

文章编号: 1005-0523(2021)04-0018-08



# 时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁 结构振动特性分析

雷晓燕, 王鹏生, 翁凌霄, 罗 锐

(华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:**为揭示高速铁路桥梁结构振动产生与传递机理,分别采用数值方法与现场实测研究时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁结构振动特性。首先,建立高架简支箱梁三维有限元动力学模型,分析列车以 300 km/h 速度通过时,高架箱梁结构振动特性及传递规律。然后,选择沪昆高铁高安—南昌区间某高架轨道,对高速列车引起的桥梁结构振动进行现场测试,并将有限元计算结果与实测结果进行对比。结果表明:有限元分析与现场实测结果在 20~400 Hz 吻合良好。桥梁结构振动的优势频率为 31.5~125 Hz,峰值频率为 31.5~63 Hz,在 16 Hz 处有一个明显的波谷;当频率大于 200 Hz 时,桥梁结构加速度振级急剧下降,可以针对 31.5~63 Hz 频率进行桥梁结构减振设计。桥梁顶板最大加速度振级为 88.59~100.48 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 40 Hz;桥梁底板最大加速度振级为 82.96~94.29 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 63 Hz,箱梁底板振动对桥梁结构振动的贡献最大。

**关键词:**高架箱梁;振动特性;现场实测;数值仿真;模型建立

中图分类号:U233;TB123

文献标志码:A

本文引用格式:雷晓燕,王鹏生,翁凌霄,等. 时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁结构振动特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 18-26.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.004

## Analysis of Vibration Characteristics of Elevated Box Girder Structure Induced by High-Speed Train at 300 km/h

Lei Xiaoyan Wang Pengsheng Weng Lingxiao Luo Kun

(Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of the Ministry of Education,  
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to reveal the mechanism of vibration generation and transmission of high-speed railway bridge structure, the vibration characteristics of elevated box girder structure induced by 300 km/h high-speed train were studied by numerical method and field measurement respectively. Firstly, a three-dimensional finite element dynamic model of the simply supported elevated box girder is established to analyze the vibration characteristics and transmission law of the elevated box girder structure when the train passes at a speed of 300 km/h. Then, an elevated track in Gaoan-Nanchang section of Shanghai-Kunming high-speed railway was selected to conduct field tests on the vibration of the bridge structure caused by high-speed trains, and the finite element calculation results were compared with the measured results. The results show that the finite element analysis is in good agreement with the field measurement results in the range of 20 Hz to 400 Hz. The dominant frequency of bridge structure vibration is 31.5~125 Hz, the peak frequency is 31.5~63 Hz, and there is an obvious trough at 16 Hz. When the frequency is greater than 200 Hz, the vibration level of the acceleration of the bridge struc-

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978264, 51868023, 52178424); 江西省自然科学基金项目(2020BAB1204054); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200630)

作者简介: 雷晓燕(1956—), 男, 教授, 博士, 研究方向为高速铁路轨道动力学。E-mail: xiaoyanlei2013@163.com。

ture drops sharply. Therefore, the vibration reduction design of the bridge structure can be carried out according to the frequency of 31.5~63 Hz. The vibration level of the maximum acceleration of the bridge roof is 88.59~100.48 dB, and the corresponding peak frequency is 31.5 Hz and 40 Hz. The maximum acceleration vibration level of the bridge floor is 82.96~94.29 dB, and the corresponding peak frequency is 31.5 Hz and 63 Hz. The vibration of the box girder floor contributes the most to the vibration of the bridge structure.

**Key words:** elevated box girder; vibration characteristics; field test; numerical simulation; building model

**Citation format:** LEI X Y, WANG P S, WENG L X, et al. Analysis of vibration characteristics of elevated box girder structure induced by high-speed train at 300 km/h[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 18-26.

随着高速铁路的持续快速发展,我国高速铁路网基本形成。在已经运营的高速铁路中,高架线路占比均超过70%。高架轨道具有占地面积小、能够避免路基引起的不均匀沉降,有利于高速列车安全平稳运行,缺点是高架桥梁的结构振动与噪声又造成了新的环境污染。桥梁结构振动及结构噪声属于低频振动,具有衰减慢,传播距离远,影响范围大,穿透能力强且危害大的特点<sup>[1-2]</sup>,对环境造成的影响和对人体造成的危害逐渐受到关注<sup>[3-4]</sup>。桥梁结构噪声的机理可归结为:列车通过时,由于轨道不平顺产生的轮轨激励通过轨枕向下传递激起箱梁振动,振动从桥面传递到整个箱梁结构,箱梁外表面的振动随即引起周围空气介质的振动并传播形成噪声<sup>[5]</sup>。由此可见,箱梁振动是高架桥梁结构辐射噪声的振源,开展高架轨道箱梁结构振动特性及传递规律研究,对于高架轨道结构设计及研发减振降噪关键技术具有重要意义。

目前,国内外对高架桥上部轨道结构振动特性的研究比较深入<sup>[6-8]</sup>,而对高架桥梁结构自身振动及其噪声辐射特性的研究尚待深入。常用的研究方法包括理论计算、模型试验和现场测试。理论方法有积分变换法、有限元法、边界元法和统计能量法等,这方面已有较多的研究成果<sup>[9-11]</sup>。Chu,翟婉明,雷晓燕等针对列车-轨道-桥梁相互作用进行了理论分析和数值模拟<sup>[12-14]</sup>。在模型试验方面,罗锟、曾少辉等<sup>[15-16]</sup>利用相似律制作相似模型,研究了桥梁弹性支座的隔振效果,并探讨了单跨箱梁振动的传递特性。在现场实测方面,Nagi等<sup>[17]</sup>对香港某箱梁高架桥进行了振动噪声现场测试,得到了箱梁结构振动和噪声时域内的规律。李小珍等<sup>[18]</sup>基于现场锤击试验研究了高铁简支箱梁的振动传递特性。理论方法具有建模灵活、求解手段多样和可重复性强的优点,

