



考虑温差变形的高速磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动响应分析

黄 曾¹, 彭也也¹, 龚俊虎^{1,2}, 娄会彬^{1,2}, 赵春发¹
(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. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 文章研究温差作用下轨道与桥梁的结构变形及其对列车-轨道-桥梁耦合系统动力学性能的影响。针对梁轨分离式高速磁浮轨道-桥梁结构, 采用全天瞬态热分析和热-结构耦合分析方法, 分析不同温差荷载下轨道悬浮面和导向面的几何变形。进一步建立磁浮列车-轨道-桥梁耦合动力学模型, 计算行车速度为 600 km/h 时, 无温差、日照温差、降温温差变形 3 种工况下的磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动响应, 对比分析温差变形的动力学影响规律。结果表明, 日照温差荷载下轨道悬浮面的上拱变形接近 3.5 mm, 降温温差荷载下跨中处悬浮面下挠变形约 2.0 mm, 梁端悬浮面上翘变形约 1.3 mm; 两种温差荷载下轨道导向面的横向绝对变形和差异变形均较小。温差变形显著影响高速磁浮车辆的动力学性能: 与无温差工况相比, 日照温差变形导致车体端部垂向加速度幅值增大 15.31%, 悬浮间隙的动态偏移量幅值增加 36.36%, 对轨道和桥梁动力学响应影响则相对较小。

关键词: 高速磁浮列车; 电磁悬浮; 梁轨分离式轨道; 温差荷载; 悬浮间隙; 运行平稳性; 耦合振动; 轨道不平顺

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0073-15

0 引言

常导高速磁浮交通采用无接触的运行方式, 在线路适应性、绿色环保、运营维护等方面具有一定的优势^[1-2]。然而, 常导磁浮车辆与轨道的间隙需维持在 10 mm 左右, 车辆的稳定、舒适运行对轨道平顺性提出了严苛的要求^[3-4]。高速磁浮交通大量采用高架线路, 桥梁温度变形与弹性变形是影响轨道动态不平顺的重要因素。因此, 开展考虑温度变形的磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动分析具有重要的理论意义与实用价值。为系统分析温差变形对磁浮系统动力学行为的影响, 需针对两个方面进行研究: 一是轨道梁结构在日照作用下的温度分布与变形规律, 二是温差变形下车辆-桥梁系

统的耦合振动响应特征。

针对轨道与桥梁温度变形方面, 国内外学者已开展了日照温度作用下轨道与桥梁结构的温度分布及变形分析。文献[5]对 3 种截面形式的高速磁浮轨道梁进行稳态热分析, 结果表明最大温差荷载下轨道梁竖向变形超过 4 mm。文献[6]开展了中低速磁浮轨道与桥梁结构的温度效应分析, 指出温差引起的轨道梁变形达到 3 mm, 对磁浮车辆动力学性能的影响不可忽视。文献[7]采用间接耦合法进行热-结构耦合场分析, 得到了箱梁温度应力与位移的分布规律。文献[8]对制作的等比例箱梁在日照作用下的温度场数据进行了收集, 通过改变桥梁参数, 探究了热传导率等不同相关因素对箱梁截面温度场分布的影响。文献[9]计算了上海高速磁浮示范线简支混凝土梁不同部件的热通量密度和传

基金项目: 国家重点研发计划课题(2024YFF0508001); 四川省自然科学基金课题(2024ZNSFSC0939); 中国国家铁路集团科技研究开发计划课题(L2024G015(T001)); 高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金项目(SKLM-SFCF-2025-004); 中铁第四勘察设计院科技开发计划(2022k015)

通信作者: 赵春发, 男, 研究员, 博士, 研究方向为轨道交通工程动力学; E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn

引用格式: 黄曾, 彭也也, 龚俊虎, 等. 考虑温差变形的高速磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动响应分析[J]. 机电传动, 2026(2): 73-87.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.009.

Citation: HUANG Zeng, PENG Yeye, GONG Junhu, et al. Analysis of coupled vibration response of high-speed maglev train-guideway-bridge system considering temperature difference deformation effects[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 73-87.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.009.

热系数,采用有限元方法获得了导轨的温度分布和变形场,并探讨了温度变形对车辆-轨道动力相互作用的影响。文献[10]采用热-结构耦合方法对磁浮轨道梁进行稳态热变形分析,指出当结构上下表面温差载荷大于20℃时,温差引起的垂直挠度超过相关规定限值。文献[11]分析了上海磁浮线钢箱梁不同支承形式轨道梁在日照作用下的温度变形,发现双跨连续梁的竖向和横向变形超过2 mm。文献[12-14]研究了不同结构形式高速磁浮轨道梁的日照温度场分布及温度变形。文献[15]分析了高速磁浮整体式预应力轨道梁温度场与变形特性。文献[16]开展了中低速磁浮单线轨道梁日照温度场分析。上述研究为磁浮轨道与桥梁工程设计及温度变形控制提供了理论依据和有益参考。

针对磁浮车辆-轨道梁耦合振动方面已有广泛研究。文献[17-19]阐述了磁浮车辆-磁力控制-轨道梁耦合动力学建模方法,开展了磁浮车桥系统的动力学参数匹配设计研究。文献[20]研究了轨道梁刚度对高速磁浮车桥耦合振动的影响。文献[21]建立了较细致的中低速磁浮车桥系统动力学模型,开展了磁浮车桥耦合振动的参数影响分析。文献[22]建立了磁浮车辆模型和考虑剪切影响的Timoshenko空间梁单元模型,探讨了车辆和桥梁的竖向和横向耦合振动响应特性。文献[23]针对一种磁浮交通并置简支梁结构,从桥面布置、箱梁整体受力、自振频率、小曲线桥梁受力等方面进行了设计研究。文献[24]建立了高速磁浮车轨耦合动力学模型,对轨道梁、功能件的动力响应和车轨共振速度进行了分析。文献[25]比较了多种磁浮轨道梁的结构特点,构建磁浮车辆载荷与轨道梁相互作用的振动模型,分析了轨道梁在不同运行条件下的振动特性。文献[26]将磁浮列车荷载考虑为移动的均布荷载,采用解析法得到了磁浮简支梁动力学最大响应值随车速等参数的变化规律,给出了磁浮轨道梁动力响应的极值条件。上述研究为磁浮交通桥梁动力学设计与评估提供了有益参考,但已有研究主要针对“梁轨一体化”磁浮轨道梁,且很少考虑温度变形对磁浮列车-桥梁耦合振动的影响。

针对“梁轨分离式”的新型高速磁浮交通轨道与桥梁系统,本文将建立高速磁浮列车-轨道-桥梁耦合动力学模型和轨道与桥梁热-结构耦合分析模型,研究不同温差荷载作用下轨道-桥梁结构的变形规律,对比分析有、无温度变形工况下磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动响应,以为高速磁浮轨道与桥梁结构设计提供理论依据与应用参考。

1 列车-轨道-桥梁耦合动力学模型

1.1 高速磁浮列车动力学模型

常导高速磁浮列车每节车厢配置4个悬浮架,悬浮架与车体之间通过摆杆连接。悬浮架上装配有1对悬浮

电磁铁、1对导向电磁铁或制动电磁铁,相邻悬浮架之间共用1对悬浮电磁铁和1对导向电磁铁。悬浮架结构示意图如图1所示,其由前后2个悬浮框、纵梁、分离式摇枕、空气弹簧系统等组成。悬浮框包含2根横梁、2根短纵梁、托臂连接件、摇枕支座和空簧支座等部件。摇枕与悬浮框之间通过铰接件和空气弹簧连接,摆杆连接摇枕外端与车厢底部,车厢与悬浮架之间的相对运动通过摆杆转动进行补偿。

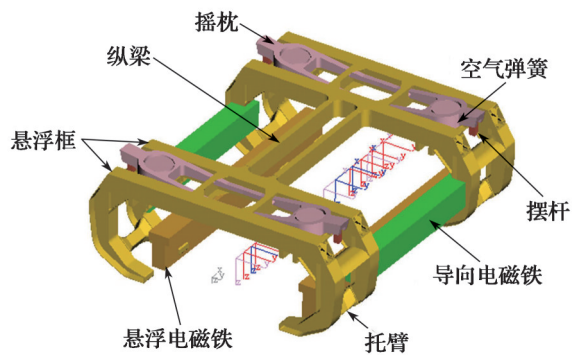


图1 悬浮架结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of levitation bogie

研究团队使用SIMPACK软件建立3车编组的高速磁浮列车动力学模型,如图2所示。

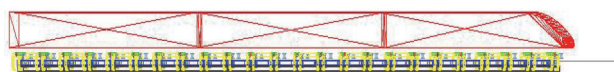


图2 高速磁浮列车动力学模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamical model of high-speed maglev train

车体、悬浮框、悬浮电磁铁、导向电磁铁被视为刚体。悬浮架纵梁等效为线性弹簧,用于模拟前后悬浮框之间的相对扭转刚度。空气弹簧和电磁铁铰接件考虑为线性弹簧-阻尼力元。将电磁铁上每个磁极的磁力简化为集中力,电磁力计算公式为

$$F_m = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{I}{\delta} \right)^2 \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; N 为线圈匝数; A 表示有效磁极面积; I 为电磁铁线圈电流; δ 为悬浮气隙。

电磁悬浮和导向均采用比例-积分-微分(PID)位置环与比例电流环的串级控制方法,悬浮框单侧的前、后2个悬浮控制点采用电流平衡策略,左、右侧对应的2个导向点采用差动控制策略^[27]。表1给出了高速磁浮列车动力学模型的主要参数。

