DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.004

铁道机车车辆

新型中低速磁浮悬浮架车轨耦合振动响应分析

左飞飞[1]，张　敏[1]，马卫华[1]，罗世辉[1]，王爱彬[2]

（1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 成都　610031；
2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春　130062）

摘　要：车轨耦合振动是磁浮列车运行中面临的一个重要问题，文章基于一种新型中低速磁浮走行机构，对其车轨耦合振动响应进行分析，判断其结构的合理性。为了分析新型磁浮列车的“车辆–轨道梁”的耦合振动响应，基于Simpack、Simulink和ANSYS等相关软件平台建立了“车辆–控制–轨道梁”耦合动力学模型，对不同速度下的车轨耦合动力学响应进行数值仿真，获得耦合系统的动力学响应特征、速度对耦合系统动力学响应规律的影响，并对响应特征中出现的特殊响应现象进行分析。结果表明，随着速度的提高，轨道梁、悬浮模块和车体的动力学响应越剧烈，当速度在100～120 km/h时，耦合系统出现共振现象，同时存在于横向和垂向2个方向。此外，由于新型悬浮架独特的结构特点，会出现走行机构中部横向动力学响应大于端部的特殊响应情况。

关键词：中低速磁浮；车轨耦合振动；数值仿真；新型悬浮架；轨道梁；动力学响应；轨道不平顺

中图分类号：U237　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0024-07

Analysis of vehicle-guideway coupling vibration response for a new medium-low speed maglev levitation bogie

ZUO Feifei[1], ZHANG Min[1], MA Weihua[1], LUO Shihui[1], WANG Aibin[2]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: Vehicle-guideway coupling vibration is an important issue in the operation of maglev trains. In this paper, based on a new medium-low speed maglev running mechanism, the vehicle-guideway coupling vibration response was analyzed to determine the rationality of its structure. In order to analyze the vehicle-guideway coupling vibration response of the new maglev train, the vehicle-control-guideway coupling dynamic model was built by using Simpack, Simulink and ANSYS. Numerical simulations of vehicle-guideway coupling dynamic response at different speeds were performed, based on which the dynamic response characteristics of the coupling system and the influence of the speed on the dynamic response law of the coupling system were obtained, and the special response phenomena in response characteristics were analyzed. Results show that, with the increase of the speed, the dynamic responses of the guideway, levitation module, and carbody become more intense. When the speed is 100-120 km/h, resonance exists in the coupling system, both in lateral and vertical directions. In addition, due to the unique structural characteristics of the new levitation bogie, the lateral dynamic re-

收稿日期：2022-09-16
基金项目：国家自然科学基金项目（52102442）；高校科技创新项目（2682022CX060）
通信作者：马卫华（1979—），男，博士，研究员，硕士/博士生导师，主要从事机车及重载列车动力学、磁浮列车悬浮架设计及常导磁浮列车动力学等方面的研究；E-mail: mwh@swjtu.edu.cn

sponse in the middle of the running mechanism is larger than that at the end.

Keywords: medium-low speed maglev; vehicle-guideway coupling vibration; numerical simulation; new levitation bogie; guideway; dynamic response; track irregularity

0　引言

磁浮列车与轨道梁之间无机械接触，不受传统轮轨黏着的限制，具有爬坡能力强、转弯半径小、乘坐舒适性好、噪声低等诸多优点[1]。20 世纪 60 年代以来，多国相继开展磁浮列车技术研究，其中车轨耦合振动问题是磁浮技术研究的热点。在磁浮列车发展早期，日本的 HSST 磁浮列车在展示运行时，轨道梁与悬浮模块之间发生过强烈的振动摇晃[2-3]；德国 TR04 型磁浮列车在轻型钢轨上运行时，车辆与轨道梁之间出现过较强的耦合共振现象；美国的 AMT 磁浮列车由试验场转移至欧道明大学（Old Dominion University）后出现过强烈的耦合振动[4]；上海磁浮列车在库内钢轨上也出现了严重的耦合振动[5-6]。因此，车轨耦合振动问题引起了国内外学者的高度关注，研究车轨耦合系统的动态响应特征，探寻车轨耦合系统动态响应规律成为了磁浮技术研究的一大方向。

