

# 城市高架轨道多层隔振系统影响参数匹配

刘 艳<sup>1</sup>, 罗雁云<sup>2</sup>

(1. 上海材料研究所, 上海 200437; 2. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 以轨道交通 30 m 双线混凝土简支箱梁桥为研究对象, 考虑扣件-轨道板支承-桥梁支座多层隔振系统内部耦合机理, 建立车-轨-桥有限元模型(FEM), 通过现场试验数据验证模型有效性. 利用该模型展开多工况计算分析, 研究各层隔振元件刚度的改变对车体、轨道结构、桥梁结构振动响应特性和综合隔振效果的影响规律, 获取参数匹配原则. 结果表明: 高架轨道各层隔振元件宜采用匹配设计, 可在改善沿线环境隔振效果的同时, 兼顾车-轨-桥各层子系统动力响应特性.

**关键词:** 城市高架轨道; 扣件; 轨道板支承; 桥梁支座; 参数匹配原则

中图分类号: TQ332

文献标志码: A

## Parameter Matching on Multi-layer Vibration Isolation System of Viaduct Rail Transit

LIU Yan<sup>1</sup>, LUO Yanyun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China; 2. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** By taking two simply supported box girder bridges of 30 m as example, a systematic dynamic simulation model of vehicle-track-bridge was established, with a consideration of the coupling mechanism of multi-layer vibration isolation system. The finite element model(FEM) was verified by a set of field tests. Good agreement between measurement and predicted results proved the effectiveness and accuracy of the model. With the validated simulation model, the effect of resilient parameters on the dynamic response of vehicle, track, slab, bridge wing plate, web plate, bottom plate and bridge pier, was obtained. Finally, parameter matching principle was presented. The results indicate that an optimized elastic parameters matching design of viaducts may improve the isolation efficiency for the vibration environment along railway lines, and ameliorate the dynamic properties of each substructure of vehicle-rail-bridge systems.

**Key words:** viaduct rail transit; rail fastener; elastic support of rail plate; bridge bearing; parameter matching principle

近年来,随着我国城市规模不断扩大以及人口数量和出行需求的增加,城市轨道交通持续快速发展. 高架轨道结构因其用地少、施工周期短等突出优势在城市轨道交通建设中应用广泛. 调查结果表明,世界范围内有 491 条主要城市轨道交通线路,总长 7 016 km,采用高架轨道形式的线路总长 4 248 km,约占 60.5%<sup>[1]</sup>. 然而,很多高架轨道结构紧邻城市声振敏感区域,由轮轨冲击作用产生并传递至桥梁结构的振动,以及因振动诱发的低频辐射噪声引起居民强烈的烦恼反应,使得投诉事件屡见不鲜<sup>[2]</sup>.

城市高架轨道振动问题已引起国内外学者的普遍关注,车-桥耦合动力学分析<sup>[3]</sup>、振动传播衰减路径分析<sup>[4]</sup>、沿线环境振动预测和评估分析<sup>[5-6]</sup>等距今已有数十年的研究历史. 此外,轨道交通振动控制技术也较为成熟,包括振源控制、吸振、消振和隔振技术. 轮轨接触是轨道交通的振动源,凡是能减小轮轨动力作用的措施均能起到减振作用<sup>[7]</sup>,如调节列车运行速度、采用重型钢轨、减少钢轨接头、定期打磨钢轨等. 吸振和消振技术在高架轨道中的应用主要有钢轨动力吸振器和桥梁动力吸振器等<sup>[8-10]</sup>. 从能量角度而言,该技术将受控对象的振动能量转移到动力吸振器上以抑制动态响应,或利用附属阻尼元件的拉伸和剪切变形消除振动能量,从而降低共振频率附近的动态响应幅值和宽频随机激励下动力响应的均方根值. 城市高架轨道振动控制领域应用最广泛的是隔振技术,减振扣件、弹性轨枕、浮置板道床、轨道桥梁支座以及在环境土体中设置的波阻块、隔振明沟、隔振填充沟、隔振墙等都是从传递路径入手,减小轨道结构振动能量向沿线建筑和土体环境

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51708422, 51678446)

第一作者: 刘 艳(1985—),女,工学博士,主要研究方向为轨道工程、固体力学. E-mail: 15000600002@163.com

进行有效传递<sup>[11-14]</sup>.可见,城市高架轨道振动问题的理论和改善措施已具备较深入的研究基础.然而,对于一个同时包含轨下-(枕下)-轨道板下-梁下多层弹性元件的多自由度复杂隔振系统而言,即便在几十到几百赫兹的局部特征频率范围内高架轨道交通自上而下各层子系统之间仍然具有较强的耦合作用.在城市高架轨道振动控制方面,对于弹性扣件-轨道板支承-桥梁支座所组成的多层隔振系统内部耦合机理、参数影响规律及参数匹配原则的研究目前尚不多见<sup>[15]</sup>.

