34.67	0.2
Π 型梁截面	1.278	0.616 9	0.692 0	0.344 3	21.28	0.2
V 型梁截面	1.856	0.428 1	2.685 1	0.231 7	92.60	0.3
箱型梁截面	6.585	2.205 8	1.580 1	0.504 4	76.10	0.2

式中： ϕ 为轨道梁截面转角； ρ 为轨道梁材料密度； G 为轨道梁材料的剪切模量； A 为轨道梁截面积； E 为轨道梁材料的弹性模量； J 为轨道梁横截面对中心轴的惯性矩； k 为轨道梁的剪切修正系数； $q(x,t)$ 为沿轨道梁长分布的动荷载集度； t 为时间。

本文选用上海高速磁浮线路实测数据所建立的磁浮线路轨道不平顺模型作为系统外部激励^[18]，高速磁浮线路轨道不平顺谱如图 4 所示。

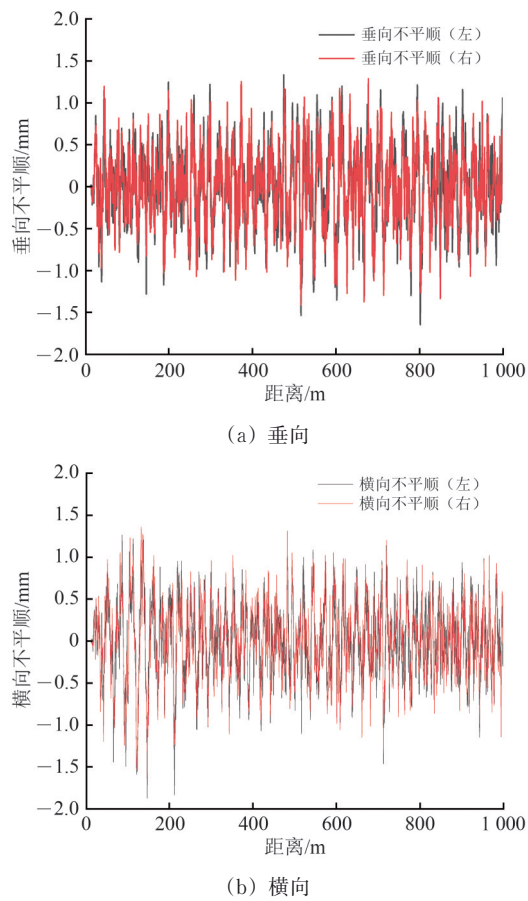


图 4 高速磁浮线路轨道不平顺频谱

1.3 悬浮控制系统模型

在 EMS 型磁浮列车中，悬浮控制系统是保证磁悬浮列车无接触运行的关键设备之一，悬浮系统通过电磁铁产生的悬浮电磁力支撑列车，其中悬浮间隙的稳定是保障列车平稳运行的关键。当悬浮间

隙减小时，电磁力会增加，反之亦然。因此，悬浮控制系统需要实时调整电流，以维持恒定的间隙。在 Simulink 中建立 1 个磁浮列车电磁悬浮系统模型，悬浮系统通过调整电磁铁的电流控制悬浮间隙，确保维持恒定的间隙。悬浮控制系统以参考间隙为目标值，PID 控制器根据传感器反馈的实际间隙与输入目标值计算偏差，输出控制电流经功率放大器传递到电磁铁系统并进一步作用于车体动力系统；传感器系统实时同步采集轨道激励产生的车体动力系统悬浮间隙信号与环境干扰产生的信号，然后将上述信号反馈给 PID 控制器，构成闭环。悬浮控制系统技术流程如图 5 所示。

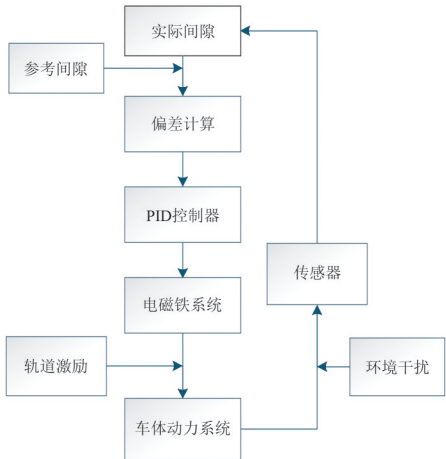


图 5 悬浮控制系统技术流程

单点悬浮控制是磁浮列车系统中最基础且核心的控制单元，其目标是通过精确调节单个电磁铁中的电流，使其与轨道保持恒定间隙，从而实现对磁浮列车的稳定支撑。在磁浮列车运行过程中，轨道不平顺与轨道梁梁体的垂向和横向振动会造成悬浮间隙的变化，为了保证悬浮间隙在合理的范围内，避免出现悬浮间隙过大或过小，从而与轨道梁产生相互碰撞，在悬浮架上的 4 个电磁铁端部安装传感器，传感器可以实时地传回反映悬浮间隙大小的电压信号反馈给控制器，控制器按照相应的控制算法改变电磁铁线圈的输入电流，确保磁浮列车的安全运行。