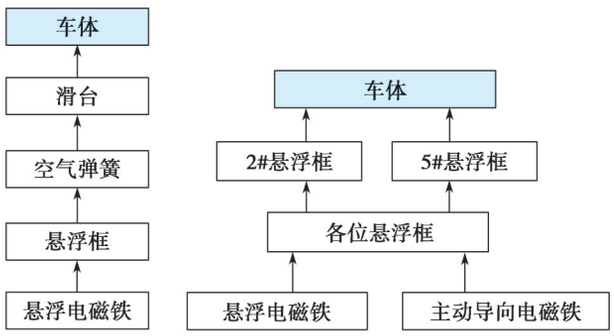
文献[7]分析了当磁浮列车以不同速度通过连续跨度周期支承轨道梁时弹性轨道梁的动态响应，并得到了产生车轨耦合共振的负载运行速度。文献[8]研究了当磁浮车辆通过柔性轨道梁时，车辆模型、运行速度、轨道不平顺、轨道梁结构参数、轨道梁类型等因素对轨道梁动力学响应的影响。文献[9]研究了 5 自由度车轨耦合模型在主动悬浮控制系统和轨道不平顺作用下，不同的速度和载荷对系统动力学响应的影响。文献[10]建立了 10 自由度 TR06 型磁浮列车的车辆动力学模型，得到了不同支承梁结构下的“车–桥”耦合动力学响应，以及速度对车辆动力学响应的影响。文献[11]对比了有无“F”轨作用下中低速磁浮列车的车轨耦合作用规律，不同桥梁型式对系统耦合振动的影响机理。文献[12]建立了“磁浮车–高架桥”垂向耦合动力学模型，运用“车–桥”垂向耦合程序，分别探讨了桥梁刚度和轨道不平顺对“磁浮车–高架桥”垂向动力学响应的影响。文献[13]对控制参数引起的车轨耦合失稳振动特性进行分析，并仿真计算不同轨道梁结构参数对中低速磁浮列车的车轨耦合振动规律的影响。文献[14]考虑悬浮平衡点附近的微小波动，建立了包括车辆模型、轨道模型、悬浮控制模型的车轨耦合垂向动力学模型，分别研究车体结构、悬挂参数、不同轨道不平顺、不同外力激扰等因素对车轨耦合系统动态响应的影响。文献[15]依据牛顿第二定律建立了悬挂中置式和端置式 2 种三悬浮架磁浮列车的车轨耦合垂向动力学模型，研究其车轨耦合振动与动力学特性。文献[16]以 TR08 型磁浮车辆和上海磁浮轨道梁为研究对象，对比不同轨道不平顺和不同速度下车轨耦合系统的垂向动态响应，探究不同参数对车轨耦合系统的影响。

本文基于 Simpack 和 ANSYS 相关仿真平台分别建立了新型中低速磁浮车辆动力学刚体模型和轨道梁柔性体模型，并联合 Simulink 软件建立“车辆–控制–轨道梁”耦合动力学模型。以新型悬浮架的中低速磁浮车辆耦合动力学模型为研究对象，分别对不同速度下的车轨耦合动力学响应进行了数值仿真，从而得到了耦合系统的动力学响应特征以及速度对轨道梁、悬浮模块与车体的动力学响应规律，并对动力学响应中出现的特殊响应现象进行分析。

1　新型悬浮架结构特点

新型悬浮架主要由悬浮框总成、侧梁总成、悬浮电磁铁总成、直线电机总成、空簧滑台总成和导向电磁铁总成所组成。在整体结构上，传统悬浮架采用 2 个普通的耦合抗侧滚装置的悬浮模块组成，每一个悬浮架作为车辆走行机构的 1 个单元，相同的悬浮架采用单元连接，它们共同组成车辆的走行机构；新型悬浮架的左右 5 对侧梁与 6 位悬浮框通过球铰耦合相连，形成一个整体，并通过弹性橡胶节点的布置实现运动解耦，1 个新型悬浮架单元便可作为车辆的整体走行机构。新型悬浮架的 6 位悬浮框包括 2 位端部悬浮框和 4 位中部悬浮框，其中端部悬浮框具有结构简单、质量小的特点，整体呈现为细长的“U”型梁状结构，而中部悬浮框由 2 个端部悬浮框单元通过钢结构连接而成，比端部悬浮框具有更高的可靠性。其中，第 2 位悬浮框与第 5 位悬浮框的几何中心设置有芯盘结构，用来传递悬浮架与车体之间的纵向力和横向力，同时芯盘位置也是曲线滑台的转动中心。