本文将详细讨论列车运行条件下轨下、轨道板下、梁下各层隔振元件之间的协同和制约关系,以及各参数对车体、轨道结构及桥梁结构振动响应特性的影响规律,并进行参数匹配研究.

## 1 现场试验

### 1.1 试验概况

选择我国某城市轨道交通 1 号线 2 个高架线路断面进行现场振动测试,2 个测试断面均为直线区段,桥梁形式均为 30 m 双线简支箱梁,梁高 1.8 m,墩高 11 m,箱梁横断面如图 1 所示.两断面均采用 WJ-2A 型扣件系统,静态刚度为  $20 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ .对于普通整体道床(断面 I),采用 500g、100g、50g 压电式加速度传感器测试钢轨 Z1、轨道板 Z2 以及桥梁的顶板 Z3、底板 Z4、腹板 Z5 和翼板 Z6 在车辆运行条件下的垂向振动加速度,断面测点在桥梁跨中位置,测点布置示意图如图 2 所示.其中,字母 Z 表示振动测点,数字为测点编号.对于道床垫式浮置板结构(断面 II),由于测试条件限制,仅布置了钢轨 Z1、轨道板 Z2、桥梁顶板 Z3 3 个垂向加速度振动测点.道床垫式浮置板结构又称连续式浮置板,本文所涉及试验段轨道板支承刚度约为  $50 \text{ kN} \cdot (\text{mm} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ .试验车辆为实际运营地铁 B 型车,6 节编组,转向架中心距 12.6 m,转向架轴距 2.3 m,最高速度  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,测试选取左侧下行线.

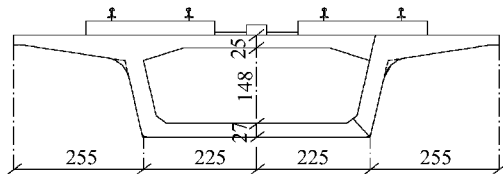


图 1 箱梁横断面(单位:cm)

Fig.1 Cross section of the box beam (unit: cm)

### 1.2 试验结果

试验获取的 2 个断面各测点全频段振动加速度

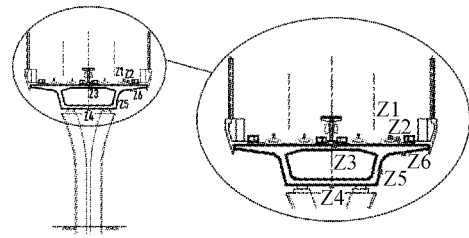


图 2 测点布置示意图

Fig.2 General layout of vibration measuring point

级  $L_a = 20 \lg(a/a_0)$ , 如表 1 所示.其中,振动加速度级  $L_a$  的单位为 dB,  $a$  和  $a_0$  分别为实测加速度和基准加速度( $1 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).由表 1 中普通整体道床(断面 I)的测试数据可知,钢轨振动加速度级最大,自钢轨向道床结构振动衰减 32 dB,进而向桥梁顶板处衰减约 5 dB.桥梁的顶板、腹板和翼板的振动较接近,由于底板为弹性支承的薄壁板状结构,其振动呈现一定程度的放大.对比表 1 中道床垫式浮置板结构(断面 II)与普通整体道床,2 种道床形式的钢轨振动加速度级虽基本一致,但道床垫式浮置板结构由钢轨向道床的振动衰减相对较小,约为 22 dB,而进一步向桥梁结构的振动衰减高达 25 dB.道床垫式浮置板结构对桥梁及下部基础结构具有更显著的隔振效果.然而,从能量角度而言,道床垫式浮置板结构有效隔离的振动能量被重新分配并聚集在上部轨道结构中,引发轨道板振动放大.图 3、4 为测试结果的全频段特征.由于篇幅所限且方便比较,图 3、4 中仅列出了断面 I 和 II 钢轨、轨道板、桥梁顶板的加速度频谱.由图 3 可知:截面 I 钢轨振动的卓越频率为中高频段,430~730 Hz;轨道板振动的卓越

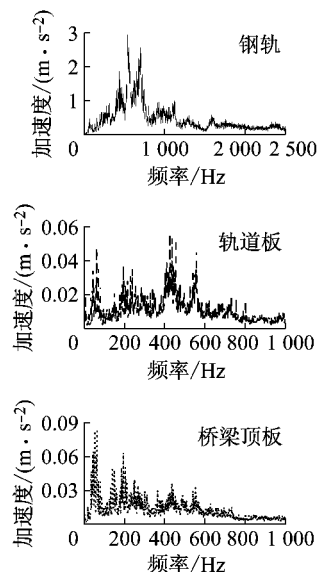


图 3 断面 I 振动测点频谱

Fig.3 Spectrum of measurement points in section I

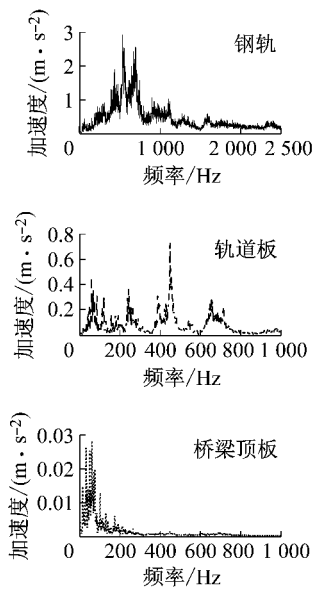


图 4 断面 II 振动测点频谱图

Fig.4 Spectrum of measurement points in section II

表 1 各测点振动加速度级

Tab.1 Measured vibration acceleration level dB

断面	各测点振动加速度级					
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
I	149.47	117.75	112.95	116.99	113.88	110.78
II	147.79	124.84	100.06			

