

文章编号: 1005-0523(2021)02-0001-07

基于 FE-SEA 混合法列车交会桥梁振动噪声分析

罗文俊¹, 曹浩¹, 张子正¹, 江学辉², 唐康文³

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西外语外贸职业学院, 江西 南昌 330000;
3. 中山市东升镇住房和城乡建设局, 广东 中山 528414)

摘要: 基于有限元-统计能量(FE-SEA)混合法, 建立钢-混结合梁桥模型, 在列车运行速度为 200 km/h、列车交会条件下, 预测桥梁各板块的振动响应及结构噪声。结果表明, 当列车交会时: 各板块中点处的振动加速度级均有所增大, 优势频段为 40~120 Hz, 峰值频率在 65 Hz; 在全频段内, 各板块声压级均增大, 单向行驶和列车交会两种状态下的各板块声压级峰值频率在 500 Hz, 腹板和下翼缘的声压级变化规律较为相似; 桥梁各板块能量级在全频段内均增大, 腹板能量级最大, 在频率为 100 Hz 时, 腹板和下翼缘的振动能量级出现拐点, 该频率对能量级的影响最大。

关键词: FE-SEA 混合法; 列车交会; 结构噪声; 钢-混结合梁桥

中图分类号: U448.21+5 ; TB534

文献标志码: A

本文引用格式: 罗文俊, 曹浩, 张子正, 等. 基于 FE-SEA 混合法列车交会桥梁振动噪声分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2): 1-7.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20210419.001

Analysis of Bridge Vibration and Structure Noise Based on FE-SEA Hybrid Method for Train Rendezvous

Luo Wenjun¹, Cao Hao¹, Zhang Zizheng¹, Jiang Xuehui², Tang Kangwen³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi College of Foreign Studies, Nanchang 330000, China; 3. Dongsheng Township Housing and Urban-Rural Development Bureau of Zhongshan City, Zhongshan 528414, China)

Abstract: Based on the finite element-statistical energy (FE-SEA) hybrid method, this paper establishes a steel-concrete composite beam bridge model, and predicts the vibration response and structural noise of each plate of the bridge under the conditions of train running speed of 200 km/h and trains crossing. The results show that when trains cross: The vibration acceleration level at the midpoint of each plate increases, the dominant frequency band is 40~120 Hz, and the peak frequency is 65 Hz. In the whole frequency band, the sound pressure level of each plate increases; the peak frequency of the sound pressure level of each plate in the two states of one-way driving and train crossing is at 500 Hz, and the pattern of changes for sound pressure level of the web and the lower flange are similar. The energy level of each plate of the bridge increases in the whole frequency band, and the energy level of the web is the largest. When the frequency is 100 Hz, the vibration energy level of the web and the lower flange has an inflection point, indicating that this frequency has the greatest impact on the energy level.

Key words: FE-SEA hybrid method; train intersection; structural noise; steel-concrete composite beam bridge

收稿日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768022, 51978265)

作者简介: 罗文俊(1979—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为铁路环境振动与噪声控制及轮轨动力学研究。E-mail: lwj06051979@163.com。

Citation format: Luo W J, Cao H, Zhang Z Z, et al. Analysis of bridge vibration and structure noise based on FE-SEA hybrid method for train rendezvous[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 1-7.

随着城市轨道交通的快速发展,连续板梁钢-混结合梁已被广泛应用于桥梁结构中,但基于这种结构的声辐射研究还不够完善。桥梁结构辐射噪声属于低频噪声,会对人体机能造成不利影响^[1-2]。韩江龙等^[3]分析了列车运行时连续梁和多跨简支梁的结构噪声特性,发现邻跨能够影响远场点噪声,连续梁结构无法有效降噪。罗文俊等^[4]基于混合法预测了U型梁的振动特性和结构噪声,发现翼缘板的振动在低频区最大,底板的振动在高频区最大。苏庆田等^[5]采用单元和荷载增量步技术对钢混结合梁进行有限元模拟。张迅等^[6]结合数值仿真与锤击试验,基于箱型梁模型分析了U肋加劲板的振动特性和声辐射性能,结果表明加劲板的振动噪声更为明显,频谱范围较广。高飞^[7]采用有限元法计算列车运行过程中桥梁的振动响应,研究表明桥梁的声压级频谱特性与振动频谱分布规律基本相同,峰值频率为160 Hz。张迅等^[8]基于现场试验,采用混合法分析了列车运行产生的振动在箱梁各板件中的传播规律和声压贡献量,发现桥梁振动与噪声的主要频段在40~63 Hz。李奇^[9]以某地区轨道交通U型梁为研究对象,在列车移动荷载作用下,提出了适用于低频范围内的混凝土桥梁噪声预测方法。张迅等^[10]基于平截面假定和声学边界元法分析了桥梁的结构噪声,结果表明振动和噪声的传播具有某种指向性。张鹤等^[11]通过建立瞬态噪声有限元-边界元模型,全面评估车桥噪声的声压水平,获得了较理想的精度。

