文章编号:1674-2974(2024)05-0154-14 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024057

中低速磁浮诱发交通枢纽换乘中心振动响应研究

王力东[1,2,3†],孙天洋[1],卜秀孟[1],韩艳[1,2],李凯[3]
[1. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;
2. 桥梁工程安全控制教育部重点实验室(长沙理工大学),湖南 长沙 410114;
3. 中国建筑第五工程局有限公司,湖南 长沙 410004]

摘 要:针对中低速磁浮诱发机场综合交通枢纽换乘中心(GTC)振动问题,建立磁浮列车-轨道梁耦合振动模型和轨道梁-GTC-土体有限元模型,采用两步法对车致GTC振动响应特征、传播规律和振级进行分析.磁浮列车采用多体动力学建模,轨道梁采用有限元法建模,两者之间通过线性化磁轨关系形成耦合振动模型,并通过与现场实测结果对比验证了模型的正确性.基于所建立的耦合振动模型,获取H型钢轨枕与承轨台之间的扣件力时程并将其施加在轨道梁-GTC-土体模型上,通过瞬态分析得到了GTC典型观测点的动力响应.结果表明:磁浮列车诱发振动沿高度方向传播时,结构柱和楼板的振动响应均随高度的增加先减小后增大,沿水平方向传播时,振动响应随距离的增大而快速衰减;GTC振动响应存在明显的倍频现象,即扣件力主频倍频处振动响应的功率谱密度曲线存在明显峰值;当车速为60 km/h时,车辆激励主频与轨道梁一阶竖向自振频率接近,此时观测点的1/3倍频程最大振级大于其他车速;当磁浮列车以60~120 km/h车速通过GTC时,各楼层最大Z振级均未超过规范限值,表明该机场GTC具有良好的整体刚度.

关键词:中低速磁浮;机场;换乘中心;传播规律;振级评估;两步法
中图分类号:U211 **文献标志码**:A

Study on Vibration Response of Transfer Center of Transportation Hub Induced by Low-to-medium Speed Maglev Trains

WANG Lidong[1,2,3†],SUN Tianyang[1],BU Xiumeng[1],HAN Yan[1,2],LI Kai[3]
[1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Ministry of Education (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China;
3. China Construction Fifth Engineering Division Co. Ltd., Changsha 410004, China]

Abstract: To address the vibration problem of the airport ground transportation center (GTC) induced by low-

* **收稿日期**:2023-06-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208459, 52178452),National Natural Science Foundation of China(52208459, 52178452);中国博士后科学基金资助项目(2022M723004),China Postdoctoral Science Foundation(2022M723004);湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40496),Natural Science Foundation of Hunan Province(2022JJ40496);湖南省研究生科研创新项目(CX20220895),Hunan Graduate Research and Innovation Funding Project(CX20220895)
作者简介:王力东(1990—),男,湖南郴州人,长沙理工大学副教授,工学博士
† 通信联系人,E-mail: wangld@csust.edu.cn

to-medium speed maglev train, a coupled vibration model of maglev train-guideway girder and a finite element model of guideway girder-GTC-soil are established, and then the two-step method is used to analyze the response characteristics, propagation laws, and vibration levels of the vibration problem. The maglev train is modeled using multi-body dynamics, and the guideway girder is modeled using finite element method. The coupled vibration model is formed by linear magnet-rail relationship between the two components, and the correctness of the model is verified by field measurement results. Based on the established coupled vibration model, the time history curves of the fastener force between the H-shaped rail sleeper and the rail support platform are obtained. The fastener force is applied to the guideway girder-GTC-soil model, and the dynamic response of typical observation points of GTC is obtained by transient analysis. The results show that when the vibration induced by maglev train propagates along the height direction, the vibration responses of structural columns and floors decrease first and then increase with the increase of height. When the vibration propagates along the horizontal direction, the vibration response decreases rapidly with the increase of distance. There is an obvious frequency doubling phenomenon in the vibration response of GTC, that is, there is an obvious peak value in the power spectral density curve of the vibration response at the frequency doubling of the main frequency of the fastener force. When the vehicle speed is 60 km/h, the main frequency of the vehicle excitation is close to the first-order vertical natural frequency of the guideway girder. At this time, the maximum vibration level of the 1/3 octave of the observation point is greater than other vehicle speeds. When the maglev train passes through the GTC at 60~120 km/h, the maximum Z vibration level of each floor does not exceed the standard limit, indicating that the airport GTC has good overall stiffness.

Key words: low-to-medium speed maglev train; airport; ground transportation center (GTC); propagation law; vibration level assessment; two-step method

机场综合交通枢纽换乘中心(GTC)是机场内外衔接系统的重要组成部分,是乘客在机场陆侧区域进行各种交通方式之间转换以及各种活动的重要场所.GTC通常包含地上与地下结构部分,上行公路交通,下行轨道交通,具有空间效果显著与结构体系复杂等特征.轨道交通由于轴重大、速度快,诱发的轨道振动显著,并可通过附近梁、柱、墙等结构传至站台及候车层.频繁且长期的振动不仅会影响结构的正常使用,而且还会影响旅客及区域内工作人员的身心健康[1].

针对轨道交通诱发交通枢纽结构振动问题,主要通过现场实测与数值模拟的方法进行研究.现场实测方面,Yang等[2]以天津西站为研究对象,对高速列车通过站房时的振动响应特性和传播规律进行了研究.张凌等[3]基于地铁和高铁列车进出南昌西站的振动实测数据,对站房的局部振动规律及频谱响应规律进行了分析.巴振宁等[4]重点研究了高铁客站站台层的振动响应.冯青松等[5]测量了地铁列车进、出站时换乘站楼板及办公区休息室的振动响应,并对振动特性及其在不同楼层的传播规律进行了分析.数值模拟方面,张楠等[6]建立了车辆-车站结构耦合振动分析模型,对地铁制动力作用下深圳北站关键部位的振动状态进行了评估.朱志辉等[7]建立了列车-"站桥合一"客站整体动力学分析模型,研究了多种行车工况下列车通过客站时结构的振动响应及行车安全性.颜锋等[8]建立了北京大兴国际机场候机楼中心区有限元模型,探讨了轮轨激励和列车风对结构振动的影响.Zhang等[9]通过将车辆-轨道-土体-站房系统分解为多个子系统,提出了高铁站房结构车致振动的频域分析方法.为准确预测地铁诱发机场旅客过夜房振动量级,Yang等[10]提出了两步分析方法,即车-轨耦合振动计算获得扣件力,再将扣件力施加在轨道-土体-建筑有限元模型上.谢伟平等[11]通过建立列车-高架车站耦合振动模型,研究了多组列车过站工况下高架车站的车致振动响应规律,并进行了舒适度评价.郭向荣等[12]建立了列车-轨道-车站系统空间耦合振动仿真分析模型,分析了列车通过引起的车站站台层与站厅层的动力响应.除此

之外,亦有部分学者针对地铁上盖建筑振动问题进行了研究[13].然而,值得说明的是,上述研究主要考虑高铁或地铁列车通过引起的振动.目前,针对中低速磁浮列车诱发交通枢纽结构振动的研究较少.

中低速磁浮列车依靠电磁吸力使车辆稳定悬浮,并通过直线电机推动列车"抱轨"运行,在荷载作用方式、轨道形式、车辆参数等方面与轮轨列车存在较大差别[14].目前,针对中低速磁浮列车诱发下部结构振动研究,主要集中在桥梁结构,对站房结构研究较少.吴奎[15]建立了磁浮列车-轨道梁耦合振动模型以及站房结构动力分析模型,对长沙中低速磁浮榔梨站的结构振动舒适性及结构安全性进行了初步探讨.考虑到现阶段国内中低速磁浮线路建设不断增加,因此探索磁浮列车诱发大型交通枢纽结构振动响应特性及传播规律,可为磁浮线路站房和GTC建设提供重要指导意义.

本文以长沙黄花国际机场改扩建工程GTC为研究对象,通过建立中低速磁浮-轨道梁-CTC耦合振动分析模型,采用两步法对下穿中低速磁浮列车诱发结构振动开展研究.基于数值计算结果,研究GTC内部不同观测点的振动响应特性,分析振动沿高度与水平方向的传播规律,并探讨磁浮运行车速对结构振动响应的影响.