频率为 40~75、400~450 Hz;桥梁顶板振动的卓越频率为 35~65 Hz. 由图 4 可知,相对截面 I 而言,截面 II 钢轨和轨道板的优势振动频率范围未发生显著变化,但轨道板的响应幅值在全频段均远大于普通整体道床. 此外,截面 II 桥梁顶板的振动卓越频率虽仍为 35~65 Hz,但振幅明显降低,并且道床垫式浮置板结构有效隔离了大于 100 Hz 的振动能量. 频谱图反映的 2 个截面振动信息与表 1 所示的振动特性总体一致.

## 2 建模分析

### 2.1 车体模型

不考虑组合列车的影响,仅考虑一节列车的动力学性能以及车辆点头、摇头、浮沉、侧滚、横移 5 个方向的自由度. 将车体定义为刚体,并在几何中心施加质量和转动惯量,车体通过二系悬挂支撑在转向架上,二系悬挂用 Cartesian 单元表征,车辆参数如表 2 所示. 转向架构架同样定义为刚体,考虑点头、浮沉和侧滚 3 个自由度,转向架构架与轮对之间的一系悬挂定义为线性弹簧/阻尼单元.

### 2.2 高架轨道结构模型

以断面 I 为例说明建模过程. 基于工程模拟有

表 2 车辆参数

Tab.2 Vehicle parameters

参数名称	数值	单位
轴重	140 000	N
轮对质量	1 420	kg
构架质量	2 550	kg
车体质量	21 920	kg
转向架一系垂向刚度	$1.7 \times 10^6$	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
转向架一系垂向阻尼	5 000	$(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$
转向架二系垂向刚度	275 000	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
转向架二系垂向阻尼	30 000	$(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$
轮对摇头转动惯量	985	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
构架侧滚转动惯量	1 050	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
构架点头惯量	1 750	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
车体摇头惯量	617 310	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
车体侧滚惯量	14 890	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
车体点头转动惯量	617 310	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
车辆基本长度	19.0	m
车辆基本宽度	2.8	m
转向架轴距	2.2	m
车体定距	12.6	m

限元仿真平台 Abaqus,建立车-轨-桥多层隔振系统耦合模型. 采用 60 轨,轨道板单块板长 6.0 m,宽 2.7 m,一跨桥等间距装配 5 块轨道板. 如图 5 所示,相邻两跨轨道桥用于排除车轮行走过程中可能引起的边界效应<sup>[16]</sup>. 图 5 中,虚线框位置为车辆运行起点,即第 1 根车轴驶入中间跨桥面板,车辆运行终点为最后 1 根车轴驶出中间跨桥面板. 振动加速度输出值取图 5 中虚线框所示的跨中截面响应值. 为有效获取轨道板和桥梁结构的振动传递特性,轨道板、梁体和墩体均采用八节点非协调实体单元 C3D8I. 为方便下文详细讨论高架轨道多层隔振系统弹性参数的影响规律及匹配原则,扣件、轨道板支承、桥梁支座均定义为三向线性连接属性. 由于桥墩整体质量较大,并且桥墩底部通过桩基础埋在土体中,在列车荷载作用下,桥墩振动相对较小,因此本文在建模时不考虑桥墩的接地弹簧属性.

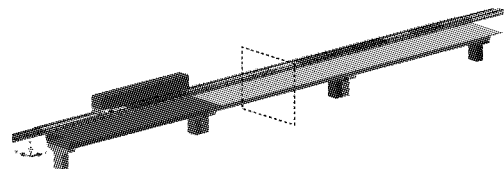


图 5 高架轨道结构有限元模型

Fig.5 Finite element model of integrated viaduct rail

### 2.3 轮轨接触模型

所建立有限元模型中,选用面-面接触来定义轮轨接触属性. 将车轮踏面定义为主面,钢轨轨头上表面定义为从面. 为提高模型的收敛性,设立 2 个加载步建立接触. 第 1 步,通过小荷载平稳建立轮轨接触

关系;第 2 步,将车辆、转向架的重力施加给钢轨.