参考间隙是悬浮系统期望维持的悬浮高度,为了维持参考间隙,悬浮控制系统需实时调节电磁力以平衡列车振动、重力等扰动,PID控制器根据实际间隙与输入目标值的偏差输出控制电流,该电流 I 通过线圈生成的电磁力 F_{em} 可根据下面的电磁力计算式得到。

$$F_{em} = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \frac{I^2}{Z^2} \quad (3)$$

式中: F_{em} 为悬浮控制力; S 为磁极面积; N 为线圈匝数; μ_0 为真空磁导率,取 $40\pi \text{ MN} \cdot \text{A}^{-2}$; Z 为悬浮间隙。

由式(3)可知悬浮控制力与悬浮间隙的平方成反比,PID控制器通过反馈的悬浮间隙误差生成控制器输出电流,其计算式为

$$I = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

其中,

$$e(t) = Z_{ref} - Z(t)$$

式中: $e(t)$ 为间隙误差函数; τ 为 $0 \sim t$ 区间内的瞬时时间; Z_{ref} 为参考间隙; $Z(t)$ 为实际间隙; K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分增益。

在常见的PID基础上添加悬浮间隙的2阶微分修正项,实现对PID控制器精度的优化,PID控制方程为

$$L\dot{I} = U - RI + U_p e(t) + \left(U_i + \frac{LI}{Z} \right) \dot{Z} + U_d \int_0^t e(\tau) d\tau - U\ddot{Z} \quad (5)$$

式中: R 为线圈电阻; U 为基准电压; L 为线圈电感; $\dot{Z}$ 为悬浮间隙变化率; $\ddot{Z}$ 为车体垂向加速度; U_p 、 U_i 和 U_d 为悬浮系统中PID控制器的比例、积分和微分的电压增益。

式(5)中 LI/Z 为动态补偿项。在维持实际间隙等于参考间隙的动态过程中,PID控制器根据间隙误差生成控制电流 I ,并将其输入电磁铁子系统。此外,考虑抗饱和和输出限制,为防止电流过大或过小,限制电流范围为 $50 \sim 70 \text{ A}$ 。

车体动力系统通过悬浮控制系统方程(6)将电磁力转化求解得到加速度^[18],再通过积分器连续积分得到悬浮间隙。

$$\ddot{Z} = \frac{1}{m} [F_{em} - KZ - C\dot{Z} + \beta_{11}\xi(t)Z + \beta_{21}\xi(t)] \quad (6)$$

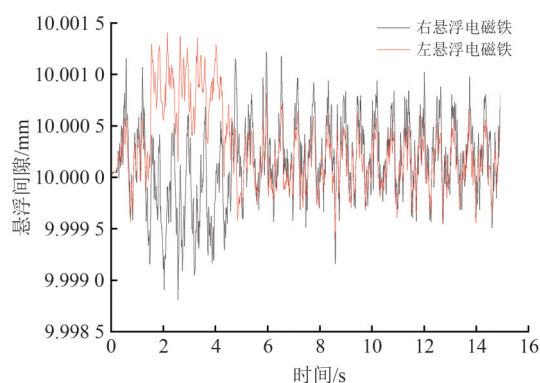
式中: β_{11} 为悬浮架随机参激控制项系数; β_{21} 为车

体随机参激控制项系数; $\xi(t)$ 为外部激励; C 为阻尼系数; K 为刚度系数。

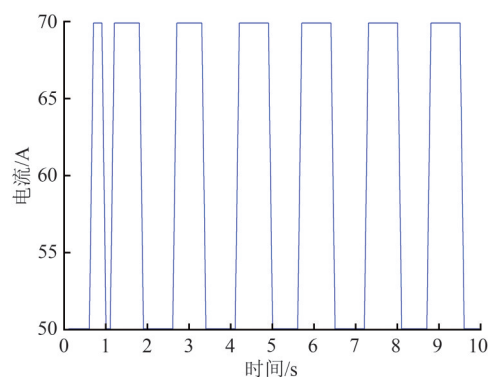
通过UM-Matlab/simulink联合仿真,在运行时UM将悬浮间隙、加速度等状态量传递给Simulink,Simulink将控制力反馈给UM,形成一个完整的闭环仿真。

1.4 模型验证

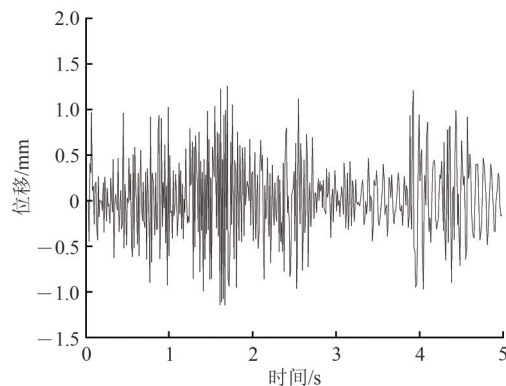
为验证模型可靠性,在模型中,轨道梁横截面采用T型梁截面,线路材料选取C60的预应力钢筋混凝土,弹性模量取 34.5 GPa ,计算工况为磁浮列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度通过 25 m 跨度轨道梁,得到的磁浮列车-轨道梁动力响应时程曲线如图6所示。