但由于在将物理模型简化为数学模型的过程中存在较多假设,所以计算结果与现场实际情况仍然存在一定的差异。模型试验方法具有真实、可靠的优点,但同时也存在成本大、不易操作等缺点。现场测试受到环境、人员安全、费用等各种条件的制约,有一定的局限性。因此,在已有研究的基础上,利用有限元和现场实测相结合的方法研究高速列车作用下高架轨道桥梁结构振动特性及传递规律,为高架轨道箱梁结构减振降噪提供理论基础和技术指导,具有科学意义和工程应用价值。

## 1 高架箱梁数值仿真模型

### 1.1 有限元动力学分析理论

利用有限元法进行桥梁结构的振动响应计算,可以得到移动荷载作用下结构随时间变化的节点位移、速度和加速度。高架轨道桥梁结构动力学方程为

$$M\ddot{a} + C\dot{a} + Ka = Q \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $C$ 和 $K$ 分别为高架轨道桥梁结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{a}$ 、 $\dot{a}$ 和 $a$ 分别为结构振动的加速度、速度和位移向量; $Q$ 为移动荷载向量。高架轨道桥梁结构动力学方程采用Newmark法求解<sup>[19]</sup>。

### 1.2 有限元计算模型与参数

以沪昆客运专线高架轨道箱梁结构为工程背景,桥梁为简支结构,桥长 $L=32$  m,梁宽 $D=12$  m,梁高 $H=3.05$  m,上部结构为双线CRTS-II型板式无砟轨道,从上到下依次为钢轨、扣件、轨道板、CA砂浆层、底座板。在ANSYS中建立轨道箱梁结构三维有限元模型如图1(a)所示。模型包括钢轨、扣件、轨道板、CA砂浆层、混凝土底座和箱梁梁体,如图1(b)所示。

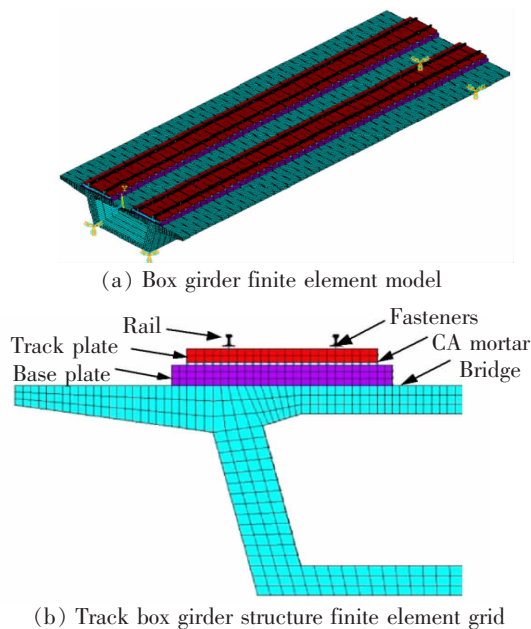


图1 高架轨道箱梁有限元模型

Fig.1 Finite element model of elevated track box girder

箱梁、混凝土底座和轨道板采用实体单元模拟,钢轨选用梁单元进行模拟,扣件、CA砂浆层以及桥梁支座均选用弹簧阻尼单元进行模拟,桥墩简化为弹性支座,计算参数分别见表1和表2。

表1 轨道与桥梁结构参数

Tab.1 Track and bridge structural parameters

| Parts       | Density/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | Elastic modulus /GPa | Poisson ratio |
|-------------|------------------------------------|----------------------|---------------|
| Rail        | 7 800                              | 210                  | 0.3           |
| Track plate | 2 500                              | 36                   | 0.2           |
| Box beam    | 2 500                              | 36.2                 | 0.2           |

表2 连接部件计算参数

Tab.2 Calculation parameters of connecting parts

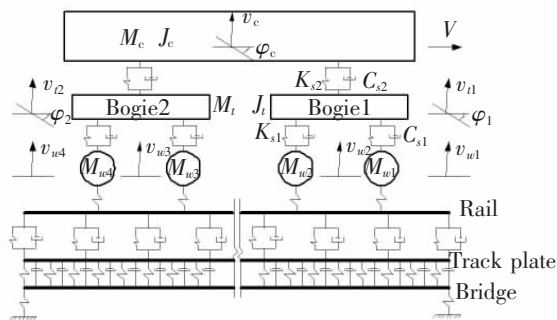
| Parts          | Stiffness/( $\text{MN}/\text{m}$ ) | Damping/( $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ ) |
|----------------|------------------------------------|---|
| Fasteners      | 60                                 | 47  |
| CA mortar      | 900                                | 83  |
| Bridge bearing | 3 380                              | 100   |