悬浮电磁铁通过弹性橡胶节点与悬浮框实现垂向连接，为磁浮车辆提供悬浮力和一定的导向力。但该新型悬浮架除了依靠悬浮电磁铁的横向力提供一定的导向作用外，还安装有主动导向电磁铁和悬浮电磁铁的横向止挡，由传统悬浮架的迫导向方式转为主动导向方式，当悬浮架的横移量达到主动导向电磁铁的额定工作间隙或悬浮电磁铁横向止挡限值时，主动导向电磁铁与横向止挡发挥作用，保证悬浮架具有良好的曲线通过性能，新型悬浮架悬浮力和导向力的传递路径如图 1 所示。



(a) 悬浮力的传递路径　　(b) 导向力的传递路径

图 1　新型悬浮架悬浮力和导向力的传递路径

Fig. 1　Transmission path of levitation force and guiding force of new levitation bogie

磁浮车辆通过空簧滑台总成与悬浮架实现连接，4 个悬浮框上布置的不同曲线半径的移动滑台也为磁浮车辆顺利通过曲线提供了一定的保障。图 2 为新型悬浮架的整体结构示意图。

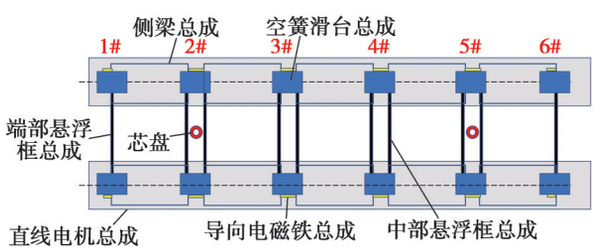


图 2　悬浮架整体结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of overall structure of the levitation bogie

2　轨道梁方案

轨道梁作为磁浮车辆承载和运行的轨道，为磁浮车辆提供悬浮支撑和安全保障，其几何形状和内力变化将直接影响到磁浮车辆的安全性和舒适性。本文以 25 m 高架简支梁为研究对象，其结构组成包括磁浮基本轨道梁、轨排和支撑结构。基本轨道梁采用混凝土材质，尺寸选择满足车辆限界的要求，在保证垂向、横向刚度的同时，采用箱型梁降低建造成本；轨排结构包括“F”型导轨、钢轨枕以及其连接紧固件等，其中“F”型导轨由“F”型钢轨和铝感应板组成，与车载电磁铁形成环形闭合回路，产生的电磁力为磁浮车辆提供悬浮导向作用。承轨台作为支撑结构承接轨排和扣件，并传递轨道梁之间的垂向作用力。图 3 为所采用中低速磁浮轨道梁方案的示意图。

将轨道梁三维模型导入 ANSYS 软件中建立轨道梁的有限元模型，“F”型导轨、承轨台和混凝土箱梁均采用实体单元 Solid 185 模拟，钢轨枕采用壳单元 Shell 63 模拟，轨枕与承轨台的连接扣件、轨缝连接件采用弹簧单元 Combin 14 模拟，保留结构的主要几何轮廓，并使得网格与几何轮廓基本保持一致，平滑过渡，同时对结构进行材料属性的定义和加载设置，完成对轨道梁结构的柔性化处理，并分析轨道梁自振特性，得到轨道梁前 7 阶模态及其振型频率，结果如表 1 所示。

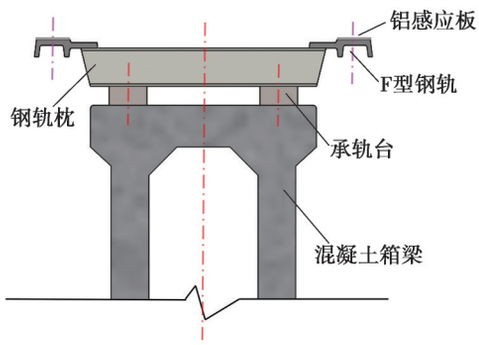


图 3　中低速磁浮轨道梁示意图

Fig. 3　Schematic diagram of medium-low speed maglev guideway

表 1　轨道梁振型频率

Table 1　Vibration frequency of guideway　　Hz

振型	频率	振型	频率
一阶横向弯曲	6.77	一阶扭转	29.18
一阶垂向弯曲	7.26	三阶横向弯曲	37.81
二阶横向弯曲	19.30	三阶垂向弯曲	43.37
二阶垂向弯曲	19.70		