可以看出,上述成果中针对钢-混结合梁的振动和结构噪声研究较少。由于轨道存在着不平顺,列车单双向行驶时施加在桥面上的荷载也存在着变化,非常有必要针对钢-混结合梁结构桥进行振动和结构噪声分析。

1 FE-SEA 混合法原理

Langley 等^[12-13]的研究为 FE-SEA 混合法理论作出了重要贡献。基于波动理论的混合法,将边界分为随机性边界和确定性边界。

FE-SEA 混合法方程可以写成^[14-15]

$$\omega \eta_{ij} = \left(\frac{2}{\pi n_j} \right) \sum_{r,s} IM \{ \mathbf{D}_{d,rs} \} (\mathbf{D}_{\text{tot}}^{-1} IM \{ \mathbf{D}_{\text{dir}}^j \} \mathbf{D}_t^{-1*T})_{rs} \quad (1)$$

$$\omega \eta_{jk} n_j = \frac{2}{\pi} \sum_{r,s} IM \{ \mathbf{D}_{\text{dir},rs}^j \} (\mathbf{D}_t^{-1} IM \{ \mathbf{D}_{\text{dir}}^j \} \mathbf{D}_t^{-1*T})_{rs} \quad (2)$$

$$P_{\text{in},t}^{\text{ext}} = \frac{\omega}{2} \sum_{rs} IM \{ \mathbf{D}_{\text{dir},rs}^j \} (\mathbf{D}_t^{-1} \mathbf{S}_{\text{ff}} \mathbf{D}_t^{-1*T})_{rs} \quad (3)$$

$$\omega (\eta_j + \eta_{dj}) E_j + \sum_{k=1}^N \omega \eta_{jk} n_j \left(\frac{E_j}{n_j} - \frac{E_k}{n_k} \right) = P_j + P_{\text{in},t}^{\text{ext}} \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中: ω 为角频率; $\mathbf{D}_{\text{dir}}^j$ 为SEA子系统j的直接场动刚度矩阵; \mathbf{D}_t 为FE子系统的总动刚度矩阵; η_j 为子系统j的阻尼损耗因子; \mathbf{D}_d 为连接边界处FE子系统自身的动刚度矩阵; η_{dj} 为子系统d和j之间的耦合损耗因子; η_{jk} 为子系统j和k之间的耦合损耗因子; E_j, E_k 分别为SEA子系统j和k的统计能量响应; P_j 为子系统j的输入功率; $P_{\text{in},t}^{\text{ext}}$ 为施加到确定性系统的力而产生的功率; n_j 为子系统j的模态密度; \mathbf{S}_{ff} 为施加到确定性系统力的互谱矩阵; r, s 为SEA子系统j的确定性边界处的自由度。

将式(1)~式(3)代入式(4),可以求解得到随机性子系统的振动能量。

当单元网格划分较细时,有限元法在低频部分计算精度较高,当模态数较多时,统计能量法适用于高频计算^[16]。铁路环境振动影响与噪声的分析主要包括机车车辆、轨道系统和桥梁结构三大子系统,各子系统的振动和噪声影响频率范围不尽相同。采用FE-SEA混合法,结合有限元和统计能量的各自优势,提高了有限元法在高频部分的计算效率,也拓宽了统计能量法在低频部分的应用频率。

2 桥梁结构声辐射原理

将钢-混结合梁视为多个子系统,每个子系统可看作长为**b**,宽为**a**的矩形板。对于各子系统,声压辐射功率为

$$W_i = \rho_a c_a \sigma_i S_i \bar{v}_i^2 \quad (5)$$

式中: ρ_a 为空间气体的密度; c_a 为声音在空气中的传播速度; σ_i 为辐射效率; S_i 为辐射表面积; \bar{v}_i^2 为均方速度。

3 模型的建立

3.1 列车荷载的模拟

准确模拟列车荷载是研究列车交会桥梁振

动和结构噪声分析的首要前提^[17]。选取 CRH2 动车组,车速为 200 km/h。基于多体动力学仿真分析软件 SIMPACK,建立车辆-轨道耦合模型,添加轨道高低不平顺谱,计算得到竖向时域轮轨力,经过傅里叶变换得到内 1/3 倍频程频域轮轨力。