(a) 磁浮列车悬浮间隙



(b) 悬浮架控制电流



(c) 轨道梁跨中垂向位移

图6 磁浮列车-轨道梁动力响应时程曲线

由图6可见：悬浮电磁铁满足磁浮间隙在平衡位置 10 mm 左右波动的要求，并且最大波动小于 0.2 mm，与文献 [19] 计算结果误差在 5% 以内；磁浮列车运行时，由 UM 反馈到 simulink 中的控制电流可以稳定控制在 50~70 A 范围内，电流范围与文献 [19] 计算的电流结果相差小于 10 A。对于评估磁浮列车控制电流性能指标而言，此量级的偏差是可接受的，并不构成显著性差异；梁跨中垂向位移仿真计算所得轨道梁跨中垂向位移峰值为 1.27 mm，文献 [20] 中实测位移峰值为 1.50 mm，误差低于 10%。综上所述，磁浮列车-轨道梁动力学模型合理可靠。

2 典型轨道梁截面磁浮列车-轨道梁系统动力响应

磁浮列车运行过程中，列车与轨道梁发生相互

作用，会引发耦合振动，轨道梁的截面形式、车速、轨道梁阻尼和梁支座刚度等参数的选择会直接影响列车的悬浮间隙和轨道梁的动力响应。因此对上述参数对系统动力响应影响开展相应研究。

2.1 典型轨道梁截面对系统动力响应的影响

以往研究表明^[7]，在直线段，由于缺乏像离心力这样的强横向激励，并且轨道梁本身的横向刚度很大，使得其横向振动远比垂向振动要小。因此，针对直线梁，仅研究列车-轨道梁耦合系统的垂向动力响应。为对比高速磁浮列车通过不同截面轨道梁的列车-轨道梁耦合系统垂向振动响应，对磁浮列车以 300 km·h⁻¹ 速度通过跨度 25 m 的工型、T 型、Π 型、V 型和箱型 5 种截面轨道梁的系统动力学响应进行仿真分析，得到不同截面轨道梁跨中位移和垂向加速度，其峰值见表 3，时程曲线如图 7 所示。

表 3 列车以 300 km·h⁻¹ 速度通过典型截面轨道梁时轨道梁和车体垂向动力响应

轨道梁	轨道梁跨中垂向位移/mm		轨道梁跨中垂向加速度/(m·s ⁻²)		车体垂向加速度/(m·s ⁻²)	
	峰值	标准差	峰值	标准差	峰值	标准差
T 型轨道梁	1.307	0.437	0.292	0.083	0.257	0.127
工型轨道梁	2.364	0.585	0.354	0.147	0.255	0.091
V 型轨道梁	2.499	0.494	0.410	0.130	0.279	0.081
箱型轨道梁	3.285	0.833	0.421	0.097	0.297	0.092
Π 型轨道梁	4.386	1.016	0.456	0.153	0.300	0.091

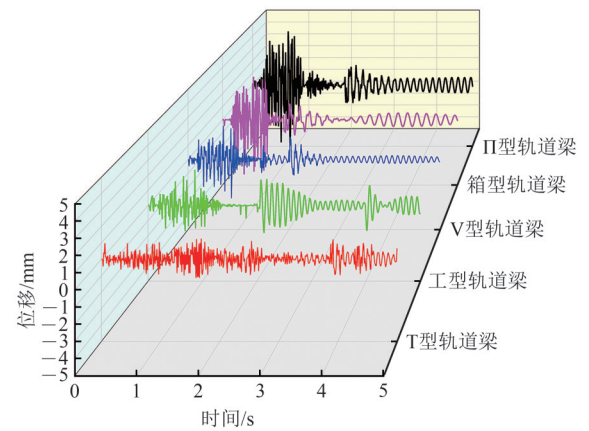
分析图 7 (a) 可知：当磁浮列车以 300 km·h⁻¹ 通过轨道梁时，5 种轨道梁跨中垂向位移峰值均在 5.2 mm 规定限值内，Π 型轨道梁垂向位移峰值最大，T 型轨道梁垂向位移峰值最小。在进行轨道梁垂向动力响应分析时，引入标准差反映动力响应数据的波动程度，通过分析 5 种典型截面轨道梁的位移时程曲线可知：Π 型轨道梁和箱型轨道梁的标准差较大，波动较剧烈；T 型轨道梁和工型轨道梁的标准差较小，且 T 型轨道梁的位移大多集中在 -0.5~0.5 mm 之间，波动较小。因此，T 型轨道梁的位移变化较为集中，动态响应最平稳；Π 型轨道梁和箱型轨道梁的位移分散，相对不稳定。

分析图 7 (b) 可知：T 型截面轨道梁垂向加速度峰值最小，为 0.292 m·s⁻²，Π 型截面轨道梁垂向加速峰值最大，为 0.456 m·s⁻²，并存在较多明显峰值。轨道梁垂向加速度标准差中 T 型轨道梁和工型轨道梁的标准差显著低于其他 3 种截面，垂向加速度波动较小；Π 型截面轨道梁与 V 型截面轨道梁垂向加速度时程曲线均存在部分剧烈的峰值波