### 1.3 轮轨激励的求解与加载

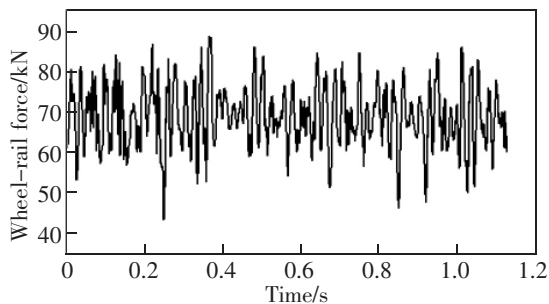
沪昆客运专线运行的高速列车主要为CRH380A, CRH380B, CRH380C, CRH380D等,8节或16节车辆编组,列车速度位于300~310 km/h之间。基于Matlab软件建立车-轨-桥有限元模型,考虑一节CRH380A动车,列车速度为300 km/h,并选用德国高速轨道不平顺低干扰谱作为轨道随机不平顺激励源<sup>[20-21]</sup>,仿真分析列车通过桥梁时诱发高架箱梁

结构振动传递规律,并提取轮轨作用力,如图2所示。

图2(a)中, $v_c, \varphi_c, v_{n1}, \varphi_1, v_{n2}, \varphi_2$ 分别为车体和前、后转向架质心竖向位移和绕水平轴转角; $M_c, J_c, M_i, J_i$ 分别为车体和构架的质量和点头惯量; $K_{s1}, K_{s2}, C_{s1}, C_{s2}$ 分别为车辆一系弹簧和二系弹簧的刚度和阻尼; $M_{wi}, v_{wi}(i=1, 2, 3, 4)$ 分别为车轮质量和竖向位移。



(a) Car-rail-bridge finite element model



(b) Wheel-rail force time history curve

图2 轮轨力计算模型及轮轨力

Fig.2 Wheel-rail force calculation model and time history curve of wheel-rail force

将计算得到的轮轨力看作为随时间变化的移动荷载,在ANSYS软件中利用APDL语言编写DO循环,采用节点加载的方式,将轮轨力时程加载到高架桥梁结构上,实现列车过桥的模拟。

## 2 高架箱梁数值仿真结果

利用上述建立的有限元模型,仿真分析桥梁各个截面以及各板件间的振动响应分布特性。时速300 km/h,8节编组的高速动车通过桥梁时间为3 s。沿列车前进方向分别选取支座截面、1/4截面、跨中截面和3/4截面作为分析截面,如图3所示,其中每个截面的观测点分别为钢轨(C1)、轨道板(C2)、底座板(C3)、翼板(C4)、腹板(C5)、底板(C6)和顶板(C7),计算得到的各观测点加速度时域曲线如图4

所示。对时域数据进行傅里叶变换,得到各观测点 1/3 倍频程振动加速度级谱,如图 5 所示。

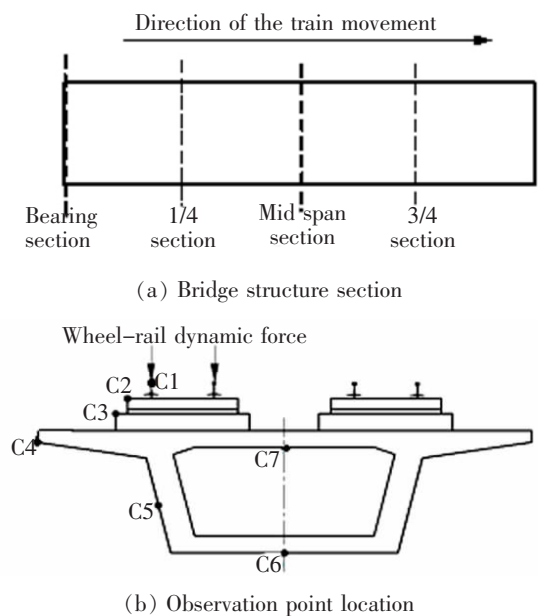
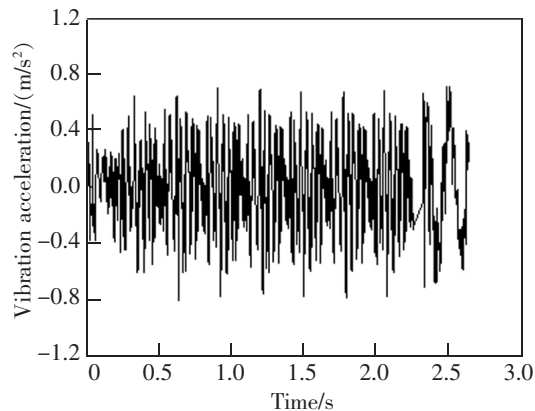
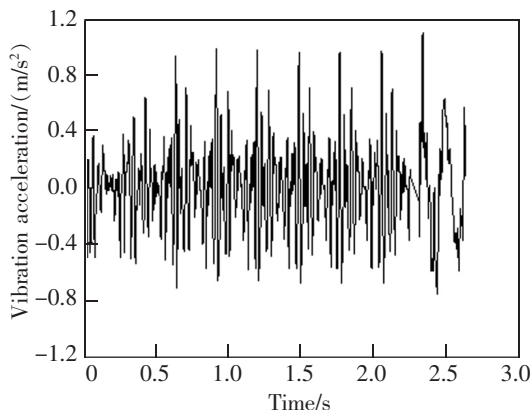


图 3 观测截面及观测点位置

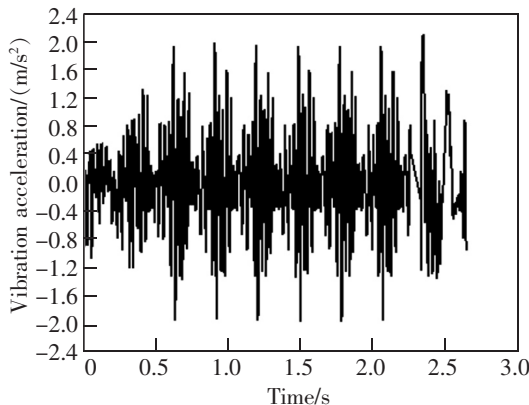
Fig.3 Observation section and observation point position