轮轨接触属性的定义包括轮轨间法向作用和切向作用.赫兹非线性接触模型为

$$P(t) = \left(\frac{1}{G}\delta Z(t)\right)^{3/2} \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为轮轨间法向作用力; $G$ 为轮轨接触常数,与车轮踏面外形有关,对于磨损型踏面车轮, $G=3.86\times R^{-0.115}\times 10^{-8}$ ,其中  $R$  为轮轨接触点处车轮滚动半径; $\delta Z(t)$ 为轮轨接触点处的弹性压缩量.根据式(1)求解出轮轨间不同弹性压缩量所对应的法向作用力.利用 Abaqus“软”接触中的表格形式,定义轮轨间法向作用关系.表格中输入的数据是轮轨间法向作用力与弹性压缩量曲线中的离散点,如果模型中某一时刻的变形量介于两点之间,则轮轨间的法向力为两点间的线性插值.

轮轨间的切向作用力

$$F = \mu P(t) \quad (2)$$

$\mu$  取 0.25.

### 2.4 输入激励

考虑车体质量及车辆经过时钢轨几何不平顺(高低)的共同作用.轨道不平顺通过轨道谱描述,并将其视为一个平稳随机过程.常用轨道谱有美国谱、英国谱和德国谱等.

在有限元模型的求解过程中,需要将轨道谱转换为时间或空间样本.本文采用三角级数法<sup>[17]</sup>生成轨道高低不平顺空间样本,如下所示:

$$\omega(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\omega_k) \Delta\omega} \cos(\omega_k x + \phi_k) \quad (3)$$

式中: $\omega(x)$ 为轨道空间不平顺; $S(\omega_k)$ 为选用的轨道不平顺功率谱密度函数; $\omega_k$ 为空间角频率, $\omega_f$ 和  $\omega_N$ 为考虑的空间角频率上下限,由波长和速度确定; $\Delta\omega$ 为频率间隔带宽,该值决定计算精度; $x$ 为钢轨长; $\phi_k$ 为对应的第  $k$  个频率的相位,一般为  $0\sim 2\pi$  之间的随机数<sup>[18]</sup>.

轨道不平顺功率谱密度

$$S_v(\Omega) = \frac{KA_v\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (4)$$

式中: $S_v(\Omega)$ 为轨道不平顺功率谱密度, $\text{cm}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $K$  取值 0.25;  $A_v$  为粗糙度系数,取  $0.0339 \text{ cm}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\Omega$  为轨道不平顺的空间角频率,  $\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\Omega_c$  为截断频率,取  $0.8245 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ . 通过与本文现场测试轨道运营方提供的轨检数据比对分析,本文选择美国六级谱作为输入激励.根据上述三角级数法,将式(4)所示的不平顺功率谱密度通过式(3)转换为轨道高低不平顺空间样本,结果如图 6 所示.最终,将轨道高低不平顺样本输入到仿真模型中.

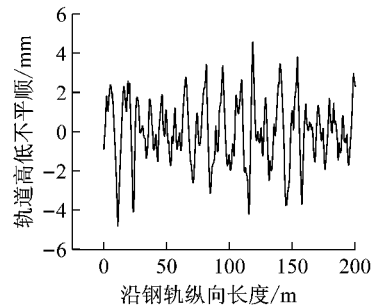


图 6 轨道高低不平顺谱

Fig.6 Track longitudinal irregularity spectrum

### 3 模型有效性验证

通过所建立模型,首先计算获取断面 I 各测点振动响应特性.桥梁的底板(Z4)、腹板(Z5)和翼板(Z6)1/3 倍频程振动加速度级的仿真与测试结果如图 7 所示.结果表明,仿真结果与测试结果具有较好的一致性,从而验证了模型的有效性,满足本文计算精度要求.断面 I、II 的计算结果,均与测试结果具有较好的相似性,此处不再赘述.得到验证的理论模型将用于各层隔振元件性能参数对车-轨-桥系统振动响应特性的综合影响规律以及参数匹配原则研究.

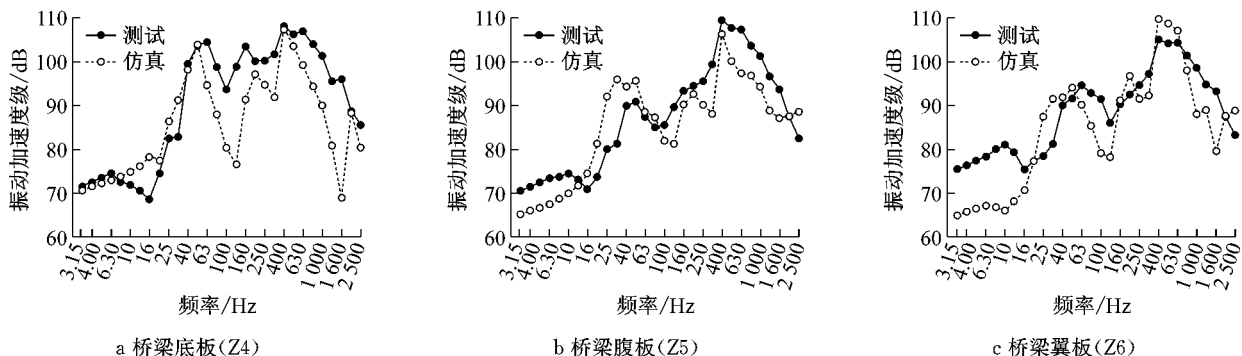


图 7 计算与测试结果对比(截面 I)