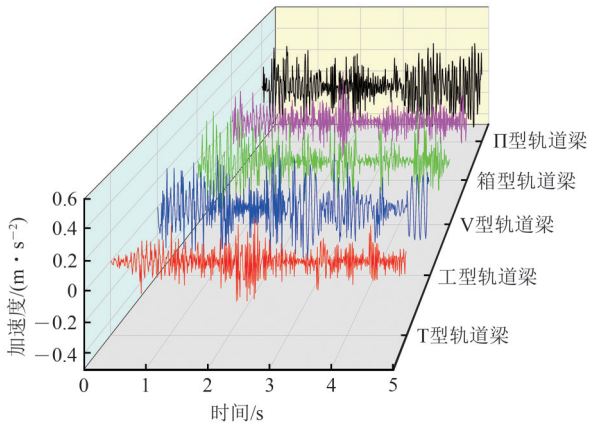
动，动力响应较大，最大绝对值均处于较高水平，表明其在动载荷下更易产生强烈的振动。

分析图 7 (c) 可知：当列车以 300 km·h⁻¹ 速度通过不同截面轨道梁时，车体垂向加速度峰值均在 0.27~0.30 m·s⁻² 范围内，差异不明显，其中通过工型和 T 型轨道梁时车体垂向加速度峰值相对较小，通过 Π 型轨道梁时车体垂向加速度峰值最大，为 0.3 m·s⁻²；通过 T 型轨道梁时车体垂向加速度有较多峰值，而通过 V 型轨道梁时车体垂向加速度的标准差最小为 0.0821 m·s⁻²，波动最平稳。

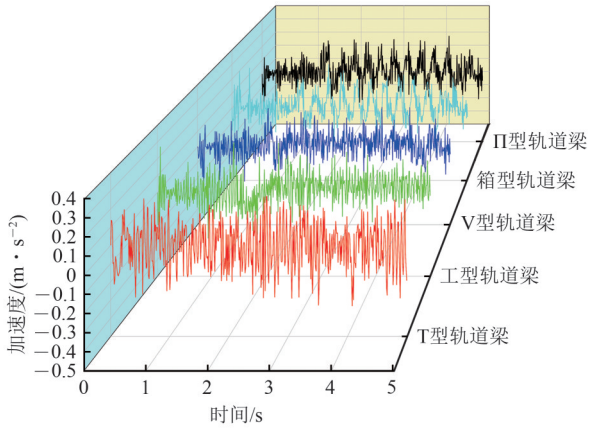
磁浮列车-轨道梁耦合系统过大的垂向动力响应会影响行车安全。按照 CJJ/T 310—2021《高速磁浮交通设计标准》^[21] 要求，对于 25 m 跨度的单跨轨道梁，其竖向容许垂向位移为 1/4 800，即要求轨道梁垂向位移峰值不超过 5.2 mm；对于磁悬浮车体垂向加速度峰值不应超过 0.5 m·s⁻²；磁浮列车轨道梁的垂向加速度没有标准设置值，参考相关文献 [22]，上海轨道梁跨中垂向加速度的瞬时峰值通常在 1.0~2.5 m·s⁻² 的范围内。



(a) 轨道梁跨中垂向位移



(b) 轨道梁跨中垂向加速度



(c) 车体垂向加速度

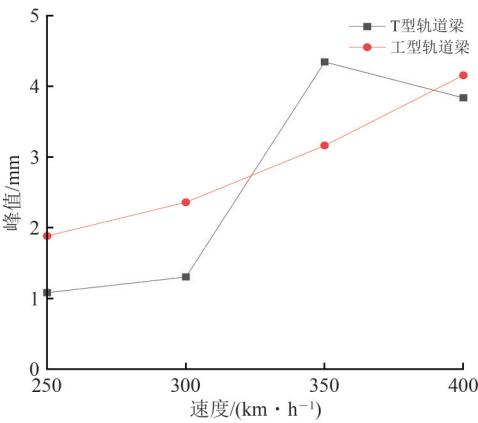
图 7 轨道梁和车体动力响应时程曲线

2.2 车速对系统动力响应的影响

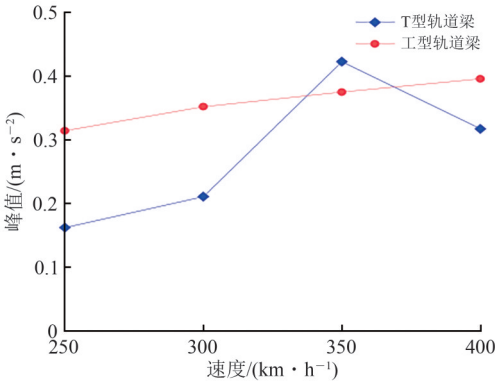
通过 2.1 节分析可知，T 型轨道梁和工型轨道梁的动力响应指标较好，因此本节以上述 2 种轨道梁为基础，分析车速对高速磁浮列车-轨道梁耦合系统的动力响应的影响规律。当列车以 250，300，350 和 400 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度通过时，轨道梁跨中垂向位移和垂向加速度以及车体垂向加速度的响应峰值见表 4，响应峰值曲线如图 8 所示。