1 磁浮列车-轨道梁-GTC-土体耦合振动模型

1.1 轨道梁-GTC-土体耦合振动模型

长沙黄花国际机场改扩建工程GTC建筑面积4.30万m^2,由地上四层、地下三层组成,如图1所示.地下部分总高23.55 m,从地下一层至地下三层,层高分别为5.7、8.405、9.445 m;地上部分总高30.645 m,从地上一层至地上四层,层高分别为10.245、8.4、7.2、4.8 m.地下部分属于混凝土箱式框架结构,承担地下轨道交通地铁与磁悬浮的无缝换乘功能;地上部分属于混凝土板柱结构,承担进离港客流通行、公路交通分流以及商业服务功能.沿磁浮线路方向柱间距约9 m,垂直磁浮线路方向柱间距约6.8 m,与土体接触的混凝土底板和剪力墙厚度分别为1.2和0.8 m,其余楼板厚度约0.4 m.

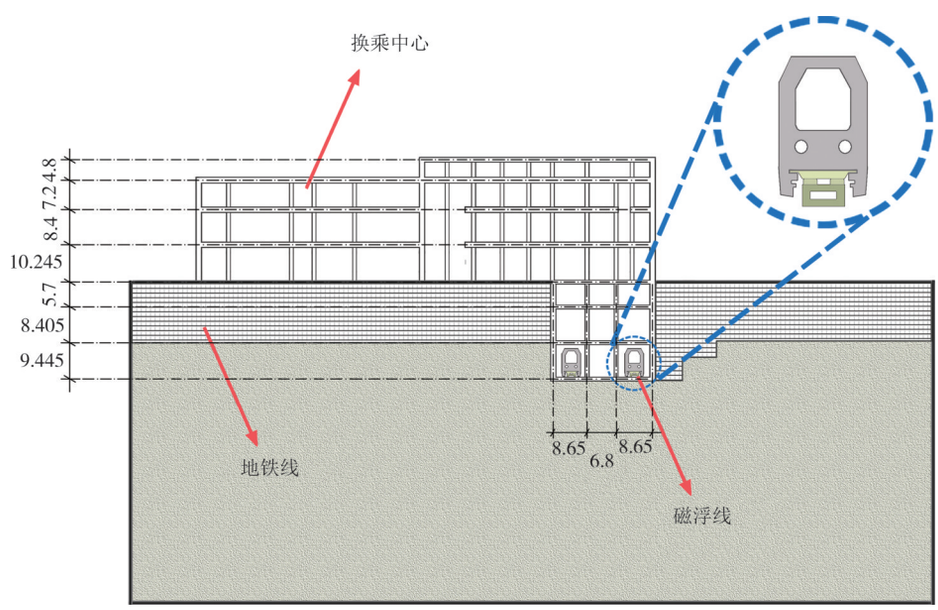


图1 GTC结构示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of GTC structure (unit: m)

采用有限元方法建立轨道梁-GTC-土体耦合振动模型,如图2所示.该模型长、宽、高分别为240.5、191.1和106.195 m.其中,梁、柱、桩体采用梁单元模拟,剪力墙与楼板采用壳单元模拟,土体采用实体单元模拟,不同模拟对象的单元材料参数如表1所示.针对GTC换乘中心部分地上结构柱与地下结构柱不在同一轴线上的情况,采用局部刚性域方法将地上结构柱端节点与柱端附近楼板单元节点进行刚性连接,实现上、下两部分结构的变形协调.在动力有限元分析中,模型单元尺寸对计算效率与精度影响较大[16].为避免弹性波传播过程中的"低通效应"与"频散效应",本文将模型单元尺寸控制如下:GTC结构

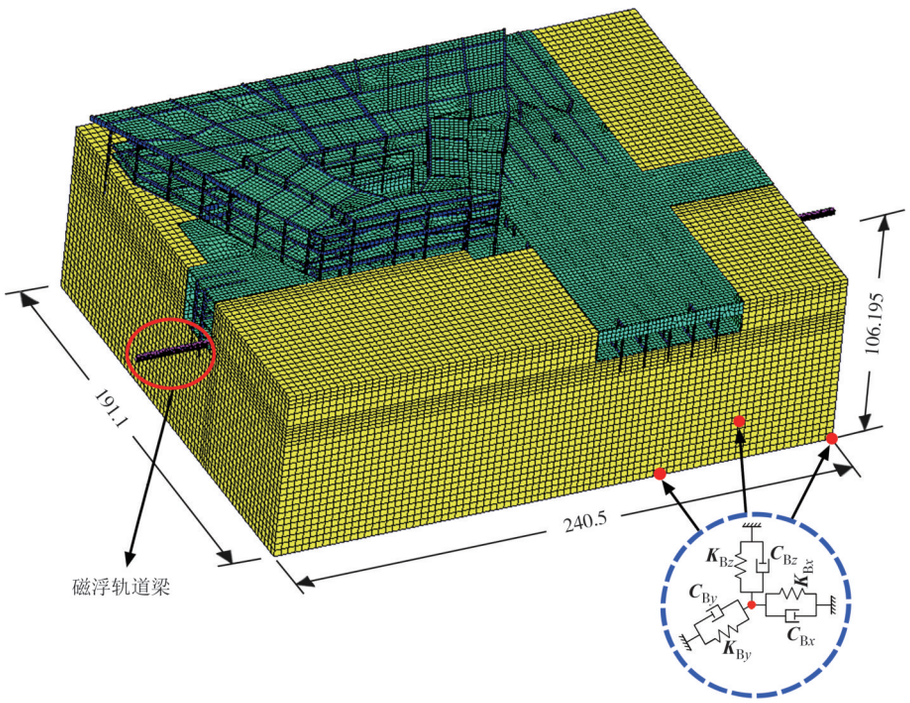


图 2　轨道梁-GTC-土体有限元模型(单位:m)

Fig.2　Guideway girder-GTC-soil FE model(unit:m)

中梁、板单元最大尺寸不超过 2 m,邻近 GTC 结构的土体实体单元尺寸不超过 2.5 m,剩余部分实体单元尺寸控制在 3 m 左右.土体与结构接触面采用绑定约束的接触面设置,保证网格划分不均匀时结构部件之间的荷载传递与变形协调.在所截取的土体计算域表面节点上采用三维黏弹性人工边界模拟半无限域,以满足振动波在计算域边界不发生能量折射的要求.其中,黏弹性人工边界物理元件参数取值参考文献[17].

表 1　轨道梁-GTC-土体模型材料参数

Tab. 1　Material parameters of guideway girder-GTC-soil model

对象		密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
轨道梁	F 轨	7 840	206	0.3
	承轨台	2 500	34.5	0.2
	承轨梁	2 500	34.5	0.2
GTC	梁	2 440	31.5	0.2
	板	2 440	31.5	0.2
	柱	2 440	32.5	0.2
	桩	2 440	32.5	0.2
土体	泥质砂岩	2 240	5	0.26

本文采用瑞利阻尼考虑振动波在弹性介质中的衰减.计算时,瑞利阻尼系数取 0.02,瑞利阻尼常数 α 和 β 分别取 0.188 2 和 0.004 7.

1.2　磁浮列车-轨道梁耦合振动模型

1.2.1　磁浮列车子系统模型

磁浮列车由 3 节车辆组成,每节车辆包含 1 个车体、5 对悬浮架,每个悬浮架包含 4 对悬浮电磁铁和 2 对悬挂系统[18].实际上,每个电磁铁产生的悬浮力是一个短距离的连续荷载,考虑到相邻电磁铁之间的距离较大(0.7 m),每个悬浮力的作用面积足够小,因此将每个悬浮力简化为集中荷载.图 3 为采用多体动力学方法建立的车辆计算模型,其中车体和悬浮架为刚体,悬挂系统为线性弹簧-阻尼器元件.假设车辆在垂向平面内运动,车体和每个悬浮架包含沉浮和点头运动,故每节车辆有 12 个自由度.表 2 给出了后续分析中使用的车辆模型参数.