1.2 轨道与桥梁结构有限元模型

文献[28]提出了一种“梁轨分离式”高速磁浮轨道与桥梁结构系统(如图3所示),并据此建立了轨道与桥梁结构有限元模型。其中,桥梁为跨度30.96 m的单箱单室双线简支梁,在整孔箱梁的顶部设置承轨梁,承轨梁纵向每隔6.192 m设置横向伸缩缝。在承轨梁上设置承轨台,分块预制的轨道板通过锚杆式扣件安装

表1 磁浮列车动力学模型参数

Table 1 Parameters of the maglev train dynamical model

参数名称	参数值
车体质量/t	38 (端车), 42 (中间车)
悬浮电磁铁质量/kg	603
导向电磁铁质量/kg	389
电磁铁模块长度/mm	3 096
悬浮电磁铁极距/mm	258
额定悬浮间隙/mm	10
额定导向间隙/mm	10
空簧垂向刚度/(kN·m ⁻¹)	220
空簧垂向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	2 000

于承轨台上, 可通过后浇承轨台进行轨道线形与高程的精确定位和调整。

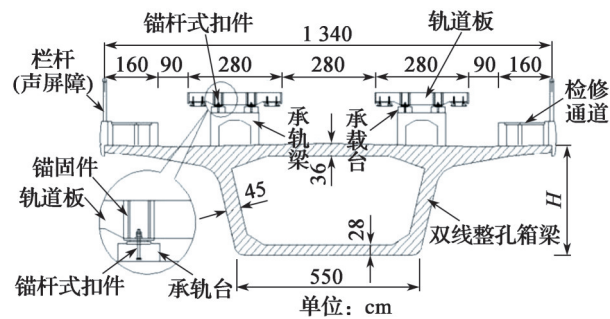


图3 “梁轨分离式”轨道与桥梁结构横截面
Fig. 3 Cross-section of "beam-track separated" structure

在ANSYS软件中, 采用Solid185实体单元对轨道板、承轨梁、梁体等进行建模, 单元尺寸控制为0.3 m。轨道板、承轨梁采用C60混凝土, 弹性模量为36.0 GPa, 泊松比为0.2, 密度为2 500 kg/m³。轨道和桥梁结构有限元模型如图4所示。轨道与桥梁结构总长1 125 m, 共36跨。考虑到轨道与桥梁系统若完全采用实体单元建模会导致节点数量大幅增加, 降低动力学仿真计算效率, 因此采用梁单元对简支梁桥建模, 并通过刚臂连接实现轨道结构与下部桥梁之间的力学传递。这种建模方法不仅有效控制了模型规模, 还保

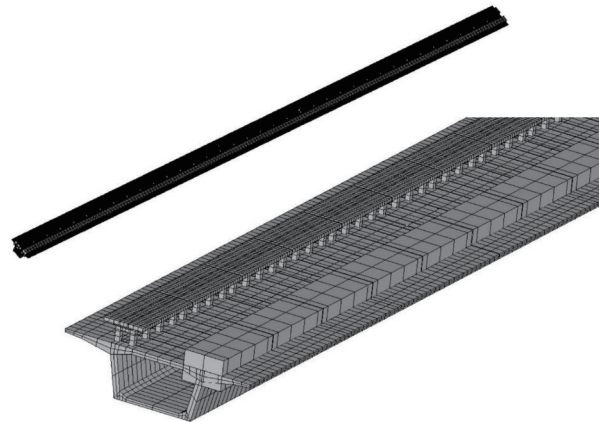
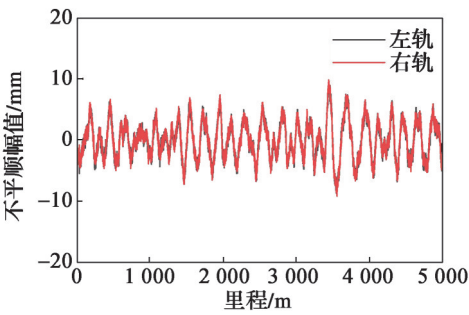


图4 “梁轨分离式”轨道与桥梁有限元模型
Fig. 4 Finite element model of "beam-track separated" structure

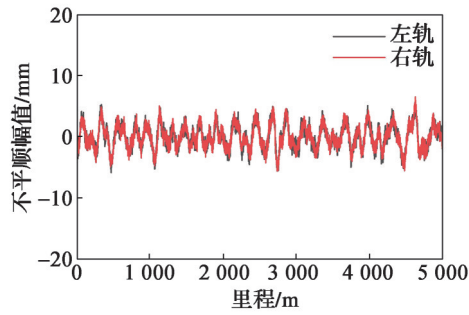
证了连接区域的力学连续性。简支梁桥采用C50混凝土, 弹性模量为35.5 GPa, 泊松比为0.2, 密度为2 450 kg/m³。

1.3 轨道不平顺模型

目前, 常导高速磁浮交通领域尚缺乏公认的的轨道不平顺谱, 本文结合高速磁浮轨道结构组成及技术特征, 提出了一种基于随机过程叠加原理的轨道不平顺构建方法^[29]。该方法充分考虑了桥梁支墩沉降、桥梁端部结构误差、轨道功能构件安装误差, 以及定子组件、导向面和桥梁端部结构误差等多源因素, 通过对定子构件与导向面特征尺度范围内的综合变形进行了定量拟合, 进而构建出更符合高速磁浮轨道实际特性的随机不平顺样本。轨道不平顺样本如图5所示。



(a) 垂向不平顺



(b) 横向不平顺

图5 高速磁浮轨道不平顺里程域样本

Fig. 5 Spatial-domain samples of high-speed maglev guideway irregularity

1.4 耦合动力学仿真方法

磁浮列车-轨道-桥梁系统的建模与仿真涉及多个学科, 目前尚无成熟商业软件可自主、高效地开展磁浮耦合动力学仿真计算, 都需要借助多种专业软件进行协同仿真。本文采用基于SIMPACK、MATLAB、ANSYS软件的分布式协同仿真平台进行列车-轨道-桥梁系统动力学仿真。该平台采用自主开发的耦合计算器, 可实现多个商业软件间的实时通信、数据交互与进程调度, 确保高效、高精度的多学科耦合计算。

具体而言, 将列车动力学仿真得到的电磁铁位移和加速度响应传输至耦合计算器, 结合轨道功能面位

移响应, 求解得到悬浮力和导向力; 然后将该电磁力作为外部载荷加载到轨道与桥梁有限元模型, 开展轨道与桥梁结构瞬态动力学计算, 将轨道功能面位移响应传输至耦合计算器, 结合电磁铁位移和加速度响应更新计算电磁悬浮力和导向力, 并将其作为下一时间步的列车系统动力学模型的输入。如此循环直至仿真结束, 仿真流程如图6所示。需要说明的是, 仿真计算时轨道静态不平顺将与轨道功能面的弹性变形叠加, 从而更真实地模拟悬浮和导向间隙的动态变化。

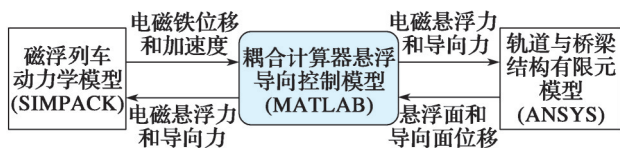


图6 磁浮列车-轨道-桥梁耦合动力学仿真流程图

Fig. 6 Flowchart of dynamic simulation of maglev train-guideway-bridge coupled system

2 温差荷载下轨道和桥梁结构变形

2.1 热-结构耦合分析模型与温度场特性

为研究日照作用下高速磁浮板式轨道结构的温度分布与变形特性, 基于传热学理论建立了轨道-桥梁三维热-结构耦合有限元模型^[30]。

综合考虑太阳辐射、对流换热及辐射换热3种热交换形式, 采用瞬态热传导方程描述结构内部温度场的时空演化。太阳辐射强度依据上海地区气象资料计算, 计入直接辐射、散射与地面反射的综合作用, 并考虑结构走向(南北)及遮挡效应对各表面辐射量的影响。

本文以上海地区作为研究对象, 根据国家气象科学数据中心2011—2020年每年7月份的气温统计资料, 最高气温多年平均值为33.78℃, 最低平均气温为26.89℃, 因此取最低平均气温为初始温度。该月最高气温出现在15:00, 最低气温出现在日出前。假定轨道板和桥梁为南北走向(与太阳运行轨迹垂直), 太阳从桥梁右侧升起。在太阳照射下, 轨道表面无遮挡部分受太阳直接辐射、天空散射及地面反射辐射三者综合作用, 而有遮挡部分不受太阳直接辐射。据此计算得到一天内轨道板在不同时刻下的太阳辐射量^[31]。

对模型施加随时间变化(24 h周期)的太阳辐射与环境温度荷载, 进行瞬态热分析。首先将仿真得到的竖向温度分布与《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)^[32]中的温度梯度曲线进行对比, 结果如图7所示。由图7可知, 仿真与规范曲线拟合度达到95%以上, 验证了有限元模型与三维场方法的有效性。

采用上述模型对板式轨道和桥梁进行瞬态热分析, 得到其在24 h内的三维温度场分布, 如图8所示。结果

表明, 在14:00时轨道和桥梁的温度达到最高, 温度变化幅度约为27℃。18:00日落后, 轨道不再受太阳辐射影响, 轨道和桥梁的温度开始下降。由于轨道和桥梁表面直接与外界环境对流换热, 其表面温度下降更快, 2:00以后内部温度高于表面温度。