表 4 不同速度级时轨道梁和车体垂向动力响应峰值

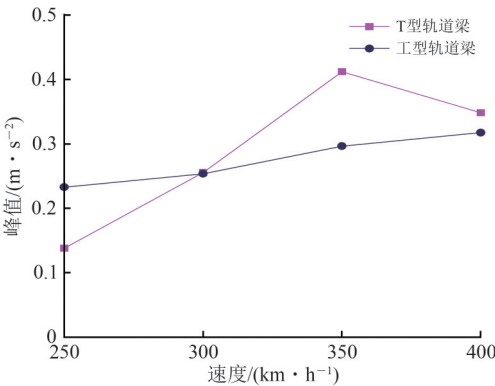
轨道梁	车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	跨中垂向位移 峰值/mm	跨中垂向 加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	车体垂向 加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
T 型 轨道梁	250	1.083	0.163	0.139
	300	1.307	0.212	0.257
	350	4.354	0.425	0.414
	400	3.844	0.319	0.350
工型 轨道梁	250	1.886	0.316	0.234
	300	2.364	0.354	0.255
	350	3.168	0.377	0.298
	400	4.114	0.398	0.319



(a) 轨道梁跨中垂向位移



(b) 轨道梁跨中垂向加速度



(c) 车体垂向加速度

图 8 不同速度时轨道梁和车体动力响应峰值

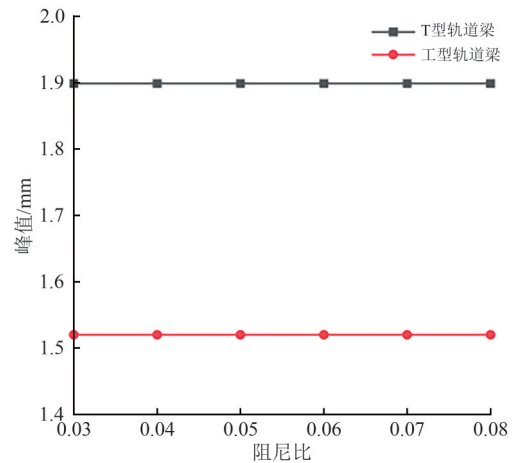
由图8可知：当磁悬浮列车以 $250\sim 400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度通过轨道梁线路时，轨道梁各项动力响应指标均在《高速磁浮交通设计标准》^[21]规定限值范围之内，反映出2种轨道梁的磁悬浮列车—轨道梁耦合系统动力响应良好；当车速由 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时，T型轨道梁跨中垂向位移峰值由 1.307 mm 增大至 4.354 mm ，增幅达 3.047 mm ，跨中垂向加速度峰值由 $0.212\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 增大至 $0.425\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，增幅为 $0.213\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，且已接近 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的限值要求；在 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时列车—轨道梁耦合系统出现较大的动力响应，主要由于T型轨道梁截面抗弯与抗扭刚度相对较小，更适用于中低速磁浮线路；通过工型轨道梁截面时，轨道梁垂向位移峰值、轨道梁垂向加速度峰值和车体垂向加速度峰值随着速度的提高而增大，车体垂向加速度峰值从 $0.255\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 上升至 $0.319\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，增幅约25%，当车速为 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时车体垂向加速度峰值距离标准限值 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 有较大安全冗余，说明工型轨道梁更能适应高速磁浮线路。

2.3 轨道梁阻尼比对系统动力响应的影响

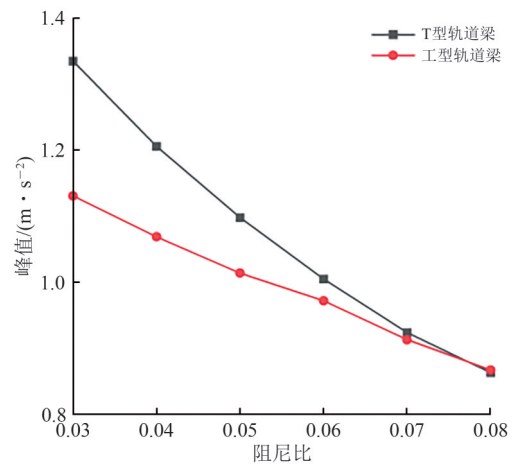
由于高速磁悬浮线路大部分是由预应力钢筋混凝土梁组成，因此本节主要研究预应力钢筋混凝土梁阻尼比变化对磁悬浮列车—轨道梁耦合系统的影响。参考相关文献[23]，钢筋混凝土梁阻尼比在 $0.03\sim 0.08$ 范围内选择，在阻尼比从 0.03 变化到 0.08 时，其他参数不变，磁悬浮列车以 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度分别通过T型截面和工型截面轨道梁。通过磁悬浮列车—轨道梁耦合系统动力响应仿真计算，得到磁悬浮列车和轨道梁动力响应见表5，高速磁悬浮列车—轨道梁耦合动力响应指标随轨道梁阻尼比的变化如图9所示。