1.2.2　轨道梁子系统模型

如图 4 所示,中低速磁浮轨道梁由 F 轨、H 型钢

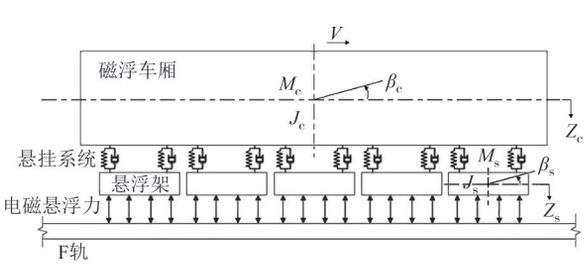


图 3　中低速磁浮列车垂向振动模型

Fig. 3　Vertical vibration model of low-to-medium speed maglev train

表2 磁浮车辆模型计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of maglev train model

符号	参数	数值
M_c	车体质量	2×10^4 kg
M_s	悬浮架质量	2×10^3 kg
K_z	二系悬挂刚度	1.6×10^5 N/m
C_z	二系悬挂阻尼	1×10^4 N·s/m
J_c	车体点头转动惯量	6.25×10^5 kg·m^2
J_s	悬浮架点头转动惯量	3.6×10^3 kg·m^2

轨枕、弹簧扣件、承轨台与简支承轨梁组成.其中,简支承轨梁宽为1.5 m,高为1.55 m,计算跨度为24.97 m.梁体和承轨台现浇于一起,均采用C50混凝土.F轨与钢轨枕固结,通过弹簧扣件与承轨台连接.F轨纵向支撑间距为1.2 m,在承轨梁梁缝处断开.采用有限元方法建立轨道梁子系统模型.其中,F轨、H型轨枕、承轨台与承轨梁均采用梁单元模拟,相邻F轨之间设置弹簧单元模拟伸缩接头.扣件采用弹簧单元模拟,其刚度系数为1.2 × 10^8 N/m.

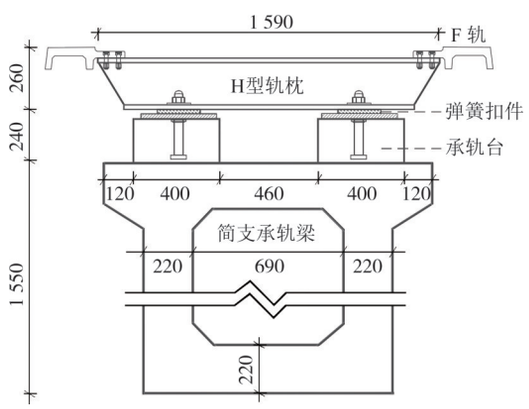


图4 轨道梁结构端视图(单位:mm)

Fig. 4 End view of track beam structure (unit: mm)

1.2.3 悬浮控制子系统模型

磁浮车辆通过一系列分散独立的电磁铁作为悬浮控制点实现悬浮.当磁浮车辆位于静悬浮位置时,电磁铁对磁浮车辆在垂直方向上的电磁悬浮力合力恰好能克服列车本身的自重,静悬浮状态下的额定电流和静悬浮间隙分别记为I_0与c_0.磁浮车辆运动时受到轨道梁弹性变形与线路不平顺激扰的影响,悬浮间隙在静悬浮间隙c_0附近波动.为保持磁浮车辆的悬浮稳定性,通过电流控制律主动控制电磁悬浮力的大小,瞬时电磁力表示为:

$$F(t)=\frac{\mu_0 N^2 A}{4}\left[\frac{I(t)}{c(x)}\right]^2 \tag{1}$$

式中:$F(t)$为电磁铁瞬时电磁力,N;μ_0为空气磁导率,N/A^2;N为电磁铁线圈匝数;A为电磁铁有效磁极面积,m^2;$I(t)$为电磁线圈的控制电流,A;$c(x)$为车轨悬浮间隙,m.

瞬时电磁力公式是关于电流和悬浮间隙的非线性函数,对静悬浮状态下的电流I_0和悬浮间隙c_0进行一阶泰勒展开,得到与电流变化量及悬浮间隙变化量满足线性关系的瞬时电磁力公式[19]:

$$F(t)=F_0+k_1\Delta I(t)-k_c\Delta c(x) \tag{2}$$

$$F_0=G=\frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{4c_0^2} \tag{3}$$

$$k_1=\frac{\mu_0 N^2 A I_0}{4c_0^2} \tag{4}$$

$$k_c=\frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{2c_0^3} \tag{5}$$

式中:$\Delta I(t)$与$\Delta c(x)$分别为迭代过程中电磁线圈电流与车轨悬浮间隙的变化量;k_1与k_c分别为$\Delta I(t)$与$\Delta c(x)$的比例系数;G为磁浮车辆的重力,N.

悬浮控制系统本质上是电流控制律.选择上一时间步结束时磁浮车辆的状态响应参数与车轨悬浮间隙作为当前时间步电流控制律的参数,实现车轨悬浮间隙在静悬浮间隙附近波动的修正过程[20],此时电流控制律表示为:

$$\Delta I(t)=G_1\Delta c(x)+G_2\dot{y}_v(t)+G_3\ddot{y}_v(t) \tag{6}$$

式中:$\dot{y}_v(t)$为电磁铁垂向速度,m/s;$\ddot{y}_v(t)$为电磁铁垂向加速度,m/s^2;G_1、G_2和G_3分别为$\Delta c(x)$、$\dot{y}_v(t)$和$\ddot{y}_v(t)$的响应系数,它们的取值见表3.

表3 悬浮控制系统模型计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of suspension control system

符号	含义	数值
G_1	主动悬浮控制系统的位移系数	5 000
G_2	主动悬浮控制系统的速度系数	10
G_3	主动悬浮控制系统的加速度系数	0.07
c_0	额定悬浮间隙	8 mm
I_0	额定工作电流	21 A

根据磁浮与轨道梁的几何相容条件,悬浮间隙变化量$\Delta c(x)$的表达式为:

$$\Delta c(x)=y_v(t)-y_b(x,t)-w(x) \tag{7}$$

式中:$y_v(t)$为电磁铁垂向位移,m;$y_b(x,t)$为轨道梁垂向位移,m;$w(x)$为轨道不平顺值,m.

将式(7)代入式(2),得:

$$F(t)=G+\left(k_1G_1-k_c\right)\left[y_v(t)-y_b(x,t)-w(x)\right]+k_1G_2\dot{y}_v(t)+k_1G_3\ddot{y}_v(t) \tag{8}$$

由式(7)(8)可知,电磁悬浮力与轨道不平顺激扰线性相关,影响车体在沉浮自由度方向的运动幅度,影响磁浮运行时的车体稳定性.

1.2.4　*磁浮列车-轨道梁耦合振动方程及程序验证*

当磁浮列车在轨道梁上运行时,列车子系统和桥梁之间会发生动力相互作用,因此可建立磁浮列车-轨道梁耦合振动方程如下:

$$\begin{Bmatrix}\boldsymbol{M}_V & 0\\ 0 & \boldsymbol{M}_B\end{Bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{X}}_V\\ \ddot{\boldsymbol{X}}_B\end{bmatrix}+\begin{Bmatrix}\boldsymbol{C}_V & \boldsymbol{C}_{VB}\\ \boldsymbol{C}_{BV} & \boldsymbol{C}_B\end{Bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{X}}_V\\ \dot{\boldsymbol{X}}_B\end{bmatrix}+\begin{Bmatrix}\boldsymbol{K}_V & \boldsymbol{K}_{VB}\\ \boldsymbol{K}_{BV} & \boldsymbol{K}_B\end{Bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_V\\ \boldsymbol{X}_B\end{bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{F}_V\\ \boldsymbol{F}_B\end{Bmatrix} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{K}$和$\boldsymbol{C}$分别代表质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵;$\boldsymbol{X}$,$\dot{\boldsymbol{X}}$,$\ddot{\boldsymbol{X}}$和$\boldsymbol{F}$分别代表位移向量、速度向量、加速度向量和力向量;下标V和B分别代表列车子系统和轨道梁子系统对应的项;下标VB和BV则代表由车轨动力相互作用引起的项.式(9)为耦合时变方程,本文采用分离迭代法求解,并编制了相应的计算程序.其中,车辆和轨道梁动力响应采用Newmark-β法计算,积分步长取0.001 s,并将磁浮列车第二节车辆中间悬浮架的竖向位移小于1×10^{-6} m作为迭代收敛判别条件.

正确模拟磁浮车-轨耦合振动响应是准确评估磁浮列车诱发GTC振动的关键.本文以长沙中低速磁浮线路为背景,通过将磁浮列车-桥梁整体耦合振动模型计算结果与实测结果对比,验证计算程序的正确性.实测对象为一座25 m预应力混凝土简支梁桥,该桥采用左右双箱梁设计,梁高2.1 m,中心间距4.4 m,中间用横隔板连接,纵向间距5 m.主梁和横隔板几何参数可参考文献[21].桥墩采用圆端形实体墩形式,墩高10 m,横截面面积为11.14 m^2,截面惯性矩I_{yy}=3.44 m^4, I_{zz}=29.34 m^4.桥梁采用C50混凝土浇筑,单线二期恒载为20 kN/m.图5为基于ANSYS平台建立的轨道-桥梁有限元模型.轨道不平顺功率谱密度函数采用文献[19]推荐的模型,具体表达式如下:

$$S_r(\Omega)=aA_r/\Omega^n \tag{10}$$

式中:a为功率谱系数,取为1;Ω是空间波数;n是频率特征参数,取为2;A_r是表面粗糙度系数,取为6.1×10^{-8}.采样步长为0.25 m,采样总长取1 000 m.图6给出了采用三角级数叠加法模拟的轨道不平顺样本.