3　车轨耦合动力学模型

3.1　建模

利用多体动力学软件 Simpack，通过调用部件几何外形，定义各部件之间的铰接关系和相对位置关系、质量、惯量等参数，完成结构的连接与装配，从而实现中低速磁浮车辆多刚体动力学模型建模。轨道系统使用三维绘图软件进行模型的构建，并输入到有限元软件 ANSYS 中进行网格的划分、材料的定义、柔性化处理，使得轨道系统以柔性子系统的形式导入到动力学仿真软件中，与列车多刚体系统组建成完整的“车辆–柔性轨道梁”耦合动力学模型，模型如图 4 所示，新型悬浮架磁浮车辆动力学模型主要参数见表 2。在多体动力学软件中打开控制软件的协同仿真接口，实现机械系统与控制器的信号交换。

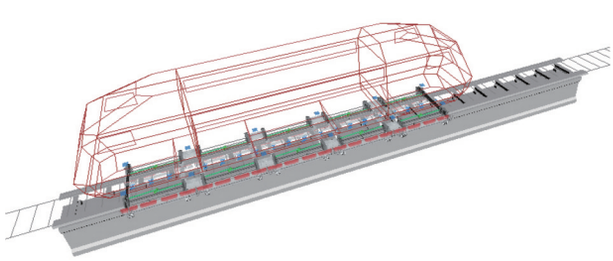


图 4　车轨耦合动力学模型

Fig. 4　Dynamic model for vehicle-guideway coupling

表2　磁浮车辆动力学模型参数

Table 2　Dynamics model parameters of maglev vehicle

参数名称	参数值
车体质量/t	23.2
车体长度/m	15.6
端部悬浮框质量/kg	120
中部悬浮框质量/kg	300
空气弹簧横向刚度/(kN·m^{-1})	150
空气弹簧横向阻尼/(N·s·m^{-1})	1 000
空气弹簧垂向刚度/(kN·m^{-1})	120
空气弹簧垂向阻尼/(N·s·m^{-1})	1 000
轨距/mm	1 860

3.2　轨道不平顺

描述轨道不平顺通常采取功率谱的形式，分析功率谱即可得出不同频率的不平顺波对轨道不平顺的影响，利用三角级数和傅里叶逆变换还可进行轨道不平顺的时域转换。中国铁道科学院在对美国、德国轮轨铁路轨道功率谱进行研究后，通过拟合方法得到不同系数的统一功率谱表达式[17]，具体为

$$S(f)=\frac{A\left(f^2+Bf+C\right)}{f^4+Df^3+Ef^2+Ff+G} \tag{1}$$

式中：$S(f)$为轨道不平顺功率谱；f为空间频率；A, B, C, D, E, F, G为谱特征参数。

本文采用的轨道不平顺功率谱是根据2010年唐山1.5 km中低速磁浮试验线轨道不平顺测试数据而得，结合最小二乘法，通过功率谱分析拟合出式(1)中的各个参数，经时域转换得到中低速磁浮轨道不平顺结果，具有可靠性和真实性，其中横向轨道不平顺的波动范围为−2.20~2.31 mm，垂向轨道不平顺的波动范围为−4.42 ~ 4.73 mm，如图5所示。

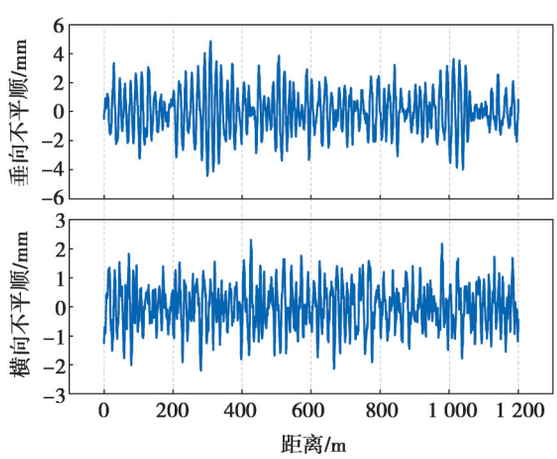


图5　轨道不平顺功率谱

Fig. 5　Guideway irregularity power spectrum

4　动力学响应

4.1　桥梁动力学响应

图6为桥梁跨中动力学响应的数值仿真图。由图6可知，桥梁跨中横向位移和垂向位移随速度增大无明显的变化，桥梁跨中横向位移的变化范围为0.069~0.280 mm，桥梁跨中垂向位移变化范围为3.80~3.90 mm，全速度域的桥梁挠跨比不超过L/10000；除100 km/h速度点外，桥梁跨中横向加速度和垂向加速度随速度增大基本呈现上升的趋势，即随着速度的增大，桥梁跨中加速度响应越剧烈，桥梁跨中横向加速度的变化范围为0.11~0.35 m/s^2，桥梁跨中垂向加速度的变化范围为0.31~1.93 m/s^2，桥梁跨中垂向加速度和横向加速度的最大值均出现在100 km/h速度下。