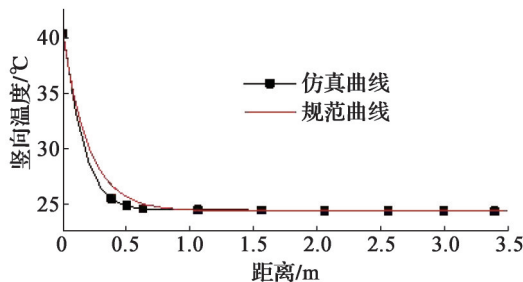


图7 简支梁竖向温度对比

Fig. 7 Comparison of vertical temperature of simply supported beams

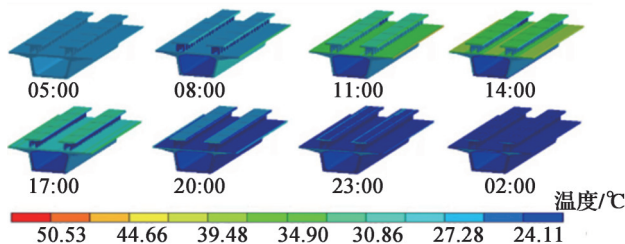


图8 轨道桥梁温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution of the guideway bridge

2.2 日照温差下轨道与桥梁变形

日照作用下, 轨道和桥梁仅表面直接受到太阳辐射, 其内部温度场分布极不均匀, 导致结构显著变形。2.1节分析表明, 14:00时轨道桥梁左右侧竖向和横向温度达到峰值, 故本节对该时刻的温度变形展开分析。将14:00时刻的三维温度场施加于轨道与桥梁有限元模型, 计算得到垂向、横向变形云图如图9所示。结果表明, 日照作用下轨道和桥梁发生了较大的竖向挠曲变形, 跨中处轨道与桥梁上拱变形最大值为3.59 mm, 小于CJJ/T 310—2021《高速磁浮交通设计标准》^[33]规定的限值 $L/6500$ ($L=30.96$ m时, 限值为4.76 mm); 轨道与桥梁结构的横向变形最大值为1.26 mm, 小于该标准规定的限值 $L/5800$ (5.34 mm)。

轨道悬浮、导向功能面与磁浮车辆电磁铁之间产生电磁力, 在温差作用下其垂向、横向变形将直接影响磁浮车辆的运行稳定性和乘坐舒适性。因此, 有必要对温差荷载下轨道悬浮面和导向面的变形进行细致分析。图10(a)和图10(b)分别展示了左线(靠阳侧)和右线轨道两侧悬浮面的垂向上拱变形沿纵向的分布。可以发现, 靠近桥梁中心线的内侧悬浮面(左线右侧, 右线左侧)的垂向变形略大于外侧悬浮面, 内、外侧悬浮面的上拱变形最大值分别为3.46 mm和3.21 mm。

从图10还可以看出, 承轨梁横缝处存在不超过0.3 mm的局部下凹变形, 梁端处悬浮面略微下沉, 最大下沉量约为0.4 mm。

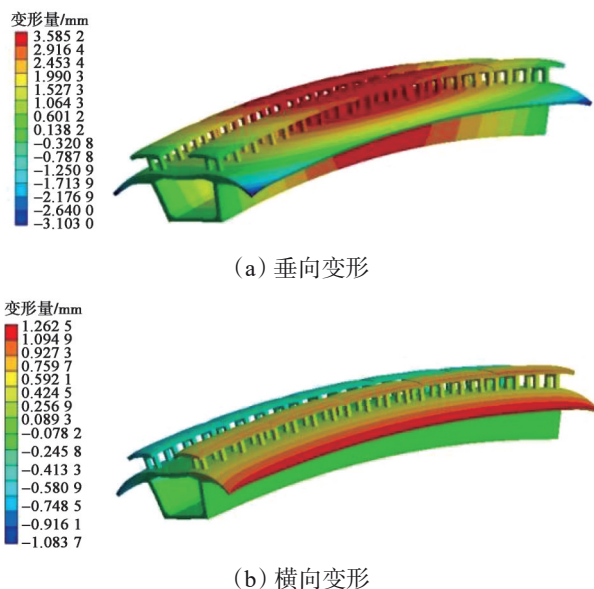


图9 日照温差下轨道与桥梁结构变形云图

Fig. 9 Contour plot of guideway and bridge structural deformation under sunshine-induced temperature differences

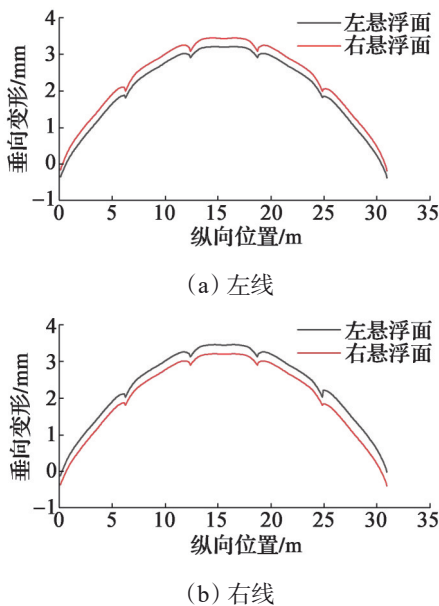


图10 日照温差下轨道悬浮面垂向变形沿纵向的分布

Fig. 10 Longitudinal distribution of vertical deformation of the levitation surface under sunshine-induced temperature differences

图11显示了左、右线轨道两侧导向面的横向变形沿纵向的分布。结果表明, 左、右线轨道均整体向桥梁外侧偏移, 左线左、右侧导向面的最大横向变形分别为-0.77 mm和-0.28 mm, 右线左、右侧导向面的最大横向变形分别为0.43 mm和0.93 mm。左右线轨道同侧导向面的横向变形量沿纵向变化很小, 但轨距增加了约0.5 mm。分析图10和图11曲线得知, 日照温差荷载下轨道与桥梁结构的温度变形主要表现为上拱变形,

与列车荷载下桥梁的垂向变形方向相反; 温度变形引起的悬浮面垂向不平顺较大, 但导向面横向不平顺很小。

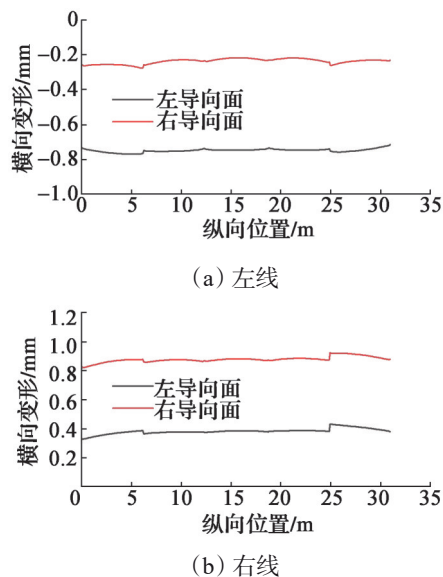


图11 日照温差下轨道导向面横向变形沿纵向的分布

Fig. 11 Longitudinal distribution of lateral deformation of the guidance surface under sunshine-induced temperature differences

2.3 降温温差下轨道与桥梁变形

依据TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[32], 将降温温差设置为正温差乘以-0.5。图12给出了降温温差下轨道与桥梁结构的垂向、横向变形云图。图12(a)显示, 轨道和桥梁整体上呈现下挠弯曲变形, 桥梁端部翼缘出现局部上翘变形; 梁体的最大下挠变形为-2.59 mm, 小于CJJ/T 310—2021《高速磁浮交通设计标准》规定的限值 $L/5400$ (5.73 mm)。由图12(b)可见, 轨道和桥梁结构的横向变形幅值不大, 桥梁翼缘的最大横向变形为0.92 mm, 梁体的横向变形不超过0.45 mm, 远小于规范规定的限值 $L/5800$ (5.34 mm)。

降温温差所引起的轨道悬浮面的垂向变形沿纵向的分布曲线如图13所示。由图13可见, 梁跨内左、右线4个悬浮面的垂向变形曲线相似, 均呈现为桥梁中部下挠、两端上翘的趋势, 且跨中处内侧悬浮面的下挠变形略大于外侧悬浮面; 跨中处悬浮面的最大下挠变形为-1.96 mm, 梁端处悬浮面的最大上翘变形为1.27 mm。图14给出了降温温差下轨道导向面的横向变形沿纵向的分布。与日照温差引起的导向面横向变形规律相似, 降温温差下左、右线轨道两侧的导向面向同一侧偏移, 最大横向偏移量仅为0.42 mm; 温度变形引起的轨道导向面的横向不平顺很小, 轨距仅增大约0.1 mm。图13和图14表明降温温差下轨道与桥梁结构的温差变形主要表现为下挠变形, 与列车荷载下桥梁的垂向变形方向相同, 二者叠加后将加剧磁浮列车-轨道-

桥梁的耦合振动,理论上会降低磁浮车辆的动力学性能。

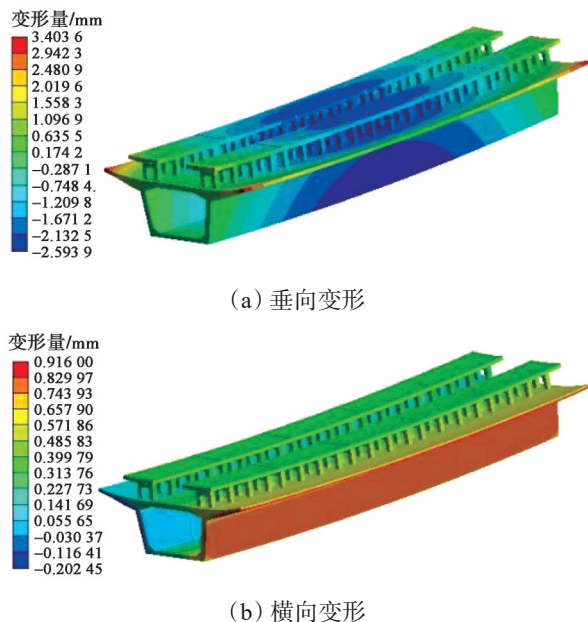


图 12 降温温差下轨道与桥梁结构变形云图

Fig. 12 Contour plot of guideway and bridge structural deformation under cooling-induced temperature differences