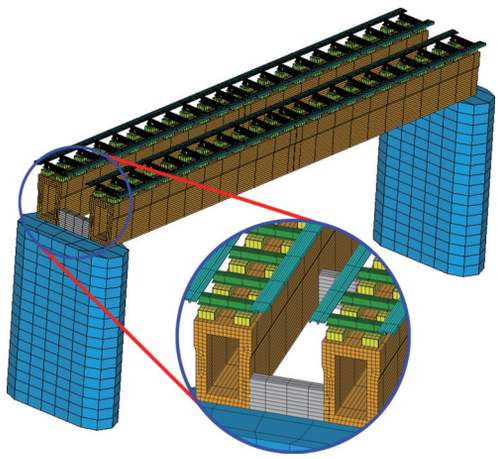


图5　中低速磁浮简支梁桥有限元模型

Fig. 5　FE model of low-to-medium speed maglev simply supported beam bridge

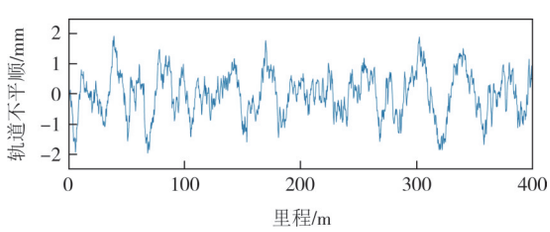


图6　轨道不平顺样本

Fig. 6　Sample of track irregularity

考虑磁浮列车以80 km/h车速通过桥梁,图7给出了轨道梁跨中垂向振动位移和加速度实测结果与仿真结果对比图,其中实测结果来源于文献[18].从图7(a)可以看出,从列车进桥到出桥的整个过程中,计算的轨道梁跨中垂向位移曲线与实测结果表现出良好的一致性,两者的幅值分别为1.56 mm和1.67 mm,相对误差为6.59%.从图7(b)可以看出,轨道梁跨中垂向加速度的计算结果与实测结果在波形和幅值方面同样吻合较好,说明计算结果有效再现了车辆过桥过程中轨道梁垂向振动加速度的变化过程.

2　磁浮列车诱发GTC振动两步分析法

磁浮列车通过GTC属于移动质量与结构动力相互作用问题,可建立类似式(9)所示的磁浮列车-轨道梁-GTC-土体耦合振动方程.如前所述,式(9)为耦合时变方程,可通过分离迭代法或整体耦合方法

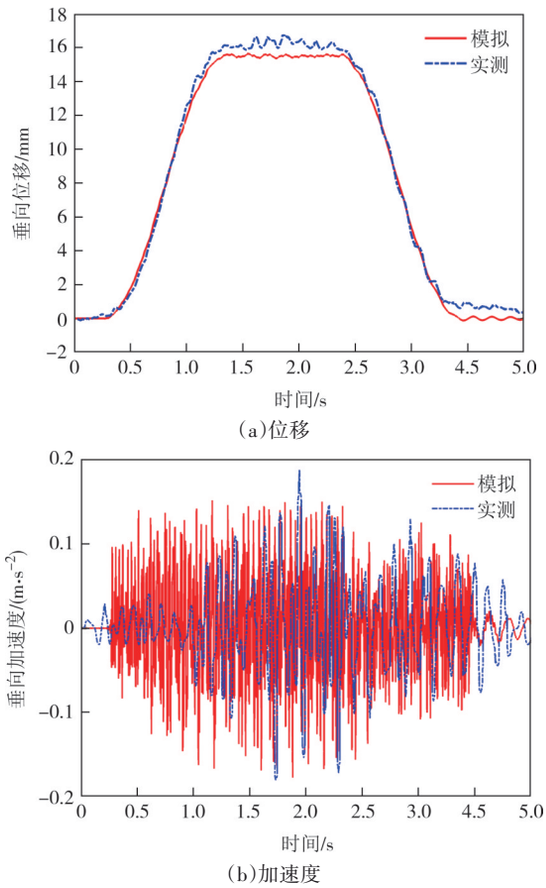


图7 轨道梁跨中垂向振动响应实测值与计算值对比

Fig.7 Comparison between the measured and calculated values of the vertical vibration response at the mid-span of guideway girder

求解.考虑到本文建立的轨道梁-GTC-土体有限元模型自由度数量达120万,若采用分离迭代法或整体耦合法求解系统耦合振动方程,会因为反复迭代或矩阵更新而显著降低评估效率.鉴于此,本文将磁浮列车-轨道梁-GTC-土体耦合系统分解为磁浮列车-轨道梁子系统和轨道梁-GTC-土体子系统,以轨道梁扣件力为纽带,采用两步分析法开展磁浮列车诱发GTC振动响应评估.第一步,通过第1.2节建立的磁浮列车-轨道梁耦合振动模型获取H型钢轨枕与承轨台之间的扣件力时程.第二步,将获取的扣件力时程施加在第1.1节建立的轨道梁-GTC-土体有限元模型上,通过ANSYS瞬态分析获得关键节点的动力响应.值得说明的是,目前已证明采用两步法评估轨道交通诱发大型结构振动可获得满足精度要求的结果[10].图8给出了磁浮列车诱发GTC振动的两步分析法流程图.

3 GTC振动响应特性及传播规律分析

3.1 振动评价指标

轨道交通诱发大型交通枢纽振动以垂向振动为主,因此在获得关键节点垂向振动加速度的基础上,本文通过最大Z振级($VL_{Z\max}$)评估振动响应,具体计算公式如下:

$$VL_{Z\max}=\max\left[VL_Z(t)\right] \tag{11}$$

$$VL_Z=20\lg\left(\frac{a}{a_0}\right) \tag{12}$$

$$a=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}a_i^2 10^{\frac{c_n}{10}}} \tag{13}$$

式中:VL_Z为按ISO 2631/1—1997规定的不同频率计权因子修正后得到的垂向振动加速度级,dB[22];a为不同频率计权因子修正后的振动加速度,m/s²;a_0为加速度基准值,取10^{-6} m/s²;a_i为通过频率计权的振动加速度,m/s²;c_n为按ISO 2631/1—1997规定的不同频率计权因子的修正值.

根据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988)中提出的城市各类区域垂向Z振级指标,对交通枢纽结构进行振级评价.由于综合交通枢纽GTC兼备交通换乘、商业与办公属性,拟参照《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988)中"混合区、商业中心区"区域,采用昼间标准75 dB作为垂向Z振级标准值.

接下来本文将重点探讨GTC不同区域的振动特性以及车致振动沿高度和水平方向的传播规律.图9给出了沿高度和水平方向选取的典型观测点位置示意图.值得说明的是,沿高度方向在结构柱观测点附近楼板中心位置亦选取了一批观测点,以进一步对比结构柱和楼板的振动响应差别.

3.2 高度方向

3.2.1 时程响应分析

首先探讨磁浮诱发GTC振动沿高度方向的传播规律.考虑列车以80 km/h速度单车次通过GTC,图10给出了第-3、0和3层的楼板和结构柱典型观测点振动响应时程曲线.从图10可以看出,就楼板的垂向振动加速度而言,随着楼层高度的上升,振动响应幅值逐渐降低.第-3、0和3层楼板观测点的