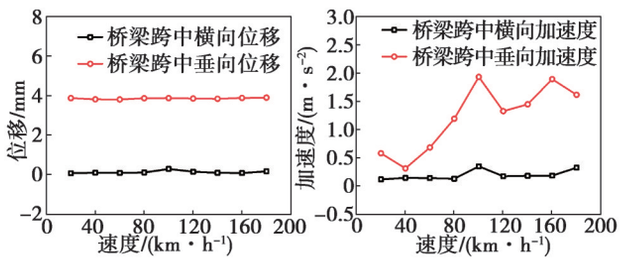


图6　桥梁跨中动力学响应

Fig. 6　Dynamic response of bridge midspan

桥梁跨中横向加速度和垂向加速度在速度为100 km/h时出现突变最大值。这主要是因为当速度达到突变点100 km/h时，桥梁横向振动主频为6.7 Hz，与轨道梁一阶横弯特征频率接近，“车辆−轨道梁”之间发生了横向共振；同时，桥梁垂向振动主频为48.6 Hz，与轨道梁三阶垂弯特征频率接近，“车辆−轨道梁”之间发生垂向共振。车轨耦合共振同时发生在横向和垂向2个方向，使得突变点处的动力学响应急剧增大，出现响应突变。通过车辆或轨道梁的参数优化，使得突变点消失是抑制车轨耦合振动最直接的证明。图7为速度100 km/h时轨道梁的功率谱密度变化曲线图。

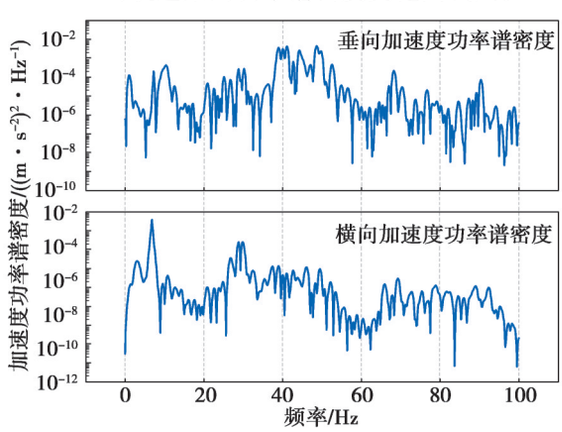


图7　100 km/h轨道梁功率谱密度

Fig. 7　Power spectrum density of guideway at 100 km/h

4.2　悬浮模块动力学响应

悬浮模块动态响应分别选取第1位悬浮框、第2位悬浮框和第3位悬浮框左侧1号电磁铁中心位置作为测点，记作L_{11}、L_{21}、L_{31}。图8为前悬浮模块动态响应仿真图。由图8可知，前悬浮模块的横向位移和垂向位移

随速度增大基本呈现先增后减再增的趋势，前悬浮模块横向位移的最大值为 12.38 mm，前悬浮模块垂向位移的最大值为 1.63 mm，前悬浮模块垂向位移和横向位移的最大值均出现在 120 km/h 速度下；前悬浮模块的横向加速度和垂向加速度随速度增大基本呈现上升的趋势，即随着速度的增大，前悬浮模块的加速度响应越剧烈，前悬浮模块横向加速度的变化范围为 0.25~16.60 m/s^2，前悬浮模块垂向加速度的变化范围为 2.02~31.93 m/s^2，前悬浮模块垂向加速度和横向加速度的最大值均出现在 180 km/h 速度下。