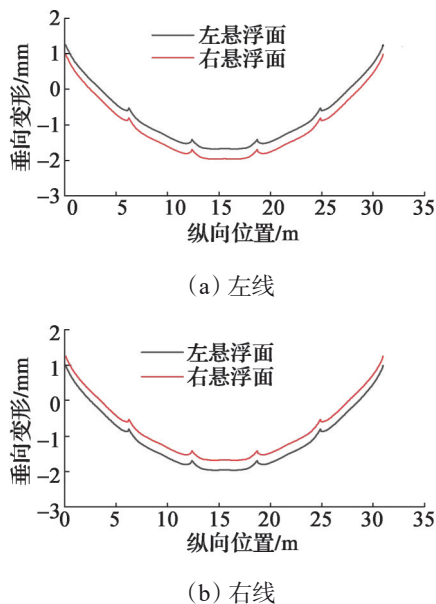


图 13 降温温差下轨道悬浮面垂向变形沿纵向的分布
Fig. 13 Longitudinal distribution of vertical deformation of the levitation surface under cooling-induced temperature differences

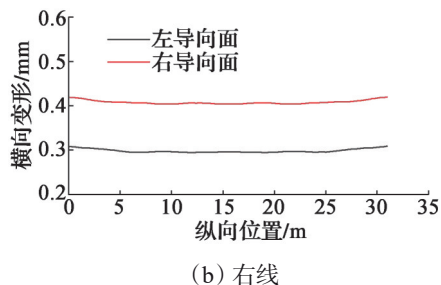
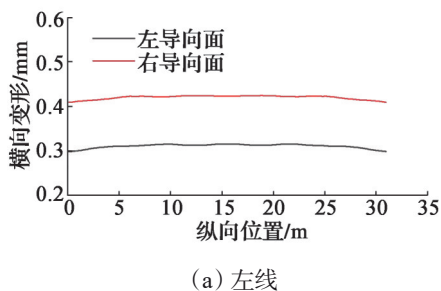


图 14 降温温差下轨道导向面横向变形沿纵向的分布

Fig. 14 Longitudinal distribution of lateral deformation of the guidance surface under cooling-induced temperature differences

3 考虑温度变形时列车-轨道-桥梁耦合振动响应分析

将热-结构耦合有限元模型计算得到的轨道板悬浮面和导向面的变形量,分别叠加到高低不平顺与轨向不平顺中^[34],以在车桥耦合计算中考虑温差导致的桥梁变形影响。

为节约计算资源,轨道桥梁模型共 36 跨,研究团队仅建立 6 跨精细化模型(采用实体单元对轨道板结构进行模拟,将轨道梁简化为梁单元),其余跨为简化轨道梁模型(轨道板和桥梁均被简化为梁单元),在保证涵盖多跨桥梁的同时提高计算效率。在仿真计算中,全程均叠加温度变形。第 2~3 s 时间段为磁浮列车通过精细化轨道板-桥梁模型区段,后续提取响应时主要考虑该时间段内的仿真结果。

为考察高速工况下的耦合振动响应,将列车速度设置为 600 km/h。本章将开展考虑温差变形影响的磁浮列车-轨道-桥梁耦合振动响应分析,仿真时还考虑了轨道随机静态几何不平顺。在车辆系统方面,分别选取了头车车体前部与中部振动加速度、头车左侧第 1 位和第 3 位悬浮架振动加速度、头车左侧第 1 位和第 3 位悬浮/导向电磁铁前端间隙响应进行分析。在轨道与桥梁结构方面,在列车通过的左线跨中处设置了轨道悬浮面与导向面、轨道板顶面中心、桥梁顶面中心的振动响应观测点。

3.1 考虑日照温差变形时车-轨-桥耦合振动响应

3.1.1 车辆系统动力学响应

考虑日照温差下轨道与桥梁结构的温度变形,图 15 给出了磁浮列车以 600 km/h 通过 30.96 m 双线简支梁桥时头车车体的加速度响应时程图。由图 15 可知,车体端部的垂向、横向加速度明显大于车体中部,车体端部的垂向、横向加速度幅值分别为 1.13 m/s^2 与 0.42 m/s^2 ,两者均小于 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[35]规定的限值 (2.5 m/s^2)。车体端部的垂向、横向加速度响应主频分别为 1.00 Hz 和 1.60 Hz,车辆端部的垂向、横向 Sperling 平稳性指标值

分别为2.82和2.45, 总体处于“合格”水平。

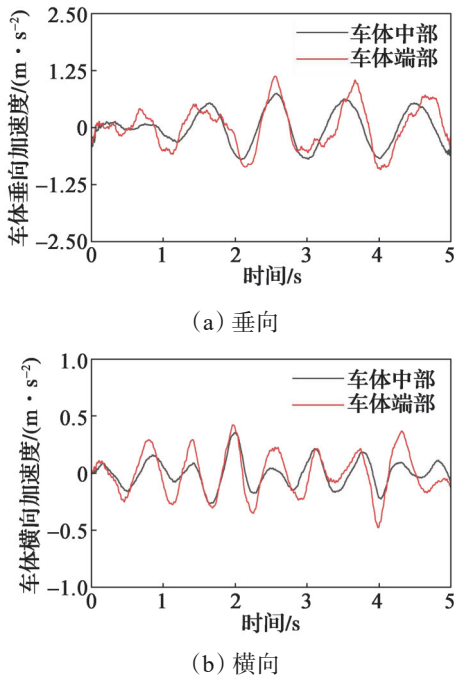


图15 考虑日照温差变形时头车车体加速度响应

Fig. 15 Carbody acceleration response of the head car considering sunshine-induced temperature difference deformation

图16为头车第1、3位悬浮架垂向、横向加速度响应时程图。由图16(a)可知, 第1位悬浮架的垂向加速度响应明显大于第3位, 两者的垂向加速度最大值分别为 100.56 m/s^2 和 50.16 m/s^2 。图16(b)表明, 第1、3位悬浮架的横向加速度响应差别不大, 最大值分别为 78.78

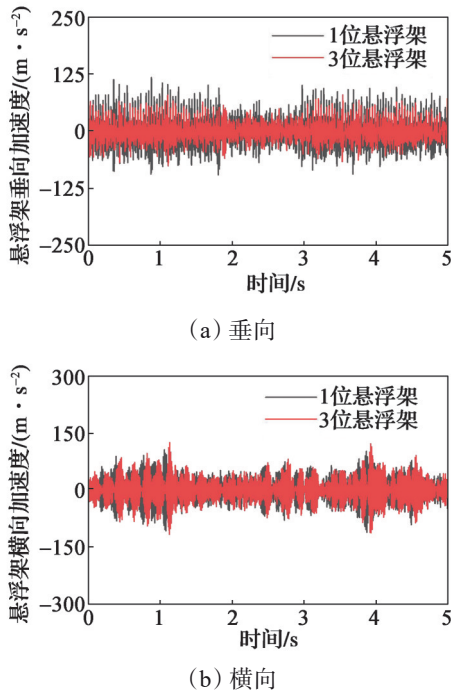


图16 考虑日照温差变形时头车悬浮架加速度响应

Fig. 16 Levitation bogie acceleration response of the head car considering sunshine-induced temperature difference deformation

m/s^2 和 81.48 m/s^2 。与图15比较可知, 悬浮架的振动水平显著高于车体, 说明车辆二系悬挂有效衰减了悬浮架的中高频振动。

图17显示了头车第1、3位悬浮电磁铁和导向电磁铁前端的间隙波动曲线。图17(a)显示第1位悬浮电磁铁前端的间隙波动弱于第3位悬浮电磁铁, 两者的悬浮间隙最大偏移量分别为 1.51 mm 和 2.25 mm 。从图17(b)可以看出, 导向间隙的最大偏移量分别为 2.61 mm 和 2.55 mm 。相对于 10 mm 的额定间隙, 考虑日照温差变形、轨道静态不平顺、桥梁弹性变形时 (未考虑横风与列车风效应), 头车悬浮和导向间隙的波动处于可接受的范围内 ($\leq 4 \text{ mm}$)。

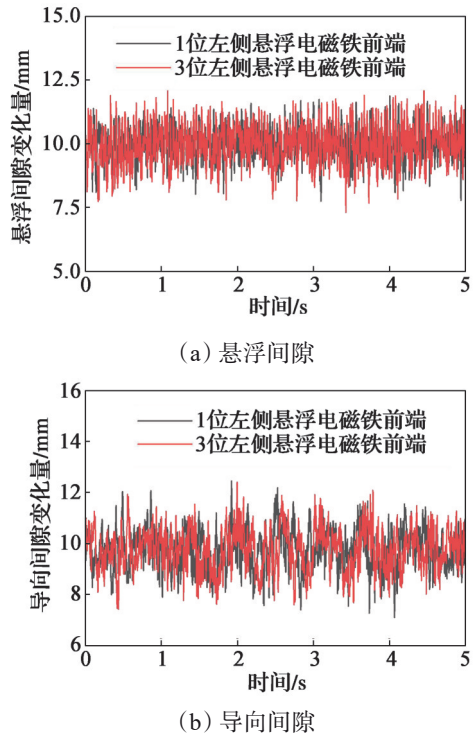


图17 考虑日照温差变形时头车悬浮和导向间隙响应

Fig. 17 Levitation and guidance gap response of the head car considering sunshine-induced temperature difference deformation

3.1.2 轨道与桥梁结构振动响应

图18给出了磁浮列车以 600 km/h 通过时桥梁跨中处轨道与桥梁观测点的位移时程响应。图18(a)显示轨道左、右侧悬浮面的最大垂向位移分别为 1.86 mm 和 1.05 mm , 前者大于上海高速磁浮线“梁轨一体式”复合轨道梁的跨中垂向挠度实测值 (1.6 mm)^[19]。图18(b)表明左、右侧导向面的横向位移均很小, 最大横向位移约 0.34 mm 。由图18(c)和图18(d)可知, 轨道板和桥梁顶面中部的垂向位移最大值分别为 1.43 mm 和 0.61 mm 。