Fig.7 Comparison between calculation and measured results (section I)

## 4 参数影响规律及参数匹配

利用上述理论模型,选取扣件刚度、轨道板支承刚度、桥梁支座刚度 3 个参数,进行多工况动力学计算.不同参数选取不同水平值,根据实际轨道工程元件性能参数确定上下限,具体数值参见表 3.表 3 中第 2 行为本文测试断面 II 各层弹性元件刚度.对表 3 中参数进行组合,共改变参数 48 次.计算结束后,输出各个参数不同水平值下车体、钢轨、轨道板、桥墩以及桥梁的翼板、腹板、底板振动加速度级.本文现场测试结果表明,除钢轨振动以外,其余测点优势频率主要为低频范围,综合考虑我国城市轨道交通振动测量及评估相关规范,分析频率范围取 $[0, 200]$  Hz.对计算结果进行整理分析,可得如图 8 所示的扣件刚度、轨道板支承刚度、桥梁支座刚度对车体、钢轨、轨道板、桥墩以及桥梁的翼板、腹板、底板振动特性的影响.本文仅对上述各弹性元件垂向刚度进行影响规律及参数匹配研究.

表 3 城市高架轨道多层隔振系统参数

Tab.3 Parameter values of multi-layer vibration isolation system of viaduct rail transit

扣件刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	轨道板支承刚度/ ( $\text{kN} \cdot (\text{mm} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ )	桥梁支座刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
4	6	100
20	50	1 800
40	100	4 000
200	350	

### 4.1 参数影响规律

#### 4.1.1 扣件刚度的影响

扣件刚度的改变对钢轨振动的影响最为显著,扣件刚度大幅度降低易于引发钢轨振动放大,但会改善轨道板以及桥梁的翼板、腹板和底板的振动特性.由图 8a、g 可知:扣件刚度对车体及振动向下部和沿线传递的影响并不由扣件刚度唯一决定,而是由扣件刚度、轨道板支承刚度及桥梁支座刚度共同决定.当轨道板支承刚度较小时,扣件刚度的降低在一定程度上放大了车体的振动;当轨道板支承较硬时,降低扣件刚度有利于改善车体振动特性.此外,仅当桥梁支座刚度较大时,降低扣件刚度才有利于系统隔振效果,减小传递至桥墩和沿线环境的振动能量.反之,会小幅度放大振动能量的传递.

#### 4.1.2 轨道板支承刚度的影响

降低轨道板支承刚度不仅可以有效抑制振动能量向桥墩,进而向下部基础结构及沿线环境土体传

递,同时还对桥梁的翼板、腹板和底板的动力响应具有显著的有利影响.当轨道板支承变软时,桥梁的翼板、腹板和底板的振动加速度级均随之大幅度减小,轨道板支承刚度越小越敏感,影响越显著.由图 8c 可知,由于改变轨道板支承刚度即改变了轨道板子系统的固有频率,更多频率成分的振动能量因为轨道板支承刚度的减小而在传递路径中被有效隔离,最终聚集在上部结构中.该部分被隔离的振动能量引发了轨道板自身的振动放大,不论采用小刚度扣件还是较硬的扣件系统,上述放大现象始终存在,而且影响规律不变.由图 8a、b 可知,轨道板支承刚度对钢轨振动的影响较小,对车体的影响需与扣件刚度匹配设计,详见第 4.2 节参数匹配原则.

#### 4.1.3 桥梁支座刚度的影响

有研究表明,当高架轨道桥梁支座刚度在 $1\ 000 \sim 5\ 000 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 范围内变化时,刚度的改变对轨道结构的振动几乎没有影响<sup>[19]</sup>.在 $200.43 \sim 417.44 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 范围内时,桥梁支座刚度的增加使桥梁结构跨中动力系数减小.桥梁支座刚度由 $1\ 927.86 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 减小至 $400.86 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,桥梁跨中竖向位移随之增大,最多可增加 $54\%$ <sup>[20]</sup>.本文对桥梁支座刚度的影响分析结果表明,弹性桥梁支座可有效阻止轮轨作用力及振动能量传递至桥墩及沿线环境.当桥梁支座刚度由 $4\ 000 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 减小至 $1\ 800 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,桥墩振动加速度级最高可降低 $15 \text{ dB}$ ,桥梁支座刚度由 $1\ 800 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 减小至 $100 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,桥墩振动加速度级最高可降低 $35 \text{ dB}$ ,如图 8g 所示.在上述范围内,桥梁支座刚度的改变并不会对车体、轨道结构和梁体结构的振动响应造成显著的负面影响,如图 8a~f 所示.