表5 不同阻尼比下轨道梁和车体耦合动力响应

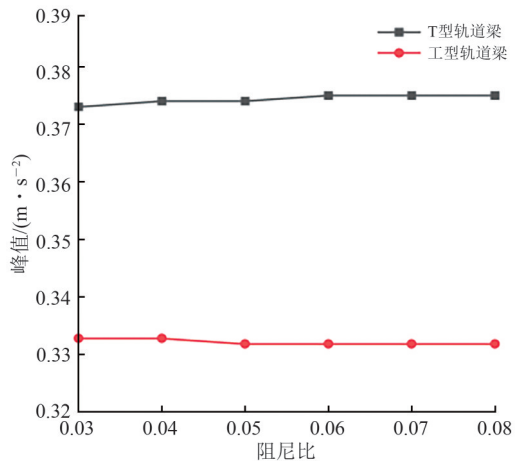
轨道梁	阻尼比	轨道梁垂向位移峰值/mm	轨道梁垂向加速度峰值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	车体垂向加速度峰值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
T型轨道梁	0.03	1.90	1.336	0.374
	0.04	1.90	1.207	0.375
	0.05	1.90	1.099	0.375
	0.06	1.90	1.006	0.376
	0.07	1.90	0.925	0.376
	0.08	1.90	0.864	0.376
工型轨道梁	0.03	1.52	1.132	0.333
	0.04	1.52	1.070	0.333
	0.05	1.52	1.015	0.332
	0.06	1.52	0.973	0.332
	0.07	1.52	0.914	0.332
	0.08	1.52	0.868	0.332



(a) 轨道梁跨中垂向位移



(b) 轨道梁跨中垂向加速度



(c) 车体垂向加速度

图9 不同阻尼比时轨道梁和车体动力响应峰值

由表5和图9可知：当阻尼比取值范围在 $0.03\sim 0.08$ 时，T型轨道梁和工型轨道梁的跨中垂向位移峰值受轨道梁阻尼比变化的影响较小，T型轨道梁垂向位移峰值保持 1.90 mm 不变，工型梁垂向位移峰值保持 1.52 mm 不变；T型轨道梁和工型轨道梁的跨中垂向加速度峰值均随轨道梁阻尼比的增

大而减小, T型轨道梁垂向加速度峰值减小 $0.472 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 工型轨道梁垂向加速度峰值减小了 $0.264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; T型轨道梁的车体垂向加速度峰值随轨道梁阻尼比增大略有增加, 增加了 $0.002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 工型轨道梁的车体垂向加速度随轨道梁阻尼比增大略有减小, 减小了 $0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 增幅和减幅均较小。

综上所述, 轨道梁阻尼比在 $0.03 \sim 0.08$ 区间时, 轨道梁阻尼比的增加对轨道梁垂向位移峰值变化和车体加速度位移峰值影响较小, 且轨道梁垂向加速度峰值随轨道梁阻尼比的增大而减小。因此, 选择合适的轨道梁阻尼比对高速磁悬浮线路的稳定性至关重要。

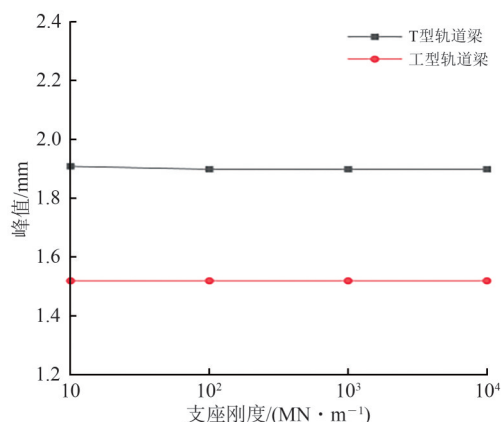
2.4 支座刚度对系统动力响应的影响

支座刚度会直接影响桥梁的纵向自振频率, 改变桥梁的整体边界条件和动力特性, 间接影响系统的动力响应。轨道梁支座刚度取决于支座类型、设计要求和其所承受的荷载方向, 刚度通常在 $1 \sim 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 数量级内变化^[24-25]。因此在磁悬浮列车-轨道梁耦合系统仿真中, 磁悬浮列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度分别通过T型截面和工型截面轨道梁, 桥梁竖向支座刚度取 $10, 10^2, 10^3$ 和 $10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, 其他参数不变。通过UM仿真, 高速磁悬浮轨道梁的垂向位移和垂向加速度以及磁悬浮车体垂向加速度在不同支座刚度下的峰值见表6, 高速磁悬浮列车-轨道梁耦合系统动力响应指标随支座刚度的变化如图10所示。

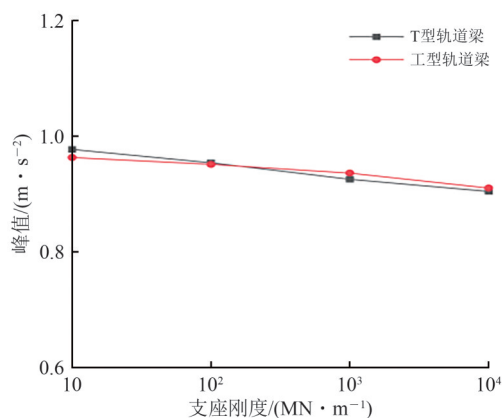
表6 不同支座刚度下轨道梁和车体耦合动力响应峰值

轨道梁	支座刚度/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	轨道梁垂向 位移峰值/ mm	轨道梁垂向 加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	车体垂向 加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
T型 轨道梁	10	1.91	0.980	0.367
	10^2	1.90	0.957	0.371
	10^3	1.90	0.928	0.375
	10^4	1.90	0.907	0.407
工型 轨道梁	10	1.52	0.966	0.318
	10^2	1.52	0.954	0.325
	10^3	1.52	0.939	0.332
	10^4	1.52	0.913	0.357