图19展示了轨道与桥梁观测点的垂向加速度时程响应。图19(a)表明跨中处右侧悬浮面的垂向加速度响应略大于左侧, 垂向加速度最大值为 24.25 m/s^2 。图19(b)显示右侧导向面的横向加速度响应略大于左侧, 最大横向加速度约 8.64 m/s^2 。由图19(c)和图19(d)可知,

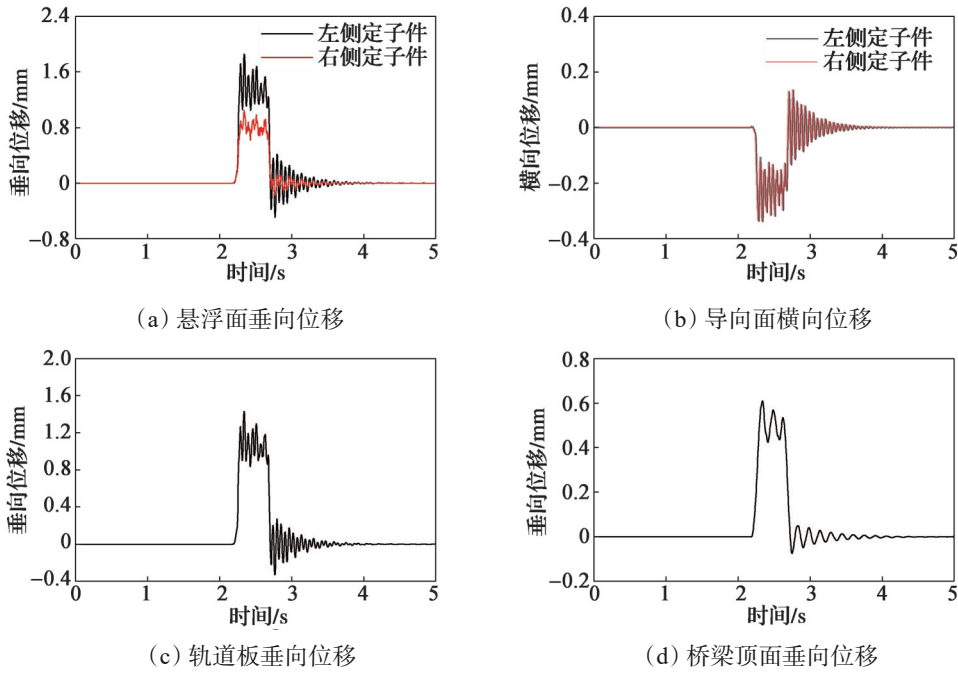


图 18 考虑日照温差变形时跨中处轨道与桥梁位移响应

Fig. 18 Guideway and bridge displacement response at the mid-span considering sunshine-induced temperature difference deformation

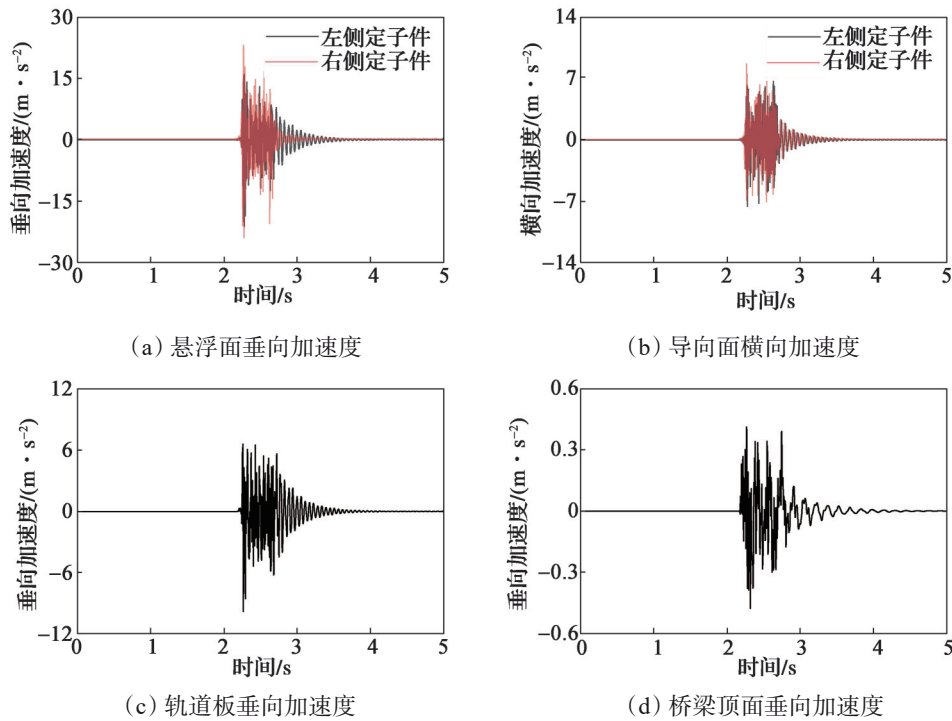


图 19 考虑日照温差变形时跨中处轨道与桥梁加速度响应

Fig. 19 Guideway and bridge acceleration response at the mid-span considering sunshine-induced temperature difference deformation

跨中处轨道板和桥梁顶面中部的垂向加速度幅值分别为 9.83 m/s^2 和 0.48 m/s^2 。跨中处悬浮面的垂向加速度幅值约为轨道板的 2.5 倍和桥梁顶面的 50 倍。

3.2 考虑降温温差变形时车-轨-桥耦合振动响应

3.2.1 车辆系统动力学响应

考虑降温温差下轨道与桥梁结构的温度变形，仿真计算了列车以 600 km/h 通过时列车-轨道-桥梁耦合振

动响应。图 20 给出了列车头车车体的加速度时程响应曲线。头车车体前部与中部的垂向加速度最大值分别为 0.89 m/s^2 与 0.69 m/s^2 ，横向加速度最大值分别为 0.41 m/s^2 与 0.33 m/s^2 ，均小于 GB/T 5599—2019《机车车辆动力性能评定及试验鉴定规范》规定的限值 2.5 m/s^2 。头车前部的垂向、横向 Sperling 平稳性指标值分别为 2.71 和 2.44，总体处于“良好”水平。

图 21 是头车第 1、3 位悬浮架的加速度时程响应曲

线。图21(a)显示第1位悬浮架的垂向加速度明显大于第3位悬浮架, 两者的垂向加速度最大值分别为 88.15 m/s^2 和 44.42 m/s^2 。由图21(b)可知, 第1、3位悬浮架的横向加速度响应水平相当, 最大值分别为 78.90 m/s^2 和 82.13 m/s^2 。

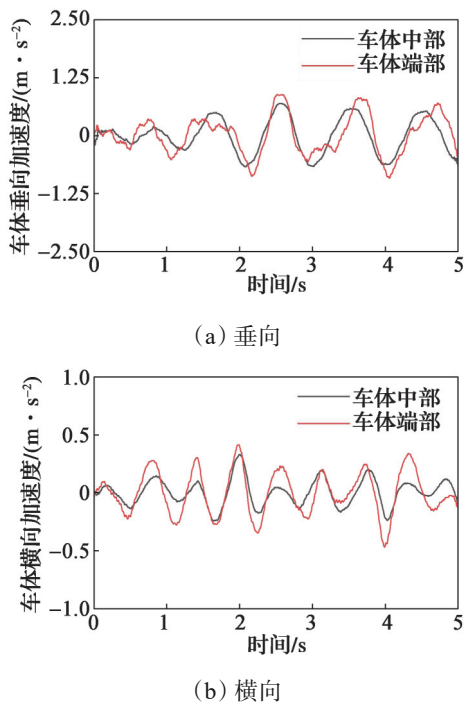


图20 考虑降温温差变形时头车车体加速度响应

Fig. 20 Carbody acceleration response of the head car considering cooling-induced temperature difference deformation

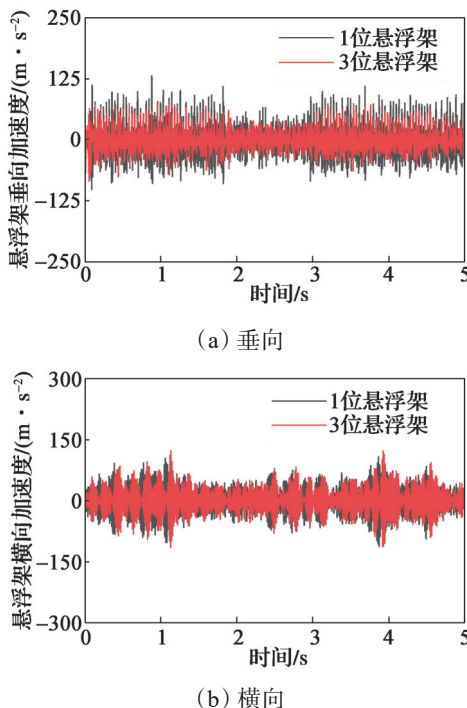


图21 考虑降温温差变形时头车悬浮架加速度响应

Fig. 21 Levitation bogie acceleration response of the head car considering cooling-induced temperature difference deformation

图22给出了头车第1、3位悬浮电磁铁和导向电磁铁前端的间隙波动曲线。结果表明, 第1、3位左侧悬

浮电磁铁前端的悬浮间隙最大偏移量分别为 2.21 mm 和 1.50 mm ; 第1、3位导向电磁铁前端的导向间隙最大偏移量分别为 2.45 mm 和 2.25 mm 。均在安全波动范围内。在未考虑空气动力效应的前提下, 车辆悬浮和导向间隙的波动处于可接受的范围内 ($\leq 4 \text{ mm}$)。