### 4.2 参数匹配原则

上述主要针对单一性能参数的影响规律进行分析,事实上扣件刚度、轨道板支承刚度和桥梁支座刚度对车体和高架轨道结构的影响具有一定的协同和制约关系,需要进行匹配特性研究.

由图 8a 可知,随着扣件刚度和轨道板支承刚度的减小,车体振动响应有所放大.可见,当轨道结构采用超弹性扣件时,车体振动对轨道板支承刚度的变化十分敏感,轨道板支承刚度越小,车体振动响应越大,这种影响规律会随着扣件刚度的增加而有所减弱.当扣件刚度较大时,轨道板支承刚度的降低反而减小车体振动,因此宜匹配设计小刚度轨道板.此外,当采用高等级浮置板结构时,车体振动随着扣件刚度的增加而有规律地减小;反之,当轨道板支承刚

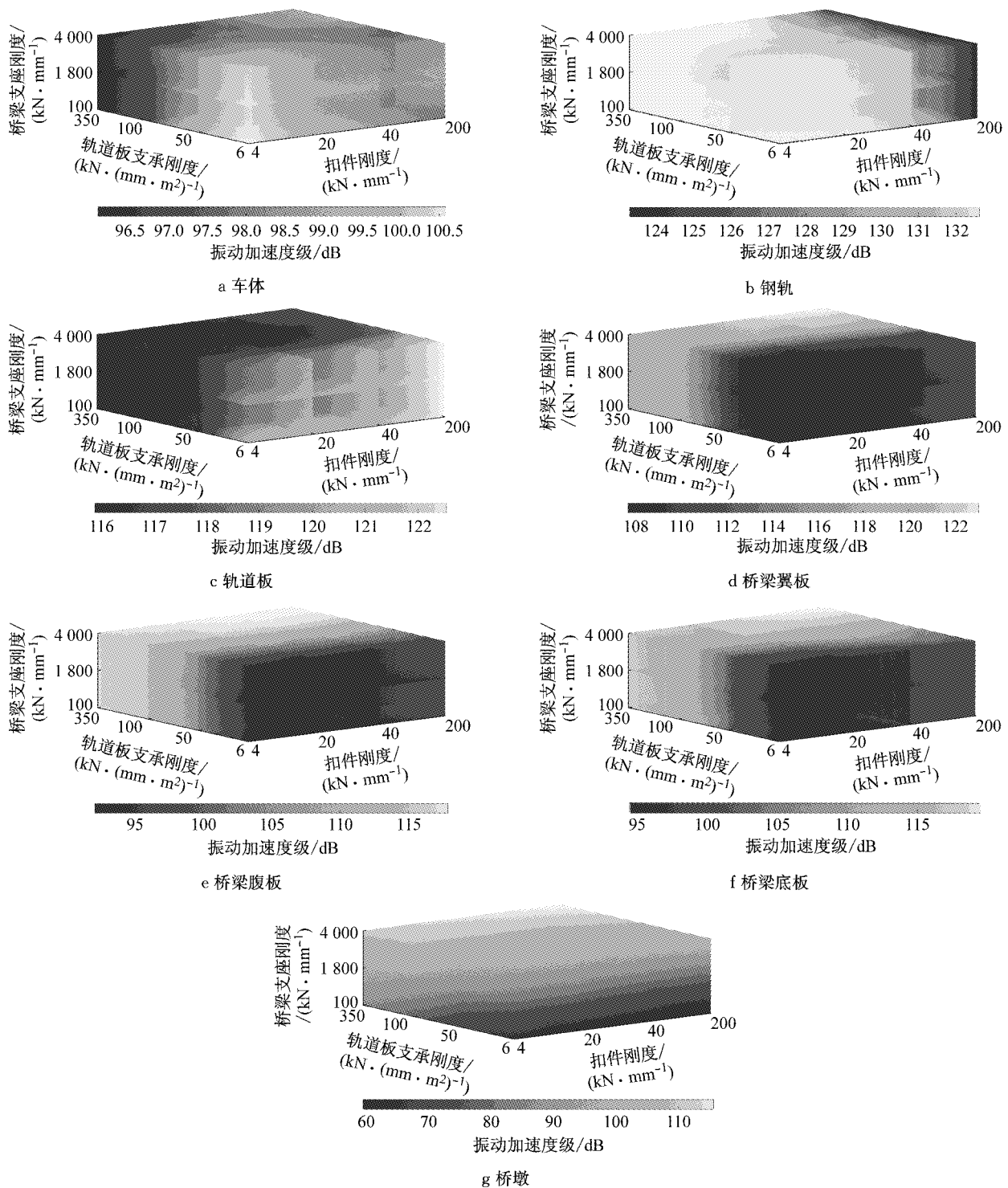


图 8 扣件刚度、轨道板支承刚度、桥梁支座刚度对车-轨-桥系统各子结构动力响应特性的影响

Fig.8 Effect of rail fastener bearing, elastic supporting bearing of rail plate, bridge bearing on dynamic properties of vehicle-railway-bridge system substructures

度较大时,车体振动随着扣件刚度的增加呈现增大趋势.桥梁支座刚度几乎不对上述规律产生影响.由此可见,扣件刚度和轨道板支承刚度具有一定的制约关系,当车体振动响应严重时,尤其宜避免小刚度扣件匹配设计小刚度轨道板支承.