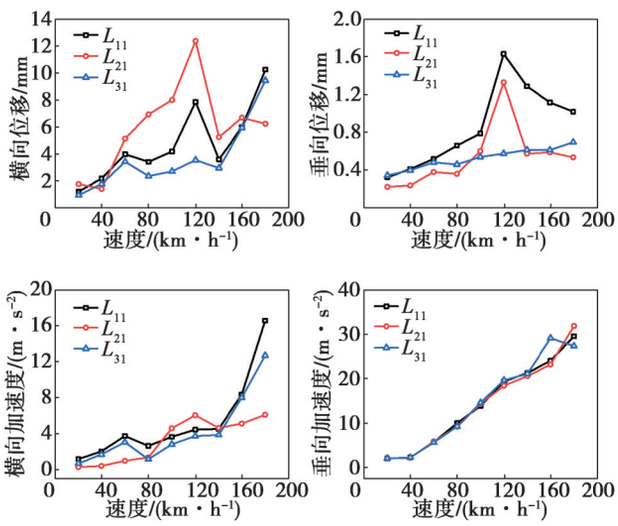
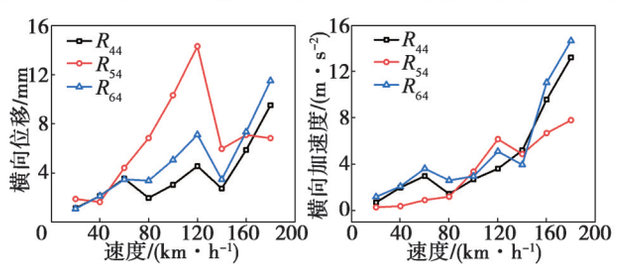


图 8　前悬浮模块动力学响应

Fig. 8　Dynamic response of front levitation module

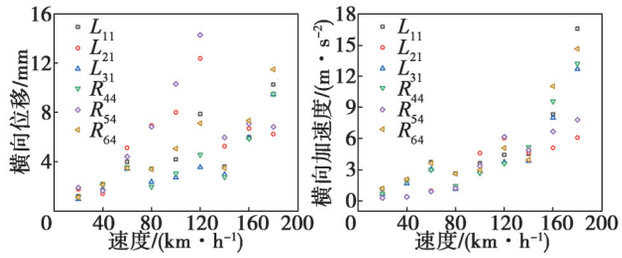
大量的仿真结果表明，速度对于悬浮架端部的动力学响应往往要大于中部，即对第 1 位悬浮模块动态响应的影响大于第 2 位悬浮模块。但对于本文研究的新型悬浮架而言，在速度为 80~140 km/h 时却出现了第 2 位悬浮模块横向动力学响应比第 1 位悬浮模块强烈的情况。为防止仿真计算结果的偶然性，更换悬浮模块动态响应测点为第 4 位悬浮框、第 5 位悬浮框和第 6 位悬浮框右侧 4 号电磁铁中心位置，记作 R_{44}、R_{54}、R_{64}。重新计算速度对悬浮模块的横向动力学响应，图 9 为后悬浮模块动态响应仿真图。由图 9 可知，改变悬浮模块动态响应测点后，在速度 80~140 km/h 内仍出现第 5 位悬浮模块的动力学响应明显大于第 6 位悬浮模块的情况，即中部动力学响应大于端部的情况，这也证明了上述动力学响应结果的正确性。图 10 为前悬浮模块和后悬浮模块横向动力学响应对比。



(a) 横向位移　　(b) 横向加速度

图 9　后悬浮模块横向动力学响应

Fig. 9　Lateral dynamic response of rear levitation module



(a) 横向位移　　(b) 横向加速度

图 10　前后悬浮模块横向动力学响应对比

Fig. 10　Comparation of lateral dynamic response of front and rear leviation modules

悬浮模块在速度 120 km/h 时出现了横向动力学响应突变的情况，这主要是因为当速度达到突变点 120 km/h 时，桥梁横向振动主频为 6.75 Hz，与轨道梁一阶横弯特征频率接近，“车辆–轨道梁”之间发生横向共振。图 11 为速度 120 km/h 时轨道梁的功率谱密度变化曲线图。关于悬浮模块出现了中部动力学响应比端部剧烈的情况，主要是因为当车辆以不同速度通过等跨轨道梁时，悬浮架的长度、悬浮线圈长度等特征参数均会对轨道梁形成固定频率的激扰。与传统悬浮架不同，新型悬浮架并不是由相同的悬浮模块组成的，端部悬浮模块结构与中部悬浮模块结构差异较大，端部悬浮模块结构简单、质量小，而中部悬浮模块结构复杂、质量大，两者在刚度、阻尼方面也存在一定的差异，结构的差异导致对端部悬浮模块与中部悬浮模块的固定频率激扰不同，当中部悬浮模块振动主频与轨道梁自振频率率先接近时，便出现中部悬浮模块响应比端部悬浮模块响应剧烈的情况。