(a) C4 measuring point



(c) C6 measuring point

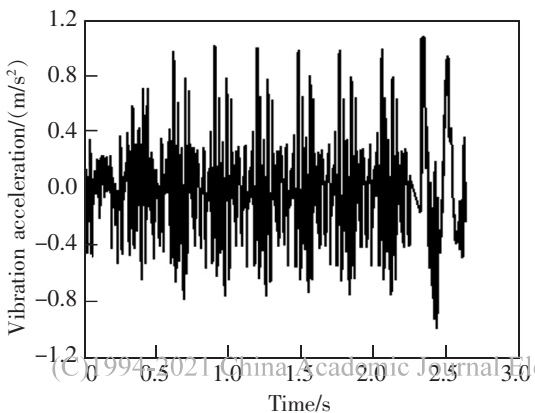


(d) C7 measuring point

图 4 跨中截面梁体各板件振动加速度时程曲线

Fig.4 Time history curve of vibration acceleration of various plates in mid-span beam body

从图 5 可以看出:梁体振动的优势频段在 31.5~80 Hz 之间,最大振动加速度级在箱梁顶板位置。振动在梁体各板件横向传递过程中,顶板加速度响应最大,底板次之,腹板和翼板相对较小。表明振动由顶板向翼板的传递过程中,加速度响应逐渐减小。而腹板和翼板的响应接近,体现了箱梁结构振动由接近振源位置向远离振源传递过程中的衰减。



(b) C5 measuring point

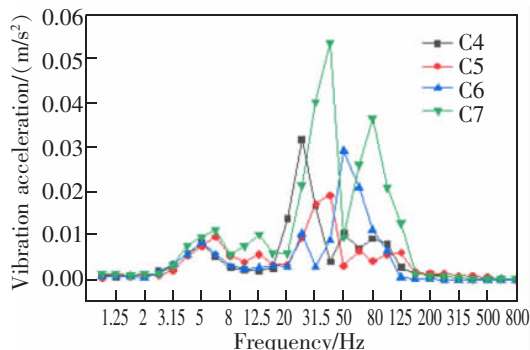


图 5 跨中截面梁体各板件振动加速度频域曲线

Fig.5 Frequency domain curve of vibration acceleration of various plates in mid-span beam body

### 3 高架箱梁振动特性现场测试

选择沪昆高铁高安-南昌区间某高架轨道,对高速列车引起的桥梁结构振动进行现场测试。测试位置为空旷地带的桥梁,桥下平坦,桥底面距离地面 2.7 m, 轨道结构为双线 CRTS-II 型板式无砟轨道,桥梁为单箱单室筒支梁,跨度为 32 m。为了实测高速列车通过时引起的桥梁结构振动,在桥梁上选取 4 个横截面:桥梁支座截面,1/4,1/2 和 3/4 处截面。分别在各截面的翼板(Z1 和 Z5)、顶板(Z6)、腹板(Z2 和 Z4)和底板(Z3)处设置 393B04 垂向振动加速度传感器,如图 6 所示。采样频率为 2 000 Hz,列车通过速度为 300~310 km/h。

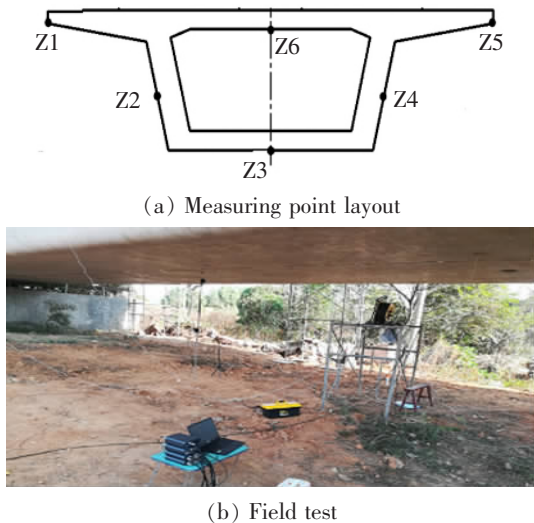
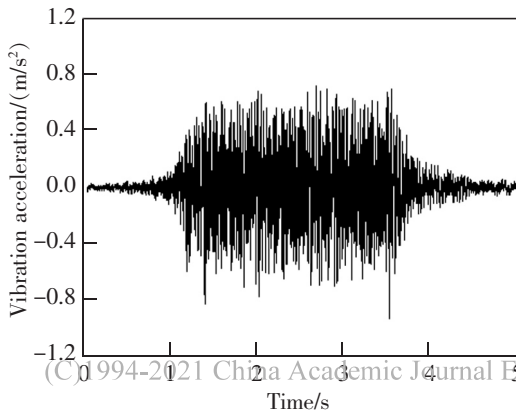