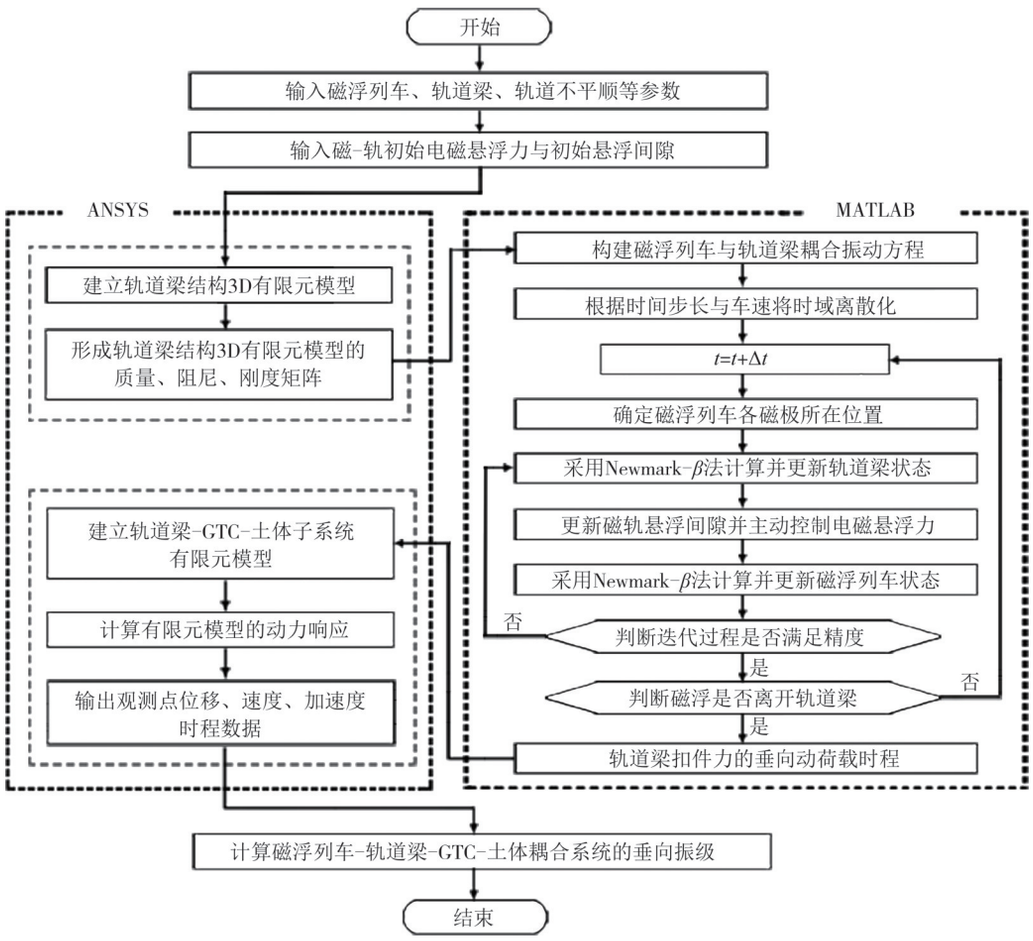
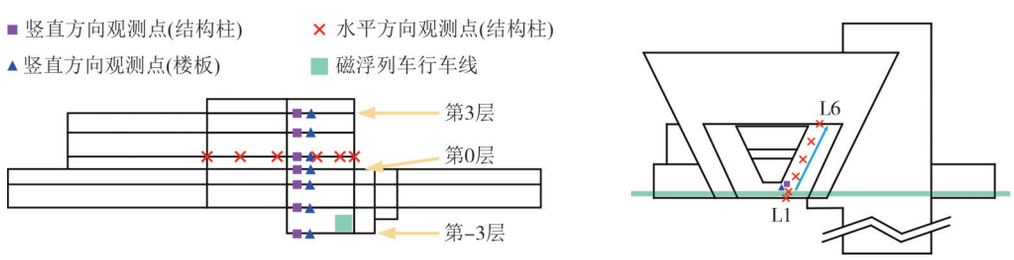


图 8　磁浮列车诱发 GTC 振动两步分析法流程

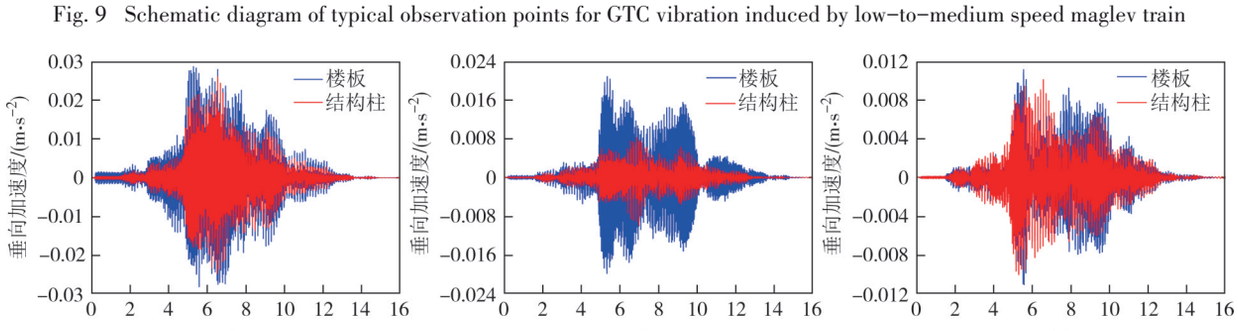
Fig. 8　The two-step analysis process of GTC vibration induced by maglev trains



(a)侧视图　　(b)俯视图

图 9　中低速磁浮诱发 GTC 振动典型观测点示意图

Fig. 9　Schematic diagram of typical observation points for GTC vibration induced by low-to-medium speed maglev train



(a)第-3层　　(b)第0层　　(c)第3层

图 10　不同楼层观测点垂向振动加速度时程曲线

Fig.10　Time history curves of the vertical vibration acceleration of the observation points on different floors

垂向振动加速度幅值分别为0.028 7、0.020 9和0.011 2 m/s^2.然而,沿着高度方向,结构柱的振动响应却并非一直衰减.在图10给出的结构柱观测点垂向振动加速度曲线当中,第-3层的幅值最大,第3层次之,第0层的最小,对应的数值分别为0.025 9、0.009 9和0.010 1 m/s^2.由此说明,就结构柱的振动响应而言,较高楼层的位置存在振动放大现象.同时从图10亦可看出,在车致振动向上传播的过程中,同一楼层楼板的振动响应均大于结构柱.这是因为同一楼层中结构柱位置的刚度较大,楼板中心区域刚度较小引起了振动响应放大.

3.2.2 功率谱分析

当磁浮车辆以80 km/h速度行驶时,不同楼层观测点的垂向振动加速度功率谱密度(PSD)曲线如图11所示.从图11可以看出,不同楼层观测点的垂向振动加速度主频几乎都在21.7 Hz,该频率与扣件力(H型枕轨与承轨台之间的相互作用力)主频7.14 Hz的3倍频吻合(见图12),说明该频率接近结构的竖向自振频率.第-3层观测点的垂向振动加速度频率较为宽泛,分布在15~130 Hz.随着振动往上传播,高频振动逐渐衰减,但第0层和第3层观测点的垂向振动加速度频率范围比较接近,主要分布在15~65 Hz.从图11亦可看出,磁浮车辆诱发的GTC振动响应存在明显的倍频现象.在扣件力主频倍频处,垂向加速度PSD出现峰值,这是因为诱发结构振动的扣件力亦存在明显倍频现象.同时值得指出的是,结构柱和楼板观测点的PSD曲线形状十分相似,但不同频率处楼板的PSD幅值大于结构柱,表明楼板处的振动响应更大.

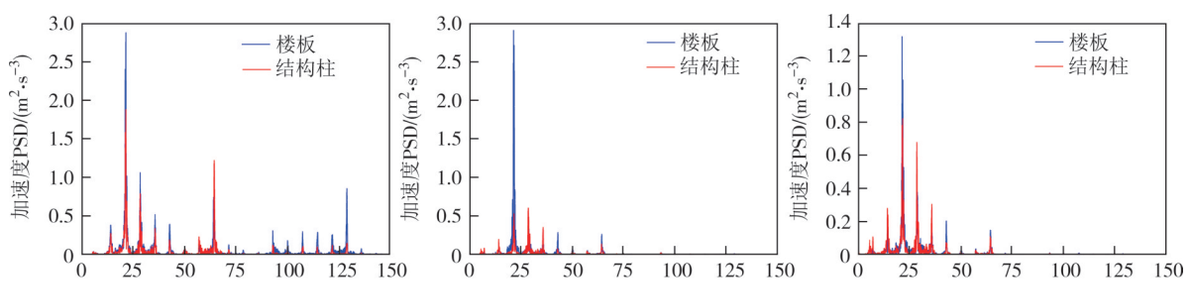


图11 不同楼层观测点垂向振动加速度PSD曲线

Fig. 11 PSD curves the vertical vibration acceleration of the observation points on different floors