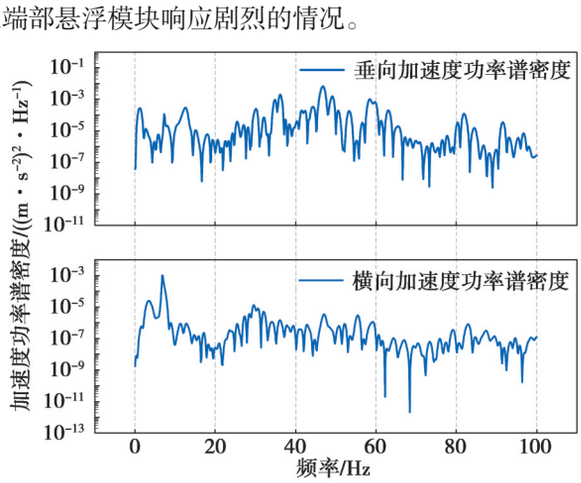


图 11　120 km/h 轨道梁功率谱密度

Fig. 11　Power spectrum density of guideway at 120 km/h

4.3　车体动力学响应

车体动力学响应以车体端部动力学响应作为参考，分别选取车体前端与后端 2 个测点，2 个测点的动力学响应如图 12 所示。由图 12 可知，车体端部横向位移和垂向位移随速度增大基本呈现先增后减的趋势，车体端部横向位移的最大值为 21.55 mm，车体端部垂向位

移的最大值为25.69 mm，车体端部横向位移和垂向位移的最大值均出现在120 km/h速度下；车体端部横向加速度和垂向加速度随速度增加基本呈现先增后减的趋势，车体端部横向加速度的变化范围为0.29~3.39 m/s^2，车体端部垂向加速度的变化范围为0.12~3.69 m/s^2，车体端部横向加速度和垂向加速度的最大值均出现在120 km/h速度下。

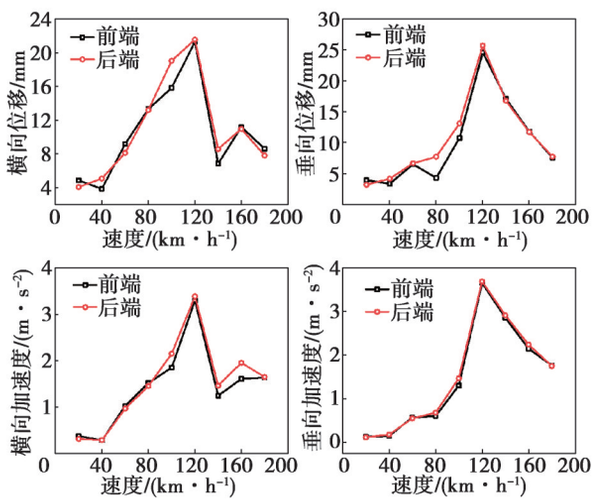


图12　车体动力学响应

Fig. 12　Dynamic response of carbody

当车体速度不超过120 km/h时，车体除了横向动力学响应发生突变外，垂向动力学响应也发生了突变，这主要是因为当速度达到突变点120 km/h时，桥梁垂向振动主频为46.75 Hz，与轨道梁三阶垂弯特征频率接近，“车辆–轨道梁”之间亦存在垂向共振。

5　结语

本文以新型中低速悬浮架为研究对象，建立“车辆–控制–轨道梁”耦合动力学模型，对不同速度下产生的动力学响应进行分析，得出以下结论：

①桥梁跨中横向位移和垂向位移随速度增大无明显变化规律，满足横向位移指标不大于L/2000，垂向位移指标不大于L/3800的要求；桥梁跨中横向加速度和垂向加速度随速度的增大基本呈现上升趋势，桥梁跨中横向加速度的最大值为0.35 m/s^2，满足小于1.4 m/s^{2}的技术指标要求；桥梁跨中垂向加速度的最大值为1.93 m/s^2，满足小于5 m/s^{2}的技术指标要求。

②悬浮模块的横向位移和垂向位移随速度增大基本呈现先增后减再增的趋势，悬浮模块横向位移最大值为12.38 mm，悬浮模块垂向位移的最大值为1.63 mm，最大值在速度为120 km/h时取得；悬浮模块横向加速度和垂向加速度随速度增大基本呈现上升趋势，悬浮模块横向加速度的最大值为16.6 m/s^2，悬浮模块垂向加速度的最大值为31.93 m/s^2，最大值在速度为180 km/h时取得。