由图 8b 可知,扣件刚度的改变对钢轨振动的影

响十分显著,桥梁支座刚度的改变几乎不影响钢轨的振动加速度级.当扣件刚度由 200 kN · mm<sup>-1</sup>减小到 4 kN · mm<sup>-1</sup>时,钢轨振动被放大约 9 dB.其中,当扣件刚度在 40~80 kN · mm<sup>-1</sup>范围内改变时,钢轨振动对扣件刚度的相关性特征尤其敏感,当扣件刚度小于 40 kN · mm<sup>-1</sup>时,影响趋缓;当扣件

刚度较大时,钢轨的振动加速度级随着轨道板支承刚度的减小而小幅度降低。扣件刚度和轨道板支承刚度对钢轨振动的影响规律几乎不随桥梁支座刚度的改变而发生变化。综上,尽管理论上超弹性扣件和低刚度轨道板均可满足轨道结构较高的隔振需求,但前者极易引发钢轨的振动放大现象,因此可能导致钢轨波浪形磨耗及车轮病害等。为满足系统隔振同时缓解钢轨振动问题,不宜单独采用超低弹性扣件作为主要隔振元件,宜适当增大扣件刚度,匹配设计适宜的轨道板支承刚度,使两者发挥协同作用。

由图 8c 可知,轨道板支承刚度的改变强烈影响轨道板的振动响应,扣件刚度次之,桥梁支座刚度几乎不影响轨道板的振动。轨道板的振动加速度级随着轨道板支承刚度的降低而显著增加,尤其当轨道板支承刚度在  $6\sim 50\text{ kN}\cdot(\text{mm}\cdot\text{m}^2)^{-1}$  范围内发生变化时,轨道板的振动响应十分敏感。相反,随着扣件刚度的减小,轨道板的振动可得到一定程度的改善。轨道板支承刚度和扣件刚度对轨道板振动特性的影响规律不随桥梁支座刚度的改变而发生明显变化。由此可见,从改善轨道板振动问题的角度出发,不宜单独采用超低刚度的轨道板支承结构,如浮置板结构。当轨道沿线具有较高等级的隔振需求时,可考虑匹配设计具有相对较低刚度的扣件来协同实现。

由图 8d~f 可知,桥梁的翼板、腹板和底板的振动特性同样最依赖于轨道板支承刚度,扣件刚度次之,桥梁支座刚度无显著影响。桥梁的翼板、腹板和底板的振动加速度级均随着轨道板支承刚度的降低而减小,随着扣件刚度的降低小幅度减小,两者具有协同作用。当采用低刚度道床结构作为高架轨道主要隔振措施时,同时匹配设计小刚度扣件,可在满足隔振需求的同时,进一步改善梁体结构振动响应和低频辐射噪声问题。然而,过低的扣件刚度和轨道板支承刚度,可能会引发较严重的车体、钢轨和轨道板的振动放大现象。此外,对比分析图 8d~f 可知,当轨道板支承刚度与扣件刚度之比较大时,桥梁的翼板振动加速度级大于腹板和底板;随着该比值逐渐减小,桥梁的腹板和底板的振动加速度级大幅度降低,翼板的振动改善幅度相对较小。该结论对高架轨道梁体振动、低频结构噪声的声源分析及基于源分析的分源分频减振降噪措施具有借鉴意义。

本文通过桥墩的振动响应特征表示高架轨道多层隔振系统的综合隔振效果。由图 8g 可知,桥墩结构的振动响应对桥梁支座刚度的变化最敏感,轨道

板支承刚度次之,扣件刚度的影响最小。随着桥梁支座刚度的减小,传递至桥墩结构的振动明显衰减。轨道板支承的小刚度设计也是提高系统隔振效率的有效途径之一。需要注意的是,当桥梁支座刚度较大时,降低扣件系统的刚度有利于系统隔振,传递至桥墩的振动随之减小;当桥梁支座刚度较小时,降低扣件系统的刚度无益于系统隔振,传递至桥墩的振动反而存在一定的放大。可见,在满足强度、转动或移动性能、车辆运行安全等前提条件下,采用小刚度桥梁支座是提升高架轨道综合隔振效率的有效方法之一,并且不会对轨道结构和梁体结构的振动特性产生不利影响。超弹性扣件对低刚度桥梁支座的隔振效果具有一定的制约作用。