3.2 桥梁计算模型

研究的频率为 20~1 600 Hz,桥梁腹板、翼缘、桥面板分别在 20,50,200 Hz 频率处的模态数大于 5。在 20~200 Hz 频率内,桥面板采用 FE 子系统,腹板、翼缘采用 SEA 子系统;在 200~1 600 Hz 频率内,桥面板、腹板、翼缘均采用 SEA 子系统。

通过 VA one 软件建立连续板梁钢-混结合梁双线桥模型。桥面板采用 C50 混凝土,厚度为 0.20~0.48 m。纵梁为 2 根相距 6 m 的 H 型钢梁,高度为 2.5 m,宽度 1.2 m,腹板的厚度 24 mm,翼缘的厚度 50 mm。采用板壳类型单元分频段建立模型,在 20~200 Hz 频率内建立 FE-SEA 混合模型,在 200~1 600 Hz 频率内建立 SEA 模型。

4 振动响应分析和噪声预测

4.1 振动响应分析

在列车单向行驶状态下,提取各板块中心处的振动加速度,转化得到 1/3 倍频程加速度振级,如图 1 所示。

由图 1 可知,列车单向行驶时,各板块的加速度振级变化规律比较相似,峰值频率基本一致,在 65 Hz 左右;加速度振级的大小规律为:腹板>下翼缘>桥面板,该桥梁的主要减振板块为腹板。

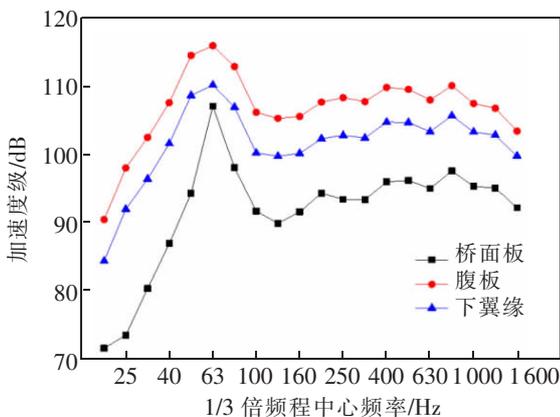
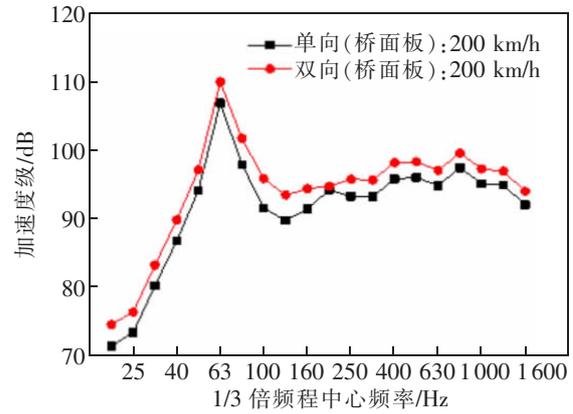


图 1 单向行驶各板块中点竖向加速度振级

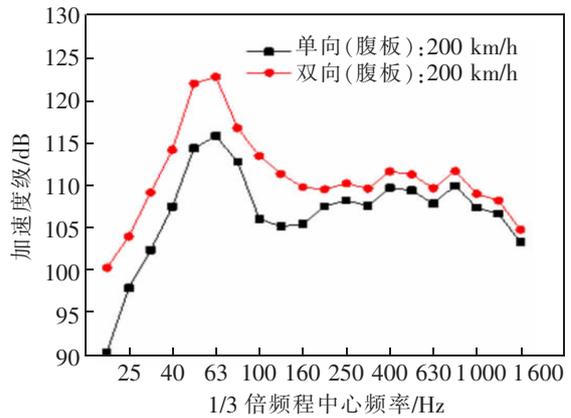
Fig.1 Vertical acceleration level at the midpoint of each plate for unidirectional travel

当桥梁列车交会时,由于车辆荷载和轨道不平顺等因素影响,桥面承受的荷载和激励也随之变化;因此考虑桥梁振动响应和结构噪声的变化很有

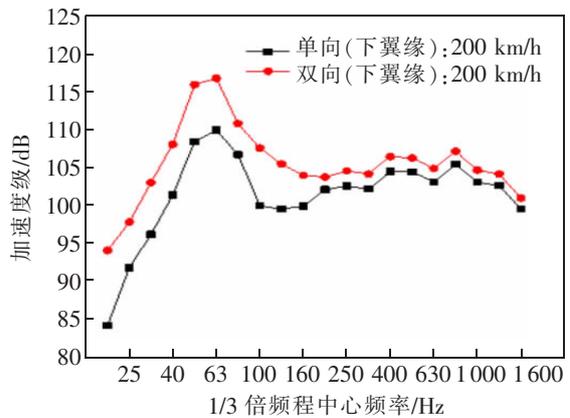
必要。在 2 种工况下,各板块中心拾取点 1/3 倍频程加速度振级频谱曲线对比如图 2 所示。