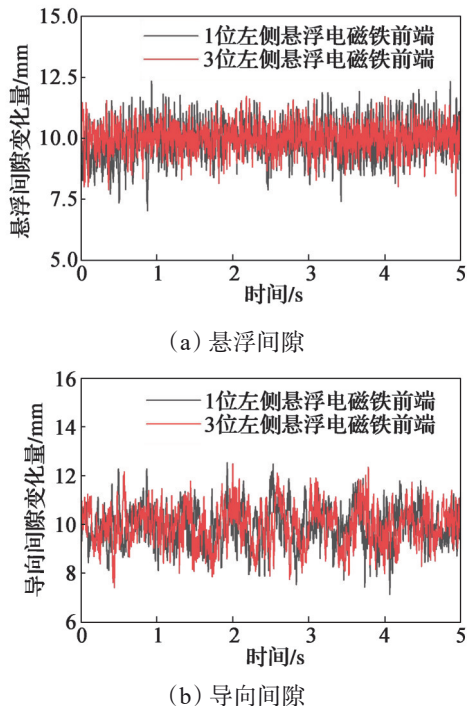


图22 考虑降温温差变形时头车悬浮和导向间隙响应

Fig. 22 Levitation and guidance gap response of the head car considering cooling-induced temperature difference deformation

3.2.2 轨道与桥梁结构振动响应

图23给出了列车以 600 km/h 通过时轨道和桥梁观测点的位移时程响应曲线。由图23(a)可知, 跨中处左、右侧悬浮面的垂向位移幅值分别为 1.81 mm 和 1.01 mm 。图23(b)显示左、右侧导向面的横向位移响应曲线几乎完全重叠, 最大横向位移为 0.34 mm 。图23(c)和图23(d)结果表明跨中处轨道板中部的垂向位移幅值为 1.39 mm , 而桥梁顶面中部的垂向位移最大值仅约 0.59 mm 。

图24是跨中处轨道与桥梁结构观测点的加速度时程响应。图24(a)和图24(b)显示跨中处悬浮面的垂向加速度最大值达 23.35 m/s^2 , 导向面的横向加速度最大值为 8.41 m/s^2 。由图24(c)和图24(d)可知, 轨道板和桥梁顶面的垂向加速度最大值分别为 9.62 m/s^2 和 0.53 m/s^2 。跨中处悬浮面的垂向加速度幅值约为轨道板的2.4倍和桥梁顶板的44倍。

4 有无温度变形时耦合振动响应比较

为对比温度变形的影响, 本章将统计无温度变形(工况 I)、日照温差变形(工况 II)、降温温差变形

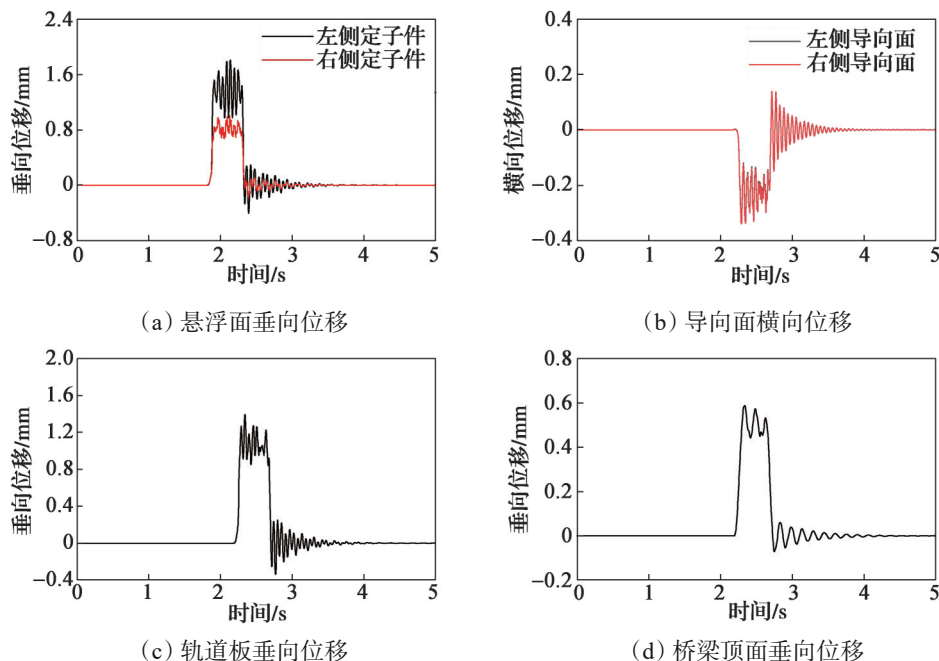


图 23 考虑降温温差变形时跨中处轨道与桥梁位移响应

Fig. 23 Guideway and bridge displacement response at the mid-span considering cooling-induced temperature difference deformation

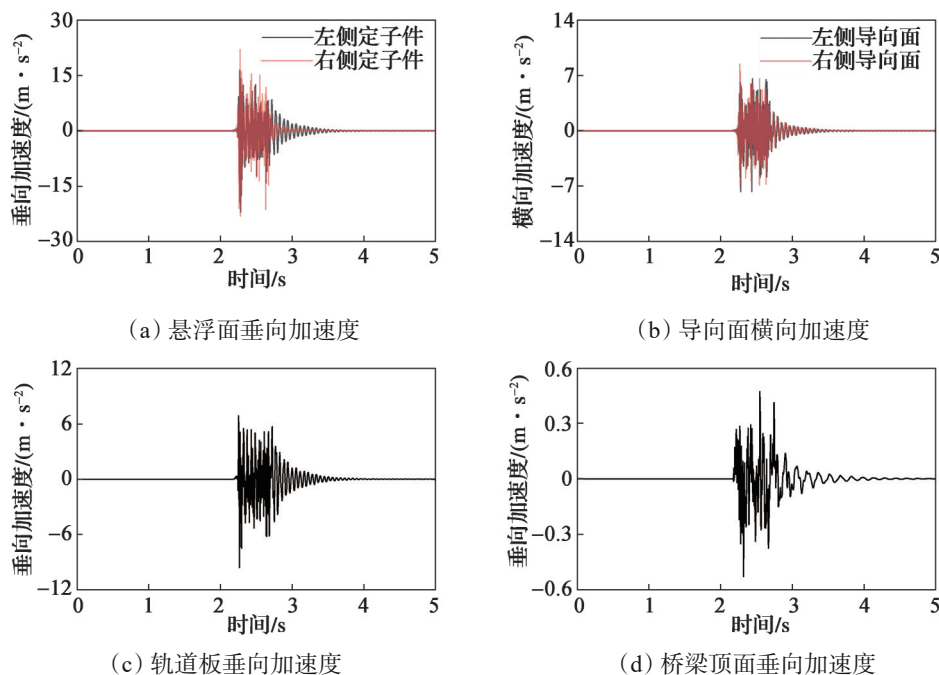


图 24 考虑降温温差变形时跨中轨道与桥梁加速度响应

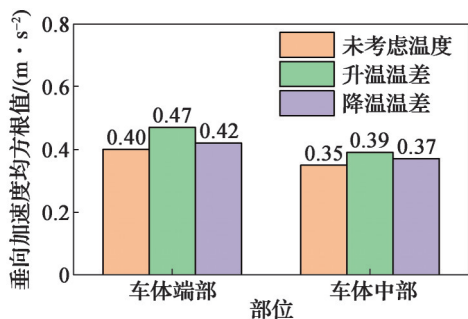
Fig. 24 Guideway and bridge acceleration response at the mid-span considering cooling-induced temperature difference deformation

(工况Ⅲ) 3种工况下磁浮车辆、轨道及桥梁的动力学响应特征值, 从而更深入揭示温度变形对新型轨道与桥梁结构温度变形的动力学影响规律。

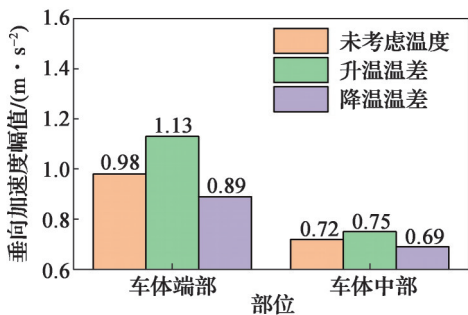
4.1 磁浮车辆动力学响应比较

图 25 分别给出了 3 种工况下列车以 600 km/h 速度通过桥梁时头车车体端部与中部的垂向加速度均方根值与幅值。由图 25 可知, 车体前端及中部的垂向加速度均在工况Ⅱ下最大, 在工况Ⅰ下最小。3 种工况下车体前端垂向加速度幅值分别为 0.98 m/s^2 、 1.13 m/s^2 和 0.89

m/s^2 , 车体中部的垂向加速度幅值分别为 0.72 m/s^2 、 0.75 m/s^2 和 0.69 m/s^2 。分析可知, 车体垂向加速度主要受中长波的影响。桥梁跨度约为 30 m, 在温度影响下产生的变形为中长波, 因此对车体垂向加速度影响较为明显。轨道和桥梁在升温工况下的变形量明显大于降温工况, 导致车辆振动更加剧烈; 车体端部垂向加速度幅值明显增大, 而车体中部垂向加速度增幅较小。在降温工况下, 车体端部与中部垂向加速度幅值均有一定的减小。总体而言, 日照升温、降温温差均对车体加速度产生不利影响, 其中升温影响更显著。