## 5 结论

(1) 扣件刚度大幅度降低极易引发钢轨的振动放大,轨道板动力特性对轨道板支承刚度的改变最为敏感,过小的轨道板支承刚度易于引发轨道板较严重的振动放大现象。

(2) 扣件和轨道板支承刚度需进行匹配设计,才能有效改善轨道结构柔性设计引发的车体振动响应,以及传递至桥墩和基础结构的振动。

(3) 为改善桥梁的翼板、腹板和底板的振动及振动诱发的低频辐射噪声,最直接有效的方法就是合理调节轨道板支承刚度,扣件刚度和桥梁支座刚度的调节无显著效果。

(4) 相比扣件刚度和轨道板支承刚度,调节桥梁支座刚度是抑制高架轨道振动能量向桥墩及下部基础传递,同时对车体、轨道和梁体结构振动加速度无明显负面影响的有效方法。

(5) 综合考虑车体、钢轨、轨道板、桥梁的翼板、腹板、底板以及传递至桥墩和基础结构的振动响应,当采用超弹性扣件作为系统主要隔振措施时,轨道板支承刚度不宜低于  $80\text{ kN}\cdot(\text{mm}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ 。当采用柔性支承轨道板结构作为主要隔振措施时,扣件刚度不宜低于  $40\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。当采用桥梁支座作为系统主要隔振措施时,不宜匹配设计低刚度扣件系统。

## 参考文献:

- [1] 李洪鲁,冯裕钊,孙荣基,等. 城市高架轨道交通噪声预测研究进展[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(6): 7.  
LI Honglu, FENG Yuzhao, SUN Rongji, et al. Research advances of prediction of elevated rail transit noise[J]. Noise

- and Vibration Control, 2015, 35(6):7.
- [ 2 ] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives [ M ]// Encyclopedia of Environmental Health. Amsterdam: Elsevier, 2011:240-253.
- [ 3 ] TANABE M, WAKUI H, MATSUMOTO N, *et al.* Computational model of a Shinkansen train running on the railway structure and the industrial applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140:705.
- [ 4 ] 张昫青,王秀英. 地下铁道列车运行时对环境影响的研究现状[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(4):48.  
ZHANG Yunqing, WANG Xiuying. Study reality and prospect on the environment effect due to metro train[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(4):48.
- [ 5 ] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration [J]. Sound and Vibration, 2004, 272(3): 909.
- [ 6 ] YANG Y B, HUNG H H, CHANG D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(4): 263.
- [ 7 ] KRYLOV V V. Noise and vibration from high-speed trains[M]. London: Thomas Telford, 2001.
- [ 8 ] THOMPSON D J, JONES C J C, WATERS T P, *et al.* A tuned damping device for reducing noise from railway track [J]. Applied Acoustics, 2007, 68(1):43.
- [ 9 ] 肖新标, 沈火明. 移动荷载作用下的桥梁振动及其 TMD 控制 [J]. 振动与冲击, 2005, 24(2):58.  
XIAO Xinbiao, SHEN Huoming. Vibration and the TMD control of bridges under moving loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2):58.
- [10] 魏鹏勃, 夏禾, 曹艳梅, 等. 安装阻尼板的钢轨减振性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4):35.  
WEI Pengbo, XIA He, CAO Yanmei, *et al.* Experimental study on vibration reduction of rail with compound damping board[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4):35.
- [11] LUO Y, LIU Y, YIN H P. Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 69(4):107.
- [12] KAEWUNRUEN S, AIKAWA A, REMENNIKOV A M. Vibration attenuation at rail joints through under sleeper pads [J]. Procedia Engineering, 2017, 189:193.
- [13] 黄慧超. 新型橡胶隔振器浮置板轨道结构参数设计及环境振动评价[D]. 成都:西南交通大学, 2015.  
HUANG Huichao. Structure parameter design and evaluation of environmental vibration for new type floating slab track with rubber vibration isolator [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [14] 高常亮. 城市轨道桥梁更换支座对轨道结构影响分析[D]. 北京:北京交通大学, 2009.  
GAO Changliang. Effects of replacing the bearings of urban railway viaduct on the track structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [15] 刘学毅. 轨道刚度的影响分析及动力学优化[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1):1.  
LIU Xueyi. Effect analysis of track stiffness on dynamic characteristics of wheel-rail system and its dynamic optimization [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(1):1.
- [16] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学 [M]. 北京:科学出版社, 2007.  
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics [ M ]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 邱国栋. 基于轨道随机不平顺的列车振动响应研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.  
QIU Guodong. The study of the vibration of train based on random track irregularities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [18] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社, 2005.  
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic interaction of vehicles and structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [19] 曾钦娥. 高架轨道轮轨噪声预测模型及分析[D]. 南昌:华东交通大学, 2014.  
ZENG Qin'e. The prediction model and analysis of wheel-rail noise of elevated Rail [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [20] 高飞, 夏禾, 曹艳梅, 等. 城市轨道交通高架结构振动与声辐射研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4):72.  
GAO Fei, XIA He, CAO Yanmei, *et al.* Vibration and noise influences of elevated structures in urban railway [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(4):72.