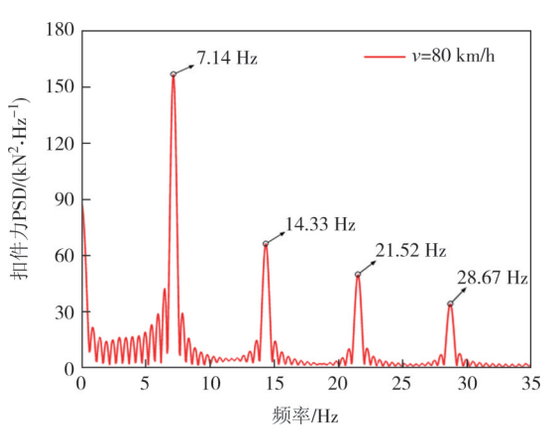


图12 80 km/h车速下扣件力PSD曲线

Fig. 12 PSD curve of the fastener force at 80 km/h

3.2.3 最大Z振级分析

当磁浮车辆以80 km/h速度行驶时,中低速磁浮列车诱发GTC振动沿高度方向的最大Z振级曲线如图13所示.从图13可以看出,结构柱和楼板观测点最大Z振级曲线随高度变化规律类似,即先减小后增大.在最靠近线路的第-3层振级最大,结构柱和楼板观测点的振级分别为56.55和62.83 dB.随着楼层高度上升,结构柱观测点的振动在第0层衰减到最小,为49.05 dB,而楼板观测点的振动在第3层衰减到最小,为53.93 dB.随着高度继续上升,振动响应逐渐增大,在第4层位置,结构柱和楼板观测点的振级分别为55.02 dB和56.54 dB.上述结果表明,GTC结构沿着高度方向存在振动放大现象.从图13亦可发现,GTC各楼层楼板观测点的振级几乎都大于结构柱观测点,这一方面是因为同一楼层上楼板观测点处刚度更小,另一方面是因为楼板局部自振主频与激励主频接近.同时还可以看到,在磁浮列车以80 km/h车速通过的条件下,结构柱和楼板观测点的振级均未超过本文第3.1节给出的限值,表明GTC具有良好整体刚度.

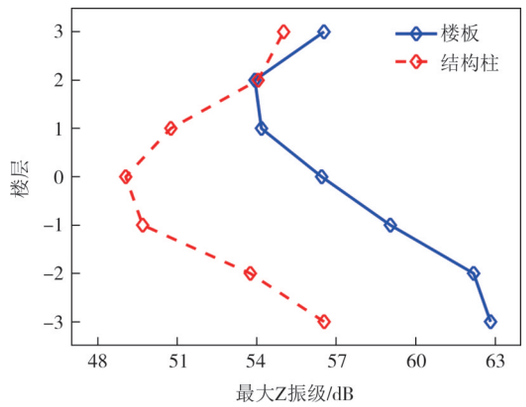


图 13　最大Z振级随高度变化规律

Fig. 13　The variation law of maximum Z vibration level with height

3.3　水平方向

3.3.1　响应时程分析

考虑磁浮列车以 80 km/h 的速度通过 GTC,图 14 给出了均位于第 1 层的 L2、L3 和 L5 号观测点垂向振动加速度时程曲线,该三个观测点距轨道中心的水平距离(ΔY)分别为 4.3、13.4、36.4 m. 从图 14 可以看出,三个观测点的垂向振动加速度时程曲线变化规律类似,即三者随列车的靠近和远离而同时增大和减小,该现象说明距轨道中心不同距离的观测点并不存在明显的延时现象. 从图 14 亦可看出,随着距轨道中心距离的增大,垂向振动加速度幅值迅速减小,L2、L3 和 L5 号观测点垂向振动加速度幅值分别为 0.009 9、0.003 2 和 0.001 1 m/s^2.L5 号观测点距轨道中心的距离比 L2 号观测点增大了 8.5 倍,加速度幅值减小了 9 倍.

3.3.2　功率谱分析

图 15 给出了车速 80 km/h 下 L2、L3 和 L5 号观测点垂向振动加速度 PSD 曲线. 从图 15 可以看出,三个观测点的 PSD 曲线分布范围相似,主要分布在 0~65 Hz 范围内,但三个点的振动主频并不相同.L2 和 L3 号观测点的振动主频为 28.6 Hz,而 L5 号观测点的振动主频为 21.5 Hz,说明随着距轨道中心线水平距离的增大,高频振动更容易衰减,振动主频降低. 与图 11 给出的垂向振动加速度 PSD 曲线类似,L2、L3 和 L5 号观测点的垂向振动加速度 PSD 曲线存在明显的倍频现象,前三个主频 28.6、21.5 和 35.9 Hz 分别为激励主频 7.09 Hz 的 4、3 和 5 倍频.

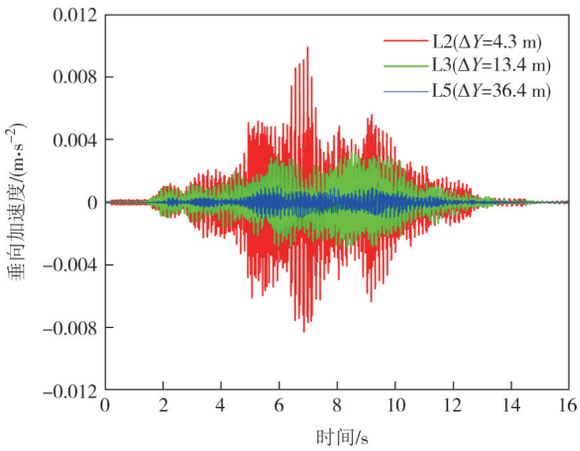


图 14　距轨道中心不同水平距离观测点垂向振动加速度时程曲线

Fig.14　Time history curves of the vertical vibration acceleration of the observation points at different horizontal distances from the center of the track

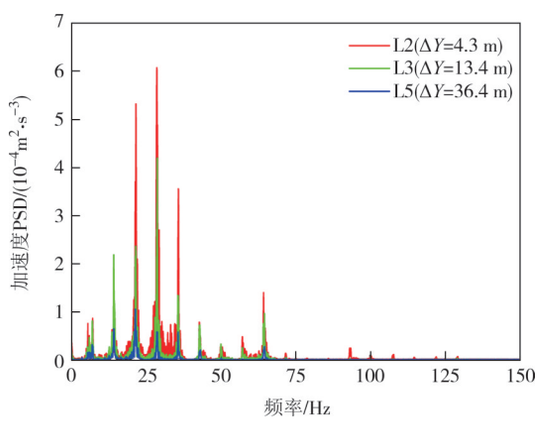


图 15　距轨道中心不同水平距离观测点垂向振动加速度 PSD 曲线

Fig.15　PSD curves of the vertical vibration acceleration of the observation points at different horizontal distances from the center of the track

3.3.3　最大Z振级分析

当磁浮车辆以 80 km/h 通过 GTC 时,第 0 层至第 3 层距轨道中心不同距离观测点的最大 Z 振级如图 16 所示. 从图 16 可以看出,随着距轨道中心线距离的增大,振级迅速减小,且不同楼层衰减规律类似. 以第 0 层和第 3 层观测点为例,距轨道中心线为 4.3 m 处的观测点,振级分别为 54.18 和 57.23 dB,而距离增大至 48.5 m 时,振级分别为 35.69 和 41.67 dB. 第 0 层和第 3 层观测点分别衰减了 18.49 和 15.56 dB. 从图 16 亦可看出,第 0 层观测点的振级最小,而第 3 层观测点的振级最大,这是因为随着楼层的上升,出现了明显的振动放大现象. 就距轨道中心距离均为 4.3 m

的观测点而言,距离为-4.3 m(负号代表反向一侧)观测点的振级明显小于4.3 m的观测点,这是因为距离轨道中心线为-4.3 m的观测点位于刚度较大的隧道上,因此振动响应偏小.同时值得说明的是,在磁浮列车以80 km/h车速通过的条件下,该四个楼层观测点的振级均未超过本文第3.1节给出的限值,同样表明GTC具有良好的整体刚度.

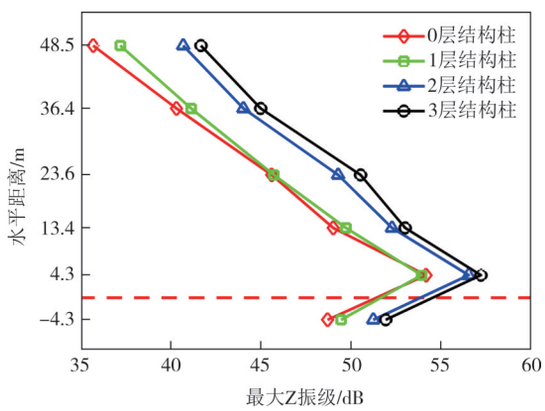


图16 最大Z振级随水平距离变化规律

Fig.16 The variation law of maximum Z vibration level with horizontal distance

4 GTC振动响应随车速变化规律

4.1 扣件力功率谱分析

本文两步法计算中,扣件力是联系磁浮列车-轨道梁子系统和轨道梁-GTC-土体子系统的"纽带".因此,探明扣件力PSD随车速变化规律,可为不同车速下GTC振动响应分析提供基础.图17给出了不同车速下扣件力PSD曲线.从图17可以得到,60、70、80、90、100、110和120 km/h车速下,扣件力PSD的第一主频分别为5.28、6.14、7.09、7.95、8.86、9.71和10.62 Hz,可见扣件力PSD的第一主频与车速之间存在明显的线性关系.这是因为扣件力PSD的第一主频是由车辆悬浮架中心间距与车速决定的,即$f=v/l_b$,其中v为车速,l_b为悬浮架中心间距(3.1 m).此外,同一车速下扣件力PSD的第一、第二和第三主频之间存在明显的倍频关系.以车速80 km/h为例,第二主频(14.38 Hz)、第三主频(21.52 Hz)分别为第一主频的2倍频和3倍频.