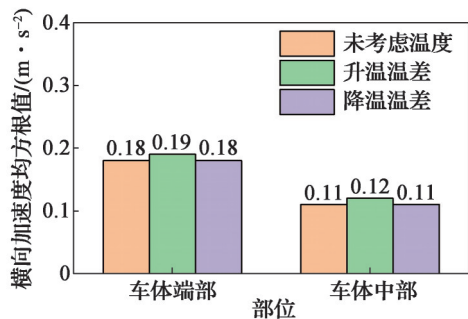
(a) 加速度均方根值



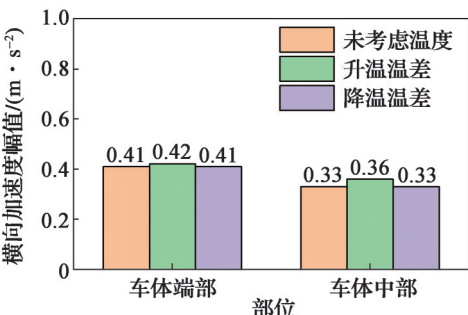
(b) 加速度幅值

图25 3种工况下车体垂向加速度均方根值与幅值
Fig. 25 RMS values and amplitudes of carbody vertical acceleration under three conditions

图26分别给出了3种工况下头车车体端部、中部的横向加速度均方根值与幅值。3种工况下车体端部与中部的横向加速度均方根值变化并不明显;车体端部横向加速度幅值分别为 0.41 m/s^2 、 0.42 m/s^2 、 0.41 m/s^2 ,中部横向加速度幅值分别为 0.33 m/s^2 、 0.36 m/s^2 、 0.33 m/s^2 。日照作用引起的升温与降温变形对车体横向加速度的影响较小。



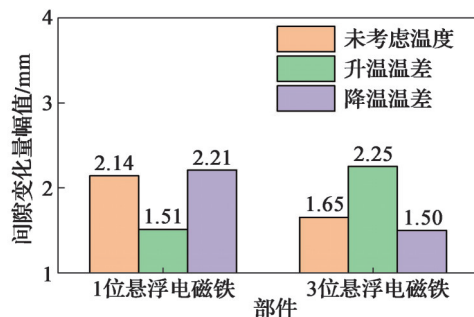
(a) 加速度均方根值



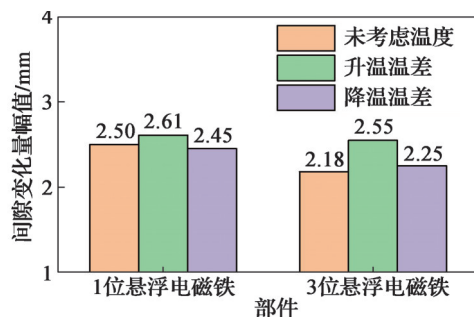
(b) 加速度幅值

图26 3种工况下车体横向加速度均方根值与幅值
Fig. 26 RMS values and amplitudes of carbody lateral accelerations under three conditions

图27所示为3种工况下头车第1、3位悬浮架左侧前端的悬浮、导向间隙偏移量幅值。由图27可知,3种工况下头车第1、3位悬浮架左侧前端悬浮与导向间隙偏移量幅值均有微小变化,最大偏移量均未超过 3 mm 。



(a) 悬浮间隙偏移量



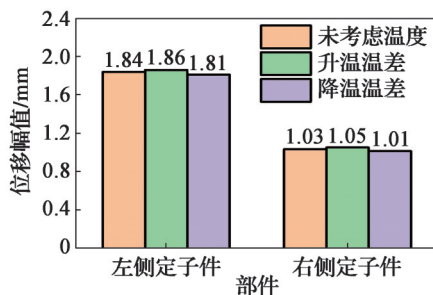
(b) 导向间隙偏移量

图27 3种工况下悬浮和导向间隙最大偏移量

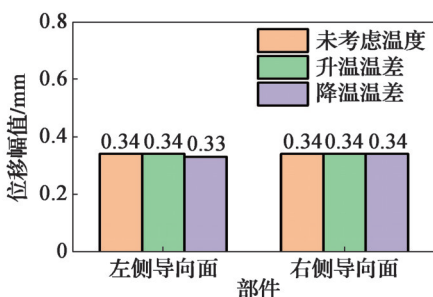
Fig. 27 Maximum offsets of levitation and guidance gaps under three conditions

4.2 轨道与桥梁结构振动响应比较

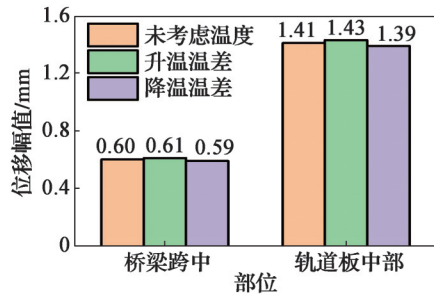
图28比较了3种工况下轨道与桥梁的跨中位移幅值,图29则比较了加速度幅值。从图28可知,3种工况下桥梁跨中、轨道板中部位置以及左右侧导向面横



(a) 悬浮面垂向位移



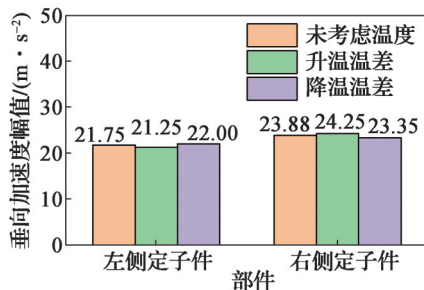
(b) 导向面横向位移



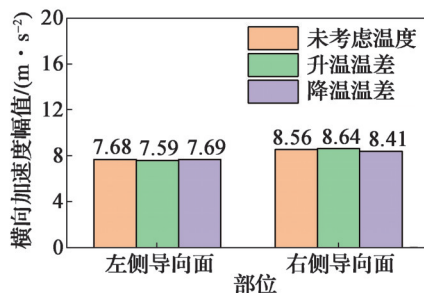
(c) 桥梁顶面与轨道板垂向位移幅值

图 28 3 种工况下轨道桥梁位移幅值对比

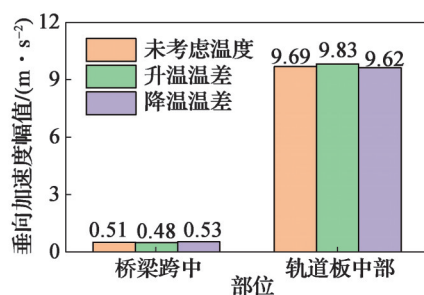
Fig. 28 Comparison of amplitudes in guideway and bridge displacements under three conditions



(a) 悬浮面垂向加速度



(b) 导向面横向加速度



(c) 桥梁顶面与轨道板垂向加速度幅值

图 29 3 种工况下轨道导向轨和桥梁加速度幅值对比

Fig. 29 Comparison of amplitudes in guideway and bridge accelerations under three conditions

向位移幅值无显著变化。从图 29 可知，3 种工况下跨中不同位置处轨道和桥梁的加速度幅值差异极小，说明温度变化对轨道和桥梁动力学响应影响甚微。

5 结论

本文为研究轨道梁温差变形对列车-轨道-桥梁耦合

振动响应的影响，以梁轨分离式高速磁浮轨道-桥梁结构为对象，分析了不同温差荷载下轨道梁变形，结合轨道桥梁变形结果分析温差变形对列车-轨道-桥梁耦合振动响应的影响规律，发现温差变形对车辆系统响应会有显著影响，主要结论如下：

①日照正温差荷载下“梁轨分离式”高速轨道与桥梁结构整体上拱，桥梁跨中与轨道悬浮面最大垂向上拱变形分别为 3.59 mm 与 3.46 mm；在降温反温差作用下，结构整体呈现下挠，最大垂向下挠变形分别为 -2.59 mm 与 -1.96 mm。2 种温度荷载工况下，结构的垂向与横向变形均小于相应规范限值。

②日照作用下引起的轨道和桥梁升温变形显著影响车辆系统响应。桥梁跨度约为 30 m，在温度影响下产生的变形为中长波，因此对车体垂向加速度影响较为明显，与无温度变形相比车体垂向加速度幅值从 0.98 m/s² 增大至 1.13 m/s²，增大了 15.31%；同时，悬浮间隙最大偏移量从 1.65 mm 增大至 2.25 mm，增大了 36.36%，均处于可接受范围内。降温变形对车辆系统响应影响较小，与升温变形呈相反变化趋势，车体垂向加速度从 0.98 m/s² 减小至 0.89 m/s²，减小了 9.18%；悬浮间隙最大偏移量从 1.65 mm 减小至 1.50 mm，减小了 9.09%。

③温度变化对轨道和桥梁动力学响应影响有限。3 种温度梯度下桥梁跨中、轨道板中部位置以及左右侧悬浮面垂向位移与导向面横向位移幅值变化并不明显，且轨道和桥梁各位置加速度幅值差异也不明显。

参考文献：

- [1] 王滢, 张昆仑, 张慧娴, 等. 高速磁浮交通系统制式特征与适应性[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 19-30.
WANG Ying, ZHANG Kunlun, ZHANG Huixian, et al. Characteristics and adaptability of different types of high-speed maglev transportation systems[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 19-30.
- [2] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.
- [3] LIU M B, FENG Y, ZENG G F. Research of the track irregularity spectrum of Shanghai high-speed transrapid demonstration line[J]. Vehicle system dynamics, 2024, 62(8): 2054-2078.
- [4] 李伟强, 冯洋, 赵春发. 桥梁竖向变形引起的中低速磁浮轨道不平顺分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 77-82.
LI Weiqiang, FENG Yang, ZHAO Chunfa. Analysis on track irregularities of medium-low speed maglev transit induced by bridge deformation[J]. Railway standard design, 2021, 65 (6): 77-82.