③车体端部垂向/横向位移和垂向/横向加速度随速度的增大呈现先增后减的趋势，车体端部横向位移的最大值为21.55 mm，车体端部垂向位移的最大值为25.69 mm，车体端部横向加速度的最大值为3.39 m/s^2，车体端部垂向加速度的最大值为3.69 m/s^2，最大值在速度为120 km/h时取得。

④若车体动态响应结果中出现突变响应，说明在该突变点“车辆–轨道梁”之间存在共振，该现象可同时存在于横向和垂向。新型磁浮车辆出现中部悬浮模块比端部响应更剧烈的情况，是由于新型悬浮架结构的特殊性，导致中部悬浮模块比端部悬浮模块的频率更接近轨道梁的频率，从而发生更明显的共振。总体而言，新型悬浮架车轨耦合振动响应均在标准范围内，符合设计要求，但考虑悬浮模块的振动响应，悬浮架结构与悬挂参数还可进一步优化。

参考文献：

[1] 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.

[2] 邹振民. 新世纪城市理想的交通工具——介绍日本HSST磁悬浮列车系统[J]. 铁道通信信号, 2001, 37(11): 37-39.
ZOU Zhenmin. Means of city transportation in new century: introducing the HSST maglev train system in Japan[J]. Railway Signalling & Communication, 2001, 37(11): 37-39.

[3] 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.

[4] 李莉, 孟光. 磁浮车不能稳定悬停在钢轨道框架上的原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(5): 40-42.
LI Li, MENG Guang. Maglev train's unsteady hovering on steel guideway frame[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(5): 40-42.

[5] 殷月俊, 罗汉中, 黄醒春. 高速磁浮道岔振动响应的原位实测[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(4): 658-663.
YIN Yuejun, LUO Hanzhong, HUANG Xingchun. In situ research of dynamic response of maglev turnout[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(4): 658-663.

[6] 吴祥明, 常文森, 刘万明. 上海高速磁浮列车及磁浮技术发展刍议[J]. 综合运输, 2005(1): 28-31.
WU Xiangming, CHANG Wensen, LIU Wanming. Discussion on the high-speed magnetic suspension train and magnetic suspension technology development of Shanghai[J]. Comprehensive Transportation, 2005(1): 28-31.

[7] SIMITH C C, WORMLEY D N. Response of continuous periodically supported guideway beams to traveling vehicle loads[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1975, 97(1): 21-29.

[8] 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.

[9] MIN D J, JUNG M R, KIM M Y, et al. Dynamic interaction analysis of maglev-guideway system based on a 3D full vehicle model[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017, 17(1): 1750006.

[10] 赵春发, 翟婉明, 蔡成标. 磁浮车辆/高架桥垂向耦合动力学研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 27-33.
ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao. Maglev vehicle/elevated-beam guideway vertical coupling dynamics [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5): 27-33.

[11] 李小珍, 王党雄, 耿杰, 等. F轨对中低速磁浮列车–桥梁系统竖向耦合振动的影响研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 97-106.
LI Xiaozhen, WANG Dangxiong, GENG Jie, et al. Study on the influence of F-rail in vertical coupling vibration of low-medium speed maglev train-bridge system[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 97-106.

[12] 姜卫利, 高芒芒. 轨道梁参数对磁浮车–高架桥垂向耦合动力响应的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 71-75.
JIANG Weili, GAO Mangmang. Study of the effect of track beam parameters on vertical coupled dynamic response of maglev vehicle-viaduct[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 71-75.

[13] 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.

[14] 梁鑫. 磁浮列车车轨耦合振动分析及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIANG Xin. Study on maglev vehicle/guideway coupled vibration and experiment on test rig for a levitation stock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[15] 汪科任, 罗世辉, 马卫华, 等. 磁浮列车静悬浮车轨耦合振动对比分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 282-289.
WANG Keren, LUO Shihui, MA Weihua, et al. Vehicle-guideway coupling vibration comparative analysis for maglev vehicles while standing still[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 282-289.

[16] 何绍友. 基于轨道梁截面尺寸优化的高速磁浮车轨耦合振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
HE Shaoyou. Research on the coupled vibration of high-speed maglev vehicle and guideway based on optimization of track beam section size[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[17] 张耿, 李杰, 杨子敬. 低速磁浮轨道不平顺功率谱研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 73-78.
ZHANG Geng, LI Jie, YANG Zijing. Estimation of power spectrum density track irregularities of low-speed maglev railway lines[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 73-78.