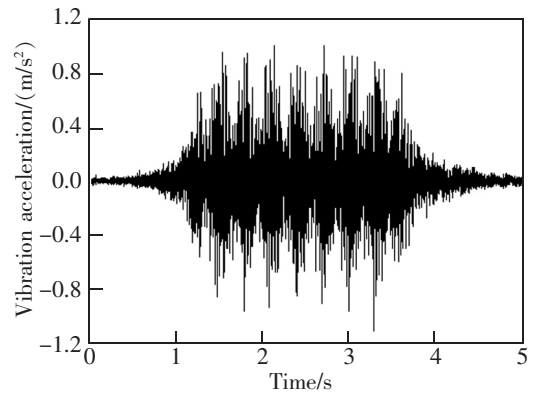
图 6 现场测试振动测点布置

Fig.6 Site test vibration measuring point layout

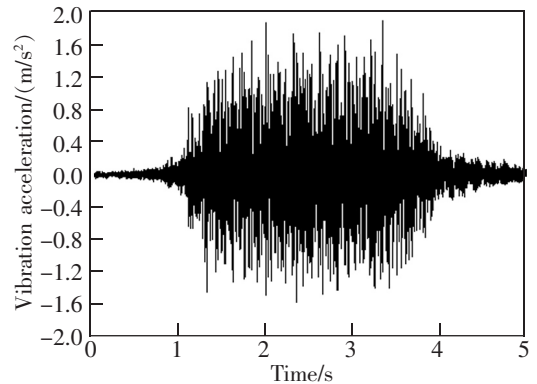
现场试验共采集到 120 组数据,选取一组典型数据提取各测点的振动加速度时程信号,如图 7 所示,可以看出顶板、底板、腹板和翼板的振动响应依次减小,即顶板振动>底板振动>腹板振动>两翼振动。



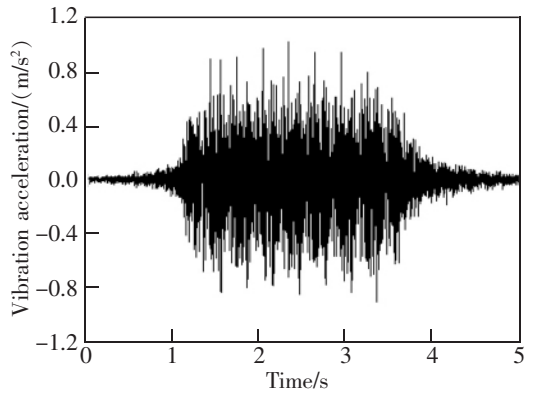
(a) Z1 measuring point



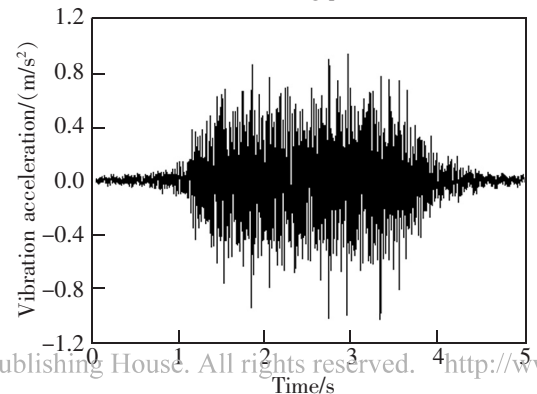
(b) Z2 measuring point



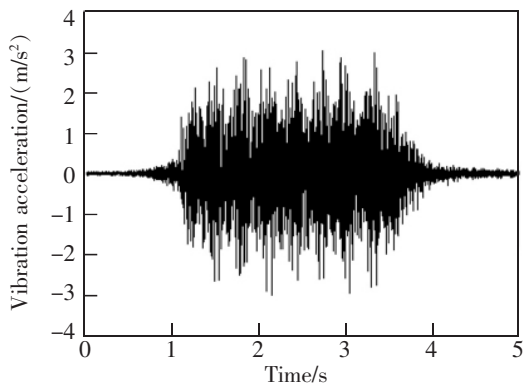
(c) Z3 measuring point



(d) Z4 measuring point



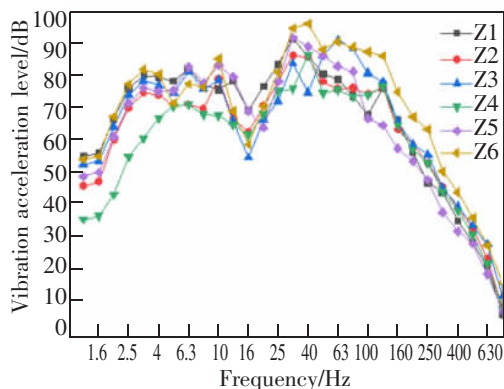
(e) Z5 measuring point



(f) Z6 measuring point

图 7 跨中截面实测振动加速度时程曲线

Fig.7 Time history curve of measured vibration acceleration in mid-span section



(b) 1/3 octave amplitude curve

图 8 跨中截面各测点 1/3 倍频程振动加速度曲线  
Fig.8 1/3 octave vibration acceleration curve of each measuring point in the mid-span section

为了分析列车通过时,箱梁结构垂向振动在频域上的分布特性,对时域数据进行 1/3 倍频程分析,得到相应的振动加速度频谱曲线。然后取同向 8 节编组列车的 20 组数据求平均,得到跨中截面各测点 1/3 倍频程振动加速度曲线,如图 8 所示。

图 8 表明,在列车荷载作用下,顶板中心振动频率主要集中在 25~100 Hz 范围内,振动加速度大小为 0.020~0.060 m/s<sup>2</sup>;翼板的振动频率主要分布在 25~80 Hz 范围内,振动水平为 0.010~0.035 m/s<sup>2</sup>;腹板中心的振动频率主要分布在 30~60 Hz 范围内,振动水平为 0.010~0.025 m/s<sup>2</sup>;底板中心的振动频率主要分布在 40~100 Hz 范围内,振动水平为 0.005~0.035 m/s<sup>2</sup>。与时域分析一样,在 25~100 Hz 范围内,顶板、底板、腹板和翼板的振动响应依次减小。