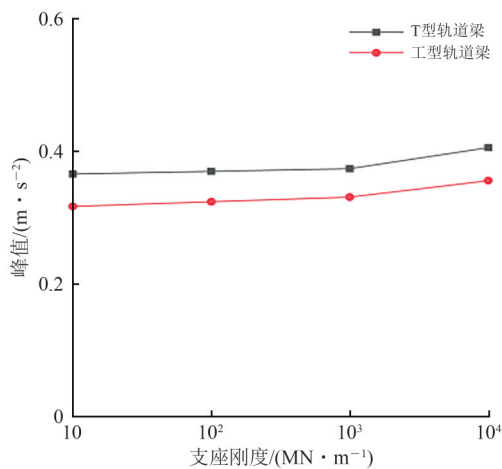
由图10可见: 当支座刚度在 $10 \sim 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内增加时, T型轨道梁和工型轨道梁跨中垂向位移峰值和跨中垂向加速度峰值变化相对较小, 其中T型轨道梁垂向位移峰值和垂向加速度峰值随着支座刚度的增大而减小, 垂向位移峰值减小了 0.01 mm , 垂向加速度峰值减小了 $0.073 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 工型轨道梁跨中垂向位移峰值为 1.52 mm 不变, 垂



(a) 轨道梁跨中垂向位移



(b) 轨道梁跨中垂向加速度



(c) 车体垂向加速度

图10 不同支座刚度时高速磁悬浮列车-轨道梁耦合系统动力响应峰值

向加速度峰值减小了 $0.053 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 随着支座刚度在 $10 \sim 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内增大, 2种轨道梁下的车体垂向加速度峰值均增大, T型轨道梁的车体垂向加速度峰值增加了 $0.040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 工型轨道梁的车体垂向加速度峰值增加了 $0.029 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 支座刚度增加, 桥梁对车辆冲击的吸收能力变差, 导致车体垂向加速度增加。

综上所述, 支座刚度变化对轨道梁动力响应影响相对较小, 对车体垂向加速度影响较大, 轨道梁跨中垂向加速度随着桥梁支座刚度的增大而减小, 车体垂向加速度随着桥梁支座刚度的增大而增大。

3 结 论

(1) 磁浮列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度分别通过5种典型截面轨道梁时, 5种典型截面的轨道梁跨中垂向位移, 跨中垂向加速度以及车体垂向加速度均在规定的限值范围内。其中T型截面轨道梁和工型截面轨道梁综合动力性能相对更优。

(2) 磁浮列车分别以 250, 300, 350 和 400

$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度级通过T型和工型轨道梁时, T型梁的各项动力响应在 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时出现峰值, 工型梁的各项响应随着速度的提高而增大。

(3) 阻尼比取值范围在 0.03~0.08 时, 其对轨道梁位移与车体加速度影响较小, 跨中垂向加速度随阻尼比增大而降低, 其中T型梁的加速度峰值减小了 $0.472 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 工型梁的加速度峰值减小了 $0.264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(4) 支座刚度取值范围在 $10 \sim 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 支座刚度的增加对轨道梁动力响应影响相对较小, 对车体垂向加速度影响相对较大, 其中随着支座刚度的增大轨道梁垂向加速度减小, 但车体垂向加速度会一定程度增大。

参 考 文 献

- [1] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
Deng Zigang, Liu Zongxin, Li Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455-474.
- [2] 杨静静, 孙加林, 柯在田. 反向曲线客货共线铁路桥梁车桥耦合分析[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 46-53.
Yang Jingjing, Sun Jialin, Ke Zaitian. Coupled analysis of train-bridge on reverse curved passenger and freight railway bridges[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 46-53.
- [3] 唐文冰, 肖立业, 王粟, 等. 磁悬浮轨道交通中的磁悬浮导向方式研究综述[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5): 45-60.
Tang Wenbing, Xiao Liye, Wang Su, et al. A review of research on magnetic levitation guidance methods in maglev rail transit[J]. New Electrical Energy Technology, 2022, 41(5): 45-60.
- [4] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
Xiong Jiayang, Deng Zigang. Research progress on high-speed maglev rail transit [J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [5] 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]. Train System Dynamics, 2022, 60(1): 1555-1578.
- [6] Han H S, Yim B H, Lee N J, et al. Effects of the guideway's vibrational characteristics on the dynamics of a maglev vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(3): 309-324.
- [7] Zhao Chunfa, Zhai Wanming. Dynamics of maglev vehicle/guideway systems (II)—modeling and simulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 163-175.
- [8] Li Chenyang, Huang Xiuchang, Hua Hongxing. Dynamic modeling and analysis of axial vibration of a coupled propeller and shaft system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(7): 2953-2960.
- [9] Chen Chen, Xu Junqi, Lu Yang, et al. Experimental study on vertical vehicle-rail-bridge coupling of medium and low speed maglev train based on track beam with different stiffness[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(17/18): 4129-4142.
- [10] Li Miao, Chen Xiaohao, Luo Shihui, et al. Experimental study on vertical vibration characteristics of medium-low speed maglev vehicle when standing still on steel beams[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2022, 236(6): 609-622.
- [11] Wang Dangxiong, Li Xiaozhen, Liang Lin, et al. Influence of the track structure on the vertical dynamic interaction analysis of the low-to-medium-speed maglev train-bridge system[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(14): 2937-2950.
- [12] Kwon S D, Lee J S, Moon J W, et al. Dynamic interaction analysis of urban transit maglev vehicle and guideway suspension bridge subjected to gusty wind[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3445-3456.