从式(7)中可以看出,在磁浮-轨道梁耦合系统

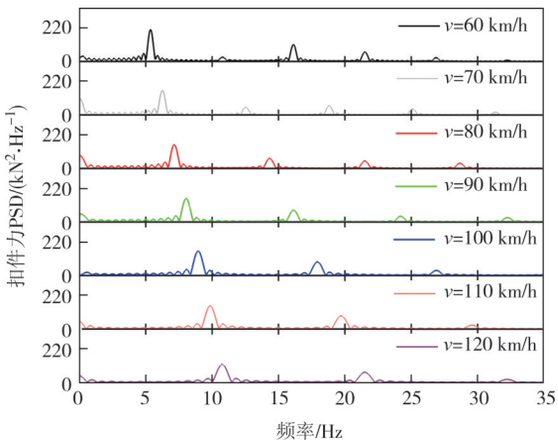


图17 不同车速下扣件力PSD曲线

Fig. 17 PSD curves of the fastener force under different vehicle speeds

动力学模型中,磁轨悬浮间隙不仅与电磁铁垂向位移、轨道不平顺有关,而且与轨道梁垂向位移相关.因此当桥梁振动响应增大时,会引起磁轨相互作用力增加,进而影响扣件力.本文轨道梁模型一阶竖向自振频率为5.45 Hz,该频率与车速60 km/h时车辆的激励主频($f=v/l_b$=5.38 Hz)接近,因此该车速下第一主频对应的扣件力PSD幅值最大.另外,当车速为110 km/h时,车辆激励主频的2倍频19.71 Hz与轨道梁一阶反对称竖弯自振频率19.41 Hz接近,因此该车速下第二主频对应的扣件力PSD幅值最大.

4.2 GTC振动响应1/3倍频分析

本节研究磁浮车辆以不同车速通过GTC时,不同楼层典型观测点垂向振动加速度1/3倍频程曲线变化规律.与第3节观测点选取方法不同的是,本节重点关注人流量较大的位置,选取的典型观测点包括第-3层磁浮站台位置、第0层候车厅和第3层商业区中心位置,它们距轨道中心的水平距离分别为4.3、23.6和23.6 m.图18给出了60、90、120 km/h车速下各楼层观测点垂向振动加速度1/3倍频曲线.从图18(a)可以看出,三种车速下第-3层观测点的1/3倍频程曲线变化趋势类似,即在[1,25) Hz范围内迅速上升,在[25,125) Hz范围内缓慢递减.60、90和120 km/h车速下该观测点的最大振级分别为76.0、65.2和68.3 dB,对应的中心频率分别为20、20和25 Hz.若将[1,125) Hz频率范围分为[1,5) Hz低频区域、[5,50) Hz中频区域和[50,125) Hz高频区域,则上述结果表明三种车速下第-3层观测点均以中高频振

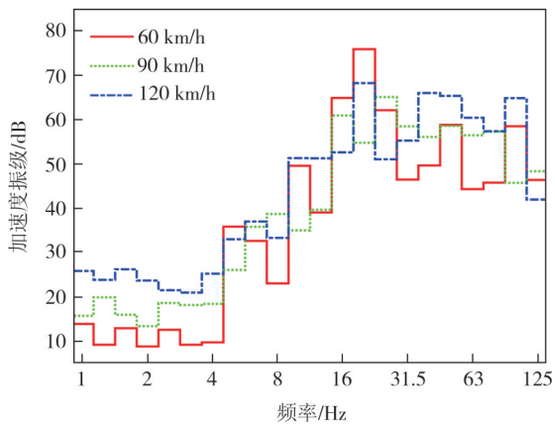
动为主.从图 18(b)可以看出,不同车速下第 0 层观测点的 1/3 倍频程曲线在[1,125] Hz 范围也是先增大后减小,但不同的是,三种车速下最大振级对应的中心频率并不完全相近.60、90 和 120 km/h 车速下该观测点的最大振级分别为 57.2、47.3 和 54.2 dB,对应的中心频率分别为 20、40 和 40 Hz.同时,从图 18(b)亦可看出,三种车速下 1/3 倍频程曲线达到最大振级后迅速衰减,因此不同车速下第 0 层观测点以中频振动为主.从图 18(c)可以看出,不同车速下第 3 层观测点的 1/3 倍频程曲线在[1,125] Hz 范围的变化趋势与第 0 层观测点类似,即先增大后减小,但该观测点的振动加速度级达到最大值后衰减更为迅速.60、90 和 120 km/h 车速下该观测点的最大振级分别为 60.4、49.2 和 52.2 dB,对应的中心频率分别为 20、25 和 20 Hz.显然,该观测点同样以中频振动为主.

值得注意的是,三种车速下各观测点的最大振动加速度级以车速 60 km/h 时为最大,其余中心频率对应的振级则主要以车速 120 km/h 时最显著.这是因为当车速为 60 km/h 时,磁浮车辆激励主频(5.38 Hz)与轨道梁一阶竖向自振频率(5.45 Hz)接近,此时车辆诱发振动最为强烈.

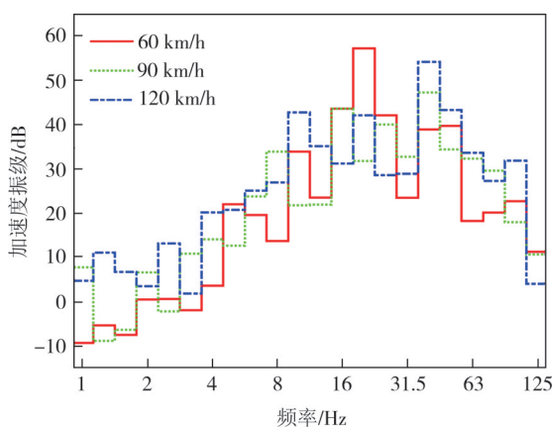
4.3　最大 Z 振级分析

当磁浮车辆以 60~120 km/h 车速通过 GTC 时第 4.2 节所述三个观测点的最大 Z 振级随车速变化规律如图 19 所示.从图 19 可以看出,随着磁浮运行速度增加,不同楼层观测点的振级变化趋势类似,即先减小后增大.以第-3 层观测点为例,当车速从 60 km/h 增加至 70 km/h 时,振级从 68.67 dB 减小至 62.87 dB;但当车速从 80 km/h 增加至 120 km/h 时,振级呈波动趋势,分别为 64.55、59.08、61.12、58.43 和 62.01 dB.但值得注意的是,三个观测点的振级并未表现出随车速同时增大或减小,这不仅与观测点所处位置的动力特性有关,而且与振动波的衰减亦有关系.60~120 km/h 车速范围内,第-3、0 和 3 层的振级变化量分别为 10.25、10.53 和 8.62 dB,表明第 3 层的振动响应受车速影响较小,但第-3 层和第 0 层的振动响应受车速影响较大.

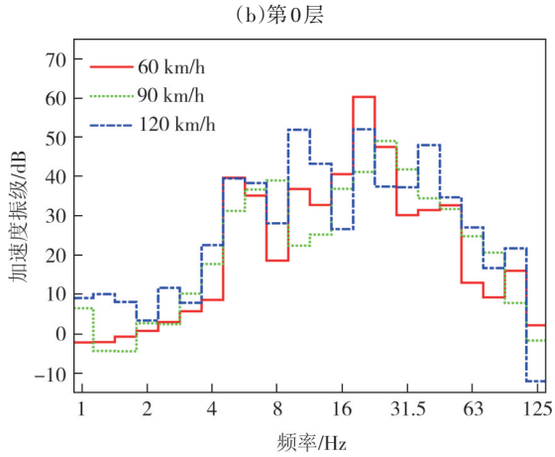
另外值得注意的是,60~120 km/h 车速范围内,三个观测点的振级最大值均出现在车速 60 km/h 时,分别为 68.67、49.71 和 53.03 dB,出现该现象的原因已在第 4.2 节进行了详细分析.即使如此,车速 60 km/h 的振级也未超过混合区、商业中心区昼间 75 dB 限值,表明 GTC 具有良好的整体刚度.