桥梁结构振动的优势频率为 31.5~125 Hz,峰值频率为 31.5~63 Hz,在 16 Hz 处有一个明显的波谷;当频率大于 200 Hz 时,桥梁结构加速度振级急剧下降。可以针对 31.5~63 Hz 频率进行桥梁结构减

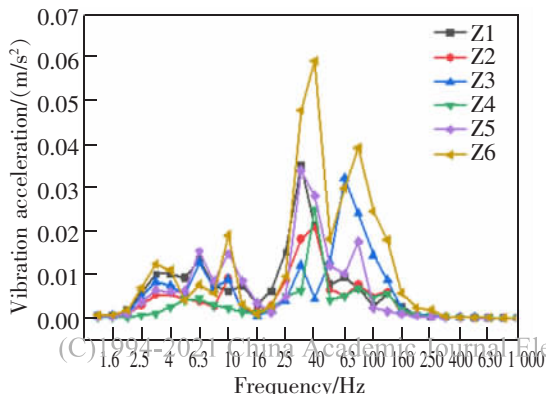
振设计。桥梁顶板最大加速度振级为 88.59~100.48 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 40 Hz;桥梁底板最大加速度振级为 82.96~94.29 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 63 Hz,箱梁底板振动对桥梁结构振动的贡献最大。

#### 4 数值仿真与实测结果对比分析

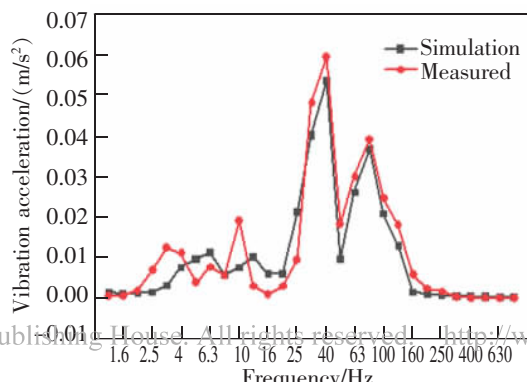
##### 4.1 仿真与测试结果对比分析

选取桥梁跨中截面顶板中心、翼缘板边缘、腹板中心以及箱梁内梁底测点的实测值与有限元计算值进行对比,仿真计算参数与京沪高铁桥梁参数一致,对比结果如图 9 所示。

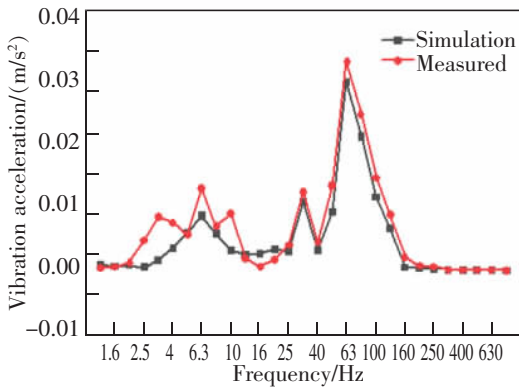
由图 9 可知,在 16~200 Hz 范围内,仿真计算结果与现场实测值吻合良好,实测值平均小于计算值仅为 0.001~0.015 m/s<sup>2</sup>,究其原因,首先是由于忽略了轮面的不圆顺对轮轨力的影响,导致轮轨作用荷载较实际轮轨垂向力要小;此外,由于轮轨横向力的存在导致箱梁发生横向扭转,进而影响垂向振动。但计算模型中的激励荷载忽略了轮轨横向力的影



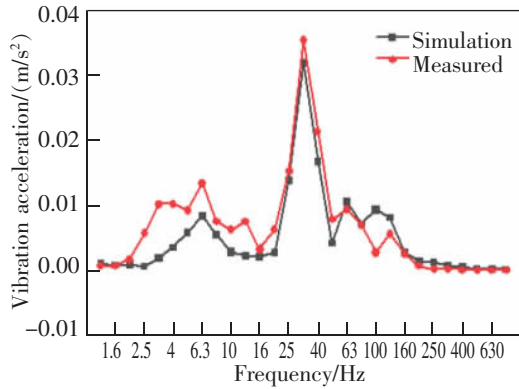
(a) Spectrum curve



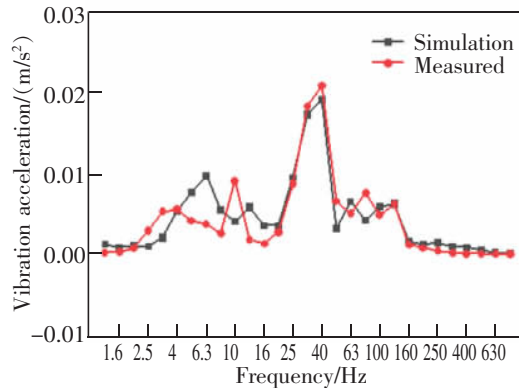
(a) Roof measuring point



(b) Bottom measuring point



(c) Wing plate measuring point



(d) Web measurement points

图9 桥梁各测点振动加速度对比分析

Fig.9 Comparative analysis of vibration acceleration at each measuring point of bridge

响。然而,数值分析结果与试验结果在 10~400 Hz 内变化趋势基本一致,最大误差为 0.015 m/s<sup>2</sup>,说明计算模型满足精度要求。

### 4.2 不同截面振动响应仿真分析

由于箱梁顶板振动响应最为明显,以箱梁顶板(C7)为观测对象,考察列车从上桥到下桥的全过程。从提取到的不同截面位置箱梁顶板(C7)观测点的位移曲线中,可以发现跨中截面位移最大,1/4 截