- [13] Yau J D. Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(10): 1743-1759.
- [14] Yau J D. Interaction response of maglev masses moving on a suspended beam shaken by horizontal ground motion [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(2): 171-188.
- [15] Yau J D. Response of a maglev vehicle moving on a series of guideways with differential settlement [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 324(3/4/5): 816-831.
- [16] Yau J D. Wave passage effects on the seismic response of a maglev vehicle moving on multi-span guideway [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2013, 10(5): 981-1000.
- [17] Zhai Wanming, Han Zhaoling, Chen Zhaowei, et al. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(7): 984-1027.
- [18] 王奥. 基于车体—悬浮架多柔体建模的高速磁悬浮列车动态特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
Wang Ao. Study on dynamic characteristics of high-speed maglev train based on carbody-bogie multi-flexible body modeling [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [19] 陈琛, 徐俊起, 王文, 等. 基于数据驱动的磁悬浮列车悬浮系统参数辨识及控制 [J]. *铁道学报*, 2025, 47(7): 40-51.
Chen Chen, Xu Junqi, Wang Wen, et al. Parameter identification and control of maglev train levitation system based on data-driven approach [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2025, 47(7): 40-51.
- [20] 屠嘉杨. 高速磁浮列车—轨道梁桥系统耦合振动仿真分析与参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
Tu Jiayang. Simulation analysis and parameter optimization on coupled vibration of high-speed maglev train-track beam bridge system [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [21] CJJ/T 310—2021 高速磁浮交通设计标准[S].
CJJ/T 310—2021 Design standards for high-speed maglev transportation [S].
- [22] 滕延锋. 高速磁浮轨道梁在车辆荷载作用下的振动研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Teng Yanfeng. Study on vibration of high-speed maglev track beam under vehicle load [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [23] GB 55008—2021 混凝土结构通用规范[S].
GB 55008—2021 General code for concrete structures [S].
- [24] 冯轩. 高速铁路桥梁支座刚度对车-线-桥系统的动力学影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
Feng Xuan. Dynamic influence of high-speed railway bridge bearing stiffness on vehicle-track-bridge system [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [25] 彭卫兵, 任爱珠, 徐峰. 桥梁结构设计中的知识复用技术 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007(9): 1418-1422.
Peng Weibing, Ren Aizhu, Xu Feng. Technologies for bridge structure design-based knowledge reuse [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007(9): 1418-1422.

Coupled dynamic response of high-speed maglev train-track beam based on typical track beam section

Zhou Chunyang¹, Bai Xin², Zhang Junbo³, Zhang Zehui³, Zhang Qian⁴

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

3. Railway Science and Technology Research and Development Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China)

Abstract: In order to explore the influence of typical track beam cross-sections on the dynamic response of high-speed maglev train-track beam systems, a high-speed maglev train-track beam coupled dynamic model was

established based on the UM and Simulink joint simulation platform. The effects of five typical track beam cross-sections (I-shaped, T-shaped, II-shaped, V-shaped, box-shaped), speed, track beam damping ratio, and support stiffness on the system's dynamic response were systematically investigated. The results show that under the operating condition of $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the mid-span vertical displacement, mid-span vertical acceleration of the track beam, and vertical acceleration of the train body for all cross-sections are within the specified limits, with the T-shaped and I-shaped track beam section having relatively better overall dynamic performance. As speed increases, the T-shaped beam exhibits a peak dynamic response at $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, while the I-shaped beam's dynamic response increases with speed. When the damping ratio is in the range of 0.03–0.08, it has little effect on track beam displacement and train body's vertical acceleration, but the mid-span vertical acceleration decreases with increasing damping ratio, with the T-shaped beam's acceleration amplitude decreasing by $0.472 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ and the I-shaped beam's acceleration amplitude decreasing by $0.264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. When the support stiffness is in the range of $10\text{--}1\,000 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, the increase of support stiffness reduces the vertical acceleration of the track beam but can increase the train body's vertical acceleration to some extent. This study can provide theoretical support for the selection of track beam cross-sections and the design of structural parameters for high-speed maglev.

Key words: Maglev train; Track beam; Track beam cross-section; Damping ratio; Bearing stiffness; Coupled dynamic response

(责任编辑 吴 彬)