(a)第-3 层



(b)第 0 层



(c)第 3 层

图 18　不同车速下各楼层观测点垂向振动加速度 1/3 倍频曲线

Fig. 18　One-third octave curves of the vertical vibration acceleration of the observation points on each floor at different vehicle speeds

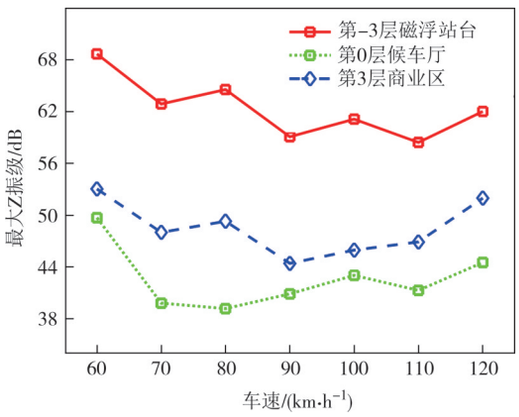


图 19 最大 Z 振级随车速变化规律

Fig. 19 The variation law of maximum Z vibration level with vehicle speed

5 结 论

1) 采用多体动力学方法建立磁浮车辆模型,采用有限元方法建立轨道梁模型,两者之间通过线性磁轨关系耦合为整体系统.与实测结果对比表明,本文建立的磁浮列车-轨道梁耦合振动模型能有效再现车辆过桥过程中轨道梁的垂向振动响应.

2) 由于扣件力 PSD 的主频(f)与车速(v)之间存在如下关系:$f=v/l_b$,其中 l_b 为悬浮架中心间距,因此扣件力主频随车速线性增大.同时,同一车速下扣件力第一、第二和第三主频之间存在明显的倍频关系.

3) 中低速磁浮诱发 GTC 振动沿高度方向传播时,结构柱和楼板的振动响应均随高度的增加先减小后增大;沿水平方向传播时,振动响应随距离的增大而快速衰减;同一区域内,结构柱的垂向振动比楼板小,但两者的振级差值随着楼层高度的上升而减小.

4) GTC 振动响应存在明显的倍频现象,即扣件力主频倍频处振动响应的 PSD 曲线存在明显峰值.磁浮线站台位置的振动频率较为宽泛,主要分布在 15~130 Hz,而随着振动往上传播,高频振动逐渐衰减,地上楼层振动响应频率主要分布在 15~65 Hz.

5)不同楼层观测点 1/3 倍频程最大振级均出现在车速 60 km/h,这是因为此时车辆激励主频与轨道梁一阶竖向自振频率接近.当磁浮列车以 60~120 km/h 车速通过 GTC 时,各楼层最大 Z 振级未超过混合区、商业中心区昼间 75 dB 限值,表明该机场 GTC 具有良好的整体刚度.

参考文献

[1] 杜彦良, 张浩, 刘伯奇. 大型铁路客站结构健康监测现状与发展思考[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(3): 1-9, 16.
DU Y L, ZHANG H, LIU B Q. Consideration on the current situation and development of structural health monitoring of large railway passenger stations [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(3): 1-9, 16. (in Chinese)

[2] YANG N, GUO T, SUN G Z. Train-induced vibration on elevated railway station [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(12): 3745-3753.

[3] 张凌, 雷晓燕, 冯青松, 等. 高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 1107-1116.
ZHANG L, LEI X Y, FENG Q S, et al. An experimental study on the vibration propagation of high-speed railway integrated transportation hub station structure [J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(9): 1107 - 1116. (in Chinese)

[4] 巴振宁, 焦鹏, 梁建文, 等. 高速列车引起站台振动的实测与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(12): 1211-1217.
BA Z N, JIAO P, LIANG J W, et al. Actual measurement and analysis of station vibration induced by high-speed train [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(12): 1211-1217. (in Chinese)

[5] 冯青松, 廖春明, 张凌, 等. 地铁列车进出站对换乘站振动影响实测分析[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 19-26.
FENG Q S, LIAO C M, ZHANG L, et al. Measurement and analysis of the impact of metro transfer train arriving at or departing from the station on platform vibration [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 19-26. (in Chinese)

[6] 张楠, 夏禾, 程潜, 等. 制动力作用下车辆-车站结构耦合系统分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 138-143.
ZHANG N, XIA H, CHENG Q, et al. Analysis method for a vehicle-station structure coupled system under braking force [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 138-143. (in Chinese)

[7] 朱志辉, 王力东, 蒋小金, 等. 列车-高架桥式客站耦合系统振动响应分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4): 656-665.
ZHU Z H, WANG L D, JIANG X J, et al. Vibration analysis of the train-elevated bridge railway station coupled system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 656-665. (in Chinese)

[8] 颜锋, 祁跃, 何连华, 等. 北京大兴国际机场的列车振动影响研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 8-13.
YAN F, QI Y, HE L H, et al. Study on the vibration induced by high speed train in Beijing Daxing International Airport [J]. Building Science, 2017, 33(5): 8-13. (in Chinese)

[9] ZHANG X, RUAN L H, ZHAO Y, et al. A frequency domain model for analysing vibrations in large-scale integrated building-bridge structures induced by running trains [J]. Proceedings of

the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 234(2):226-241.

[10] YANG J J, ZHU S Y, ZHAI W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668:485-499.

[11] 谢伟平, 马超鹏, 周德军, 等. "桥建合一"型四车道高架车站振动响应分析与舒适度研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(8):31-37,83.
XIE W P, MA C P, ZHOU D J, et al. Research on vibration response and serviceability of four lane elevated station of "combination of bridge and construction"[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(8):31-37,83. (in Chinese)

[12] 郭向荣, 刘江浩, 吴业飞, 等. "站桥合一"高架车站动力响应影响参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2):671-681.
GUO X R, LIU J H, WU Y F, et al. Research on the influencing parameters of the dynamic responses of the elevated station with "integral station-bridge system" [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2):671-681. (in Chinese)

[13] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.
ZOU C, FENG Q S, HE W. Research review on environmental vibrations in metro depot and over-track buildings induced by train operation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1):27-46. (in Chinese)

[14] 李小珍, 谢昆佑, 王党雄, 等. 中低速磁浮轨道-桥梁系统竖向振动传递特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14):105-111.
LI X Z, XIE K Y, WANG D X, et al. Vertical vibration transfer characteristics of medium-low speed maglev rail-bridge systems [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(14): 105-111. (in Chinese)

[15] 吴奎. 中低速磁浮桥建合一车站结构振动分析探讨[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(11):127-132.
WU K. Vibration analysis of bridge-building combined station in medium-low speed maglev transportation [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11):127-132. (in Chinese)

[16] 杨雪,王金龙,刘宇雄,等. 基于多尺度模型大悬挑钢结构力学性能分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 137-145.
YANG X, WANG J L, LIU Y X, et al. Mechanical properties analysis of large cantilevered steel structures based on a multi-scale model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 137-145. (in Chinese)

[17] WANG L D, ZHU Z H, BAI Y, et al. A fast random method for three-dimensional analysis of train-track-soil dynamic interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 252-262.

[18] WANG D X, LI X Z, WANG Y W, et al. Dynamic interaction of the low-to-medium speed maglev train and bridges with different deflection ratios: experimental and numerical analyses [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(11):2399-2413.

[19] ZHAO C F, ZHAI W M. Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(3):185-210.

[20] SHI J, WEI Q C, ZHAO Y. Analysis of dynamic response of the high-speed EMS maglev vehicle/guideway coupling system with random irregularity [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(12):1077-1095.

[21] 王力东, 黎清蓉, 卜秀孟, 等. 基于可靠度理论的中低速磁浮车-桥系统轨道梁动力系数研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-11(2023-05-10)[2023-06-19].https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230508.1739.012.html.
WANG L D, LI Q R, BU X M, et al. Study on dynamic factors of the guideway beam of low and medium speed maglev vehicle-bridge system based on reliability theory [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-11(2023-05-10)[2023-06-19].https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230508.1739.012.html.(in Chinese)

[22] Mechanical vibration and shock: evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: general requirements: international standard ISO [S]. International Standardization Organization, 1997.