面次之,梁端截面位移最小,如图 10 所示。而且 3 个截面顶板观测点的位移曲线也近乎一致,位移响应的最大值为 0.62 mm。

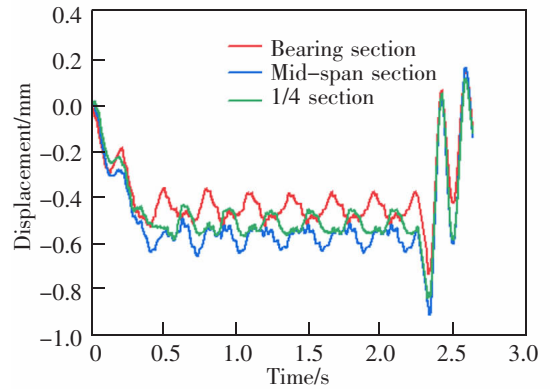
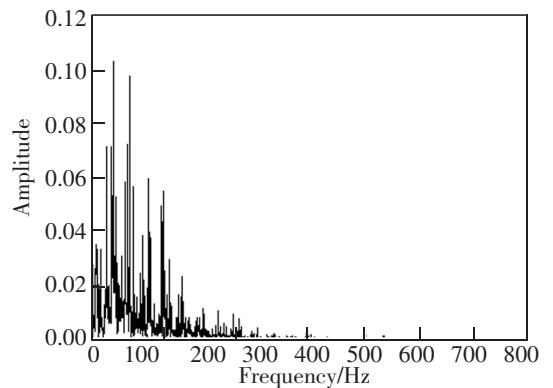


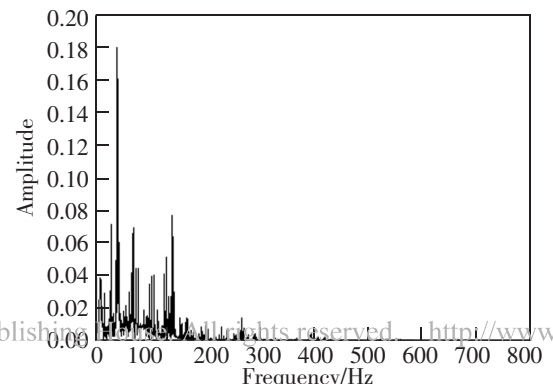
图 10 不同桥梁截面箱梁顶板位移时程曲线

Fig.10 Time history curve of displacement of box girder roof of different bridge sections

图 11 为桥梁 3 个截面箱梁顶板观测点的振动加速度频谱图。从图 11 可见,时速 300 km/h 的高速列车引起桥梁结构振动频率主要集中在 0~200 Hz 之间,其中梁端截面的峰值频率为 32.56 Hz,1/4 截面的峰值频率为 37.36 Hz,跨中截面的峰值频率为 19.23 Hz。



(a) Bearing section



(b) 1/4 section

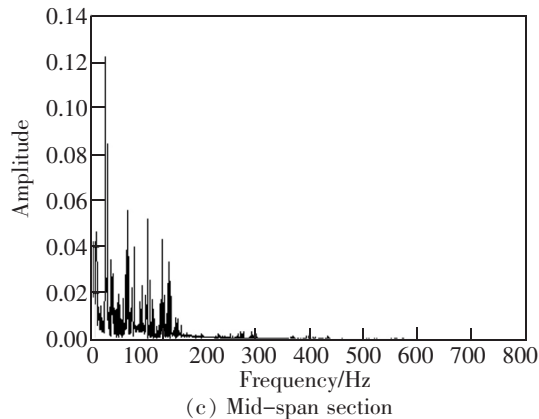


图 11 不同桥梁截面箱梁顶板振动加速度频谱图

Fig.11 Spectrum of vibration acceleration of box girder roof with different bridge sections

## 5 结论

通过联合运用数值方法与现场实测,分析了时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁结构振动特性及传递规律,得到以下结论:

1) 桥梁结构振动的优势频率为 31.5~125 Hz,峰值频率为 31.5~63 Hz,在 16 Hz 处有一个明显的波谷;当频率大于 200 Hz 时,桥梁结构加速度振级急剧下降,可以针对 31.5~63 Hz 频率进行桥梁结构减振设计。

2) 桥梁顶板最大加速度振级为 88.59~100.48 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 40Hz;桥梁底板最大加速度振级为 82.96~94.29 dB,对应的峰值频率为 31.5 Hz 和 63 Hz,箱梁底板振动对桥梁结构振动的贡献最大。

3) 时速 300 km/h 高速列车引起箱梁结构振动的规律分别为:顶板垂向振动水平最大,底板次之,翼板和腹板较小,在进行桥梁结构振动控制时应重点关注底板振动,其次是翼板和腹板。

为研究时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁结构振动特性,在数值分析时,首先运用 Matlab 软件建立车-轨-桥耦合系统动力学模型,提取得到的轮轨力时程信息,然后加载到 ANSYS 三维轨道-桥梁系统动力有限元模型中,得到轨道和桥梁结构的振动响应。分析结果与实测数据吻合良好证明了该方法的有效性。

## 参考文献:

[1] 雷晓燕,张新亚,罗钊. 高架轨道桥梁结构振动与噪声预

测方法及控制研究进展[J]. 铁道学报,2020,42(12):150-161.

LEI X Y,ZHANG X Y,LUO K. Research progress on prediction methods and control of vibration and noise of elevated track bridge structures[J]. Journal of Railway,2020,42(12):150-161.

[2] 刘兴龙,尹学军,孔祥斐,等. 控制城市轨道交通高架桥梁结构噪声的试验研究[J]. 噪声与振动控制,2019,39(2):140-144.