- [5] 顾芸, 滕念管. 温差作用下磁浮轨道梁变形分析及比较[J]. 铁道建筑, 2011(6): 18-20.
GU Yun, TENG Nianguan. Analysis and comparison of maglev guideway deformation under action of temperature difference[J]. Railway engineering, 2011(6): 18-20.
- [6] 张凯, 赵春发, 蔡文峰, 等. 低速磁浮轨道梁的温度效应分析[J]. 铁道标准设计, 2013(10): 73-77.
ZHANG Kai, ZHAO Chunfa, CAI Wenfeng, et al. Temperature effect of guideway girder for low-speed maglev transit[J]. Railway standard design, 2013(10): 73-77.
- [7] 苏靖海, 段树金. 钢-混凝土双面组合箱梁日照温度效应研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(4): 11-14.
SU Jinghai, DUAN Shujin. Study of temperature effects of double steel-concrete composite box girder by solar radiation[J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university(natural science edition), 2013, 26(4): 11-14.
- [8] ABID S R, TAYSI N, ÖZAKÇA M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete boxgirders[J]. Construction and building materials, 2016, 106: 523-532.
- [9] ZHANG L, HUANG J Y. Thermal effect on dynamic performance of high-speed maglev train/guideway system[J]. Structural engineering and mechanics, 2018, 68(4): 459-473.
- [10] WU D H, SUN X D, CHANG Y, et al. The temperature effect analysis of high-speed maglev transit[C]//2019 4th International Conference on Automatic Control and Mechatronic Engineering (ACME 2019), 2019: 138-143.
- [11] 李国强, 王琛奥, 王志鲁, 等. 磁浮钢箱梁日照作用对车桥耦合振动的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 847-854.
LI Guoqiang, WANG Chenao, WANG Zhilu, et al. Thermal effect for steel box maglev guideway on vehicle-bridge coupled vibration response[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2021, 41(5): 847-854.
- [12] 邹波, 滕念管. 混凝土单箱双室磁浮轨道梁的日照温度场分布研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(4): 96-101.
ZOU Bo, TENG Nianguan. Temperature field analysis of concrete twin-celled single box maglev guideway caused by solar radiation[J]. Railway standard design, 2019, 63(4): 96-101.
- [13] 莫然, 滕念管. 高速磁浮组合式轨道梁的温度变形[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 16-20.
MO Ran, TENG Nianguan. Temperature deformation of composite track girder of high speed maglev[J]. Railway engineering, 2020, 60(11): 16-20.
- [14] 王胤淇, 滕念管. 考虑内腔空气影响的高速磁浮轨道箱梁日照温度场研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 94-99.
WANG Yinqi, TENG Nianguan. Research on temperature field caused by solar radiation of high speed maglev track box girder considering influence of inner cavity air[J]. Railway engineering, 2022, 62(2): 94-99.
- [15] 文泉, 王春江, 孙向东, 等. 高速磁浮整体式预应力轨道梁温度场与变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1168-1176.
WEN Quan, WANG Chunjiang, SUN Xiangdong, et al. Temperature field and deformation of high-speed maglev prestressed overall guideway beam[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(5): 1168-1176.
- [16] 刘德军, 梅甫良. 中低速磁浮单线轨道梁日照温度场分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(21): 5-8.
LIU Dejun, MEI Fuliang. Study on temperature field of single lane maglev guideway caused by solar radiation[J]. Shanxi architecture, 2021, 47(21): 5-8.
- [17] ZHAO C F, ZHAI W M. Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality[J]. Vehicle system dynamics, 2002, 38(3): 185-210.
- [18] 赵春发, 翟婉明. 磁浮车辆/轨道系统动力学(II): 建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 163-175.
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.
- [19] 赵春发, 冯洋, 翟婉明. 面向列车稳定舒适运行的磁浮交通车线动力学参数匹配设计[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 49-60.
ZHAO Chunfa, FENG Yang, ZHAI Wanming. Matching design of train and line dynamics parameters of maglev transportation oriented toward stable and comfortable train running[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 49-60.
- [20] 余华. 磁悬浮轨道梁刚度对列车走行性影响研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 25(1): 65-68.
YU Hua. Impact of rigidity of maglev track beam on running of train[J]. Railway standard design, 2005, 25(1): 65-68.
- [21] 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.
- [22] 蔡文涛. 基于车桥耦合振动分析高速磁浮轨道梁体系的动力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
CAI Wentao. Research on dynamic characteristics of high speed maglev track beam system based on coupling vibration of vehicle and bridge[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [23] 刘奇, 钟建辉, 李辉. 时速160~200 km新型磁悬浮并置简支箱梁设计研究[J]. 特种结构, 2021, 38(6): 35-40.
LIU Qi, ZHONG Jianhui, LI Hui. Design and research on a new type of maglev juxtaposed simply supported box girder[J]. Special structures, 2021, 38(6): 35-40.
- [24] 付善强, 梁鑫, 丁叁叁. 高速磁浮车-轨耦合系统动态机理与振动响应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(3):

- 314-320.
- FU Shanqiang, LIANG Xin, DING Sansan. Dynamic mechanism and vibration response of high-speed maglev vehicle-guideway coupling system[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2023, 51(3): 314-320.
- [25] 刘新武, 付善强, 梁鑫. 常导高速磁浮轨道梁分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(9): 31-36.
- LIU Xinwu, FU Shanqiang, LIANG Xin. Analysis and research on the track beam of normal conducting high-speed maglev[J]. Modern urban transit, 2024(9): 31-36.
- [26] 向活跃, 刘科宏, 李永乐. 列车荷载作用下的磁浮轨道梁响应极值条件[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(1): 27-34.
- XIANG Huoyue, LIU Kehong, LI Yongle. Extremum conditions of response of maglev guideway under train loads[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2025, 60(1): 27-34.
- [27] 黄今辉, 李晓龙, 余龙华. 高速磁浮列车搭接结构的相邻磁铁电流平衡算法[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 29-34.
- HUANG Jinhui, LI Xiaolong, SHE Longhua. Algorithm of current balance of adjacent electromagnets in joint-structure of high-speed maglev train[J]. Journal of the China railway society, 2013, 35(11): 29-34.
- [28] 龚俊虎, 谢海林, 鄢巨平. 高速磁浮梁轨分离式桥梁与轨道设计和创新[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 564-571.
- GONG Junhu, XIE Hailin, YAN Juping. Design and innovation of beam-track separated bridge and track in high-speed maglev[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(3): 564-571.
- [29] 盛晓鑫, 冯洋, 赵春发, 等. 高速磁浮轨道不平顺特征提取及分布特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2026, 23(2): 491-502.
- SHENG Xiaoxin, FENG Yang, ZHAO Chunfa, et al. Extraction of characteristic and analysis of distribution characteristics of high-speed maglev track irregularity[J]. Journal of railway science and engineering, 2026, 23(2): 491-502.
- [30] 魏凌云, 彭也也, 赵春发, 等. 日照作用下高速磁浮交通桥上板式轨道结构温度场分布及变形特性[J]. 铁道建筑, 2025, 65(12): 1-7.
- WEI Lingyun, PENG Yeye, ZHAO Chunfa, et al. Temperature distribution and deformation characteristics of slab track structure for high speed maglev transportation bridge under solar radiation[J]. Railway engineering, 2025, 65(12): 1-7.
- [31] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- PENG Yousong. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [32] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].
- TB 10092—2017 Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert[S].
- [33] CJJ/T 310—2021 高速磁浮交通设计标准[S].
- CJJ/T 310—2021 Standard for design of high-speed maglev transit[S].
- [34] 孙志昂, 杨新文, 赵文博, 等. 特殊附加变形对列车通过超大跨度铁路桥梁的动力影响[J]. 振动与冲击, 2024, 43(20): 10-17.
- SUN Zhiang, YANG Xinwen, ZHAO Wenbo, et al. Influence of special additional deformation on high-speed train dynamic responses on an ultra-large span railway bridge[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(20): 10-17.
- [35] 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].

Analysis of coupled vibration response of high-speed maglev train-guideway-bridge system considering temperature difference deformation effects

HUANG Zeng¹, PENG Yeye¹, GONG Junhu^{1,2}, LOU Huibin^{1,2}, ZHAO Chunfa¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: This paper investigates guideway-bridge structural deformations induced by temperature differences in maglev transportation systems and analyzes their influence on the dynamic performance of the train-guideway-bridge coupled system. Focusing on the beam-track separated guideway-bridge structure for high-speed maglev systems, daylong transient thermal analyses and thermal-structural coupling analyses were conducted to examine geometric deformations on the levitation and guidance surfaces under varying temperature difference loads. A maglev train-guideway-bridge coupled dynamical model was then established and used to calculate coupled vibration responses of the train-guideway-bridge system at a train speed of 600 km/h under three conditions: no temperature difference, sunshine-induced temperature differences, and cooling-induced temperature differences. Comparative analysis was conducted to evaluate how temperature-induced deformations affect the system dynamics. Analysis results are summarized as follows. Under sunshine-induced temperature difference loads, the levitation surface exhibited arching deformations approaching 3.5 mm. Under cooling-induced temperature difference loads, the mid-span levitation surface deflects downward by approximately 2.0 mm, while the levitation surface at the beam ends upwarps by roughly 1.3 mm. In both temperature difference cases, the absolute and differential deformations of the guidance surface in the lateral direction remain relatively small. Temperature-induced deformations significantly affect the dynamic performance of high-speed maglev trains. Compared with the no-temperature-difference condition, deformations from sunshine-induced temperature differences increase the amplitude of vertical accelerations at the carbody ends by 15.31% and the amplitude of dynamic levitation-gap offsets by 36.36%, while having a relatively minor effect on the dynamic response of the guideway and bridge.

Keywords: high-speed maglev train; electromagnetic suspension; beam-track separated structure; temperature difference load; levitation gap; running stability; coupled vibration; guideway irregularity

收稿日期: 2026-01-17; 修回日期: 2026-03-01
责任编辑: 詹 婧