LIU X L,YIN X J,KONG X F,et al. Experimental study on structural-borne noise control for urban metro viaduct[J]. Noise and vibration control,2019,39(2):140-144.

[3] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: Environmental and occupational perspectives[J]. Encyclopedia of Environmental Health,2011:240-253.

[4] WAYE K P,RYLANDER R. The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise[J]. Journal of Sound and Vibration,2001,240(3):483-497.

[5] 张小安. 轨道交通高架箱梁桥结构声辐射的发声机理与特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.

ZHANG X A. Study on phonate and characteristics of acoustic radiation of elevated railway box-girder bridge[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2019.

[6] 李泽熙,娄宇,吕佐超,等. 高架地铁的轨道结构振动测试及对高架桥的影响分析[J]. 特种结构,2019,36(3):116-120.

LI Z X,LOU Y,LU Z C,et al. Vibration test of elevated subway track structure and analysis of its influence on viaduct[J]. The Special Structure,2019,36(3):116-120.

[7] 曾钦娥,毛顺茂,雷晓燕. 高架轨道结构振动特性分析[J]. 华东交通大学学报,2013,30(6):1-5.

ZENG Q E,MAO S M,LEI X Y. Analysis on vibration characteristics of elevated track structure[J]. Journal of East China Jiaotong University,2013,30(6):1-5.

[8] 房建,雷晓燕,练松良. 客运专线高架轨道结构振动特性实测研究[J]. 噪声与振动控制,2019,39(5):142-146.

FANG J,LEI X Y,LIAN S L. Experimental study on the vibration characteristics of elevated track structure for passenger dedicated line[J]. Noise and Vibration Control,2019,39(5):142-146.

[9] 石广田,杨新文,张小安,等. 高铁板式轨道区段箱梁结构噪声辐射分析[J]. 噪声与振动控制,2015,35(1):160-164.

SHI G T,YANG X W,ZHANG X A,et al. Noise radiation analysis of box-girder structure in slab track section of high-speed railways[J]. Noise and Vibration Control,2015,35(1):160-164.



- [10] 张迅,张健强,李小珍. 梁-板混合单元分析桥梁车致振动与噪声[J]. 噪声与振动控制,2015,35(1):89-92.  
ZHANG X,ZHANG J Q,LI X Z. Analysis of train-induced bridge vibration and noise based on beam-plate hybrid elements[J]. Noise and Vibration Control,2015,35(1):89-92.
- [11] ALTEN K,FLESCHE R. Finite element simulation prior to reconstruction of a steel railway bridge to reduce structure borne noise[J]. Engineering Structures,2012,(35):83-88.
- [12] CHV K H,GARG V K,BHATTI M H. Impact in truss bridge due to freight trains[J]. Journal of Engineering Mechanics,1984,111(2):159-174.
- [13] 翟婉明,蔡成标,王开云. 高速列车—轨道—桥梁动态相互作用原理及模型[J]. 土木工程学报,2005(11):132-137.  
ZHAI W M,CAI C B,WANG K Y. Mechanism and model of high-speed train-track-bridge dynamic interaction[J]. Chinese Journal of Civil Engineering,2005(11):132-137.
- [14] 雷晓燕,汪振国,罗锟. 城市轨道交通简支箱梁桥梁结构振动特性分析[J]. 铁道工程学报,2017,34(9):96-102.  
LEI X Y,WANG Z G,LUO K. Analysis of structural vibration characteristics of simply supported box girder bridge in urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society,2017,34(9):96-102.
- [15] 罗锟,汪振国,雷晓燕,等. 基于相似模型试验的简支箱梁振动传递特性研究[J]. 铁道学报,2019,41(5):142-148.  
LUO K,WANG Z G,LEI X Y. Study on vibration transmission characteristics of simply-supported box-girders based on similarity model test[J]. Journal of railway,2019,41(5):142-148.
- [16] 曾少辉. 轨道交通高架箱梁振动特性模型试验研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.  
ZENG S H. Experimental study on vibration characteristics of viaduct box-girder for rail transit[D]. Nan Chang: East China Jiaotong University,2017.
- [17] NGAI K W,NG C F. Structure-borne noise and vibration of concrete box structure and rail viaduct[J]. Journal of Sound and Vibration,2002,255(2):281-297.
- [18] 李小珍,宋立忠,张迅. 基于现场锤击试验的高铁简支箱梁振动传递特性研究[J]. 土木工程学报,2016,49(5):120-128.  
LI X Z,SONG L Z,ZHANG X. Study on vibration transmission characteristics of high-speed railway simply-supported box-girders based on in-situ hammer excitation test [J]. Chinese Journal of Civil Engineering,2016,49(5):120-128.
- [19] 雷晓燕. 有限元法[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.  
LEI X Y. Finite Element Method[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2000.
- [20] 辛莉峰,李小珍,肖林,等. 轨道不平顺随机性对高速铁路桥梁动力响应的影响[J]. 铁道学报,2021,43(4):150-157.  
XIN L F,LI X Z,XIAO L,et al. Effect of stochastic track irregularity on dynamic response of high-speed railway bridges[J]. Journal of Railway,2021,43(4):150-157.
- [21] 郑晓龙,徐昕宇,陈列,等. 中德高速铁路轨道谱在车桥耦合中的应用对比[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(5):1090-1097.  
ZHENG X L,XU X Y,LI Z,et al. Comparison of application of track spectrum of high speed railway between China and Germany in vehicle bridge coupling[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(5):1090-1097.

(责任编辑:龚凯 刘棉玲)