(a) 桥面板加速度振级



(b) 腹板加速度振级



(c) 下翼缘加速度振级

图 2 2 种工况下各板块中点振动加速度振级

Fig.2 Vibration acceleration level at the midpoint of each plate under two conditions

由图 2 可知,当列车由单向变为双向行驶时,在整个频段内,桥梁各板块中点处的振动加速度振级均有所增大,且变化规律基本一致;优势频段为 40~110 Hz,峰值频率为 63 Hz,该频率范围可作为主要减振频段。总体而言,腹板的加速度振级最大,桥面

板最小,应将腹板作为主要的减振部件。列车交会时对腹板和下翼缘振动加速度振级的影响相比于桥面板较大,主要影响频段为 20~200 Hz,对频率在 200~1 600 Hz 频段的影响逐渐减小。

4.2 结构噪声预测

4.2.1 声场点布置

为分析桥梁辐射噪声对周围环境的影响,在桥梁横断面主跨跨中布置 M1,M2,M3 和 M4 共 4 个噪声场点。M1 点布置于轨面上 1.2 m,距延轨中心线 7.5 m 处,M2,M3,M4 分别布置在地面上 1.5 m,距轨道中心线 7.5,25,100 m 处。

4.2.2 结构噪声预测

列车单向行驶各场点受到的桥梁结构辐射噪声声压级频谱分布如图 3 所示。2 种工况下各场点声压级频谱分布如图 4 所示。

由图 3 可知,当列车单向行驶时,各场点的变化规律相似,M1 的声压贡献量最大。近轨中心线至 M2 范围内的平均噪声衰减频率大于 M2 至 M3 范围内。远场点声压级衰减速度较慢,该桥辐射声压

级主要频段为 60~630 Hz。

由图 4 可知,在整个频段内,列车交会时桥梁各场点的结构噪声大于单向行驶。2 种工况下各场点声压级峰值频率在 500 Hz;在列车单向行驶和交会时,M1~M4 最大声压级值:M1 为 78.8,81.3 dB(A);M2 为 77.1,79.8 dB(A);M3 为 70.1,72.9 dB(A);M4 为 58.2,61.2 dB(A)。

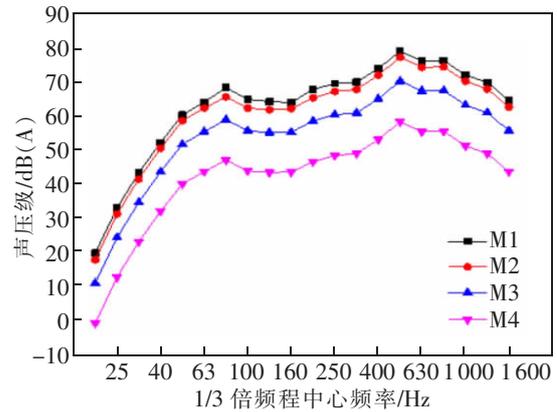
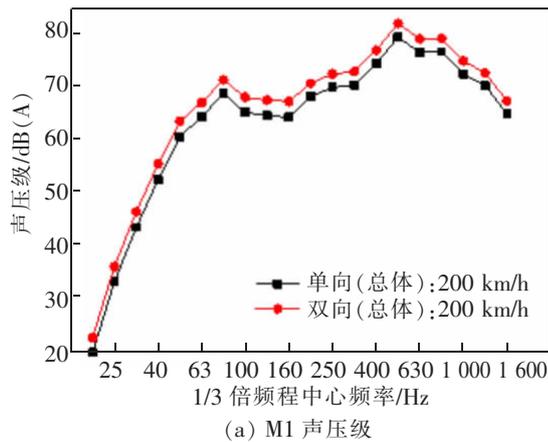
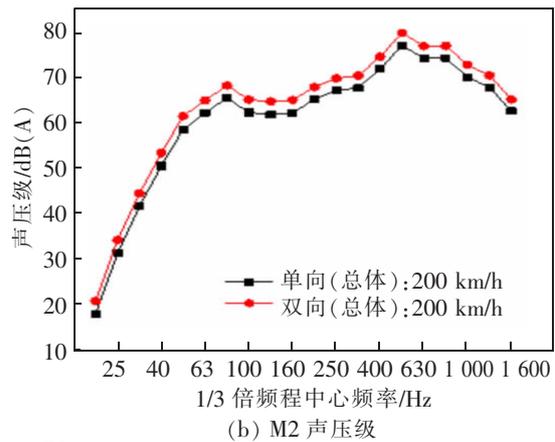


图 3 场点声压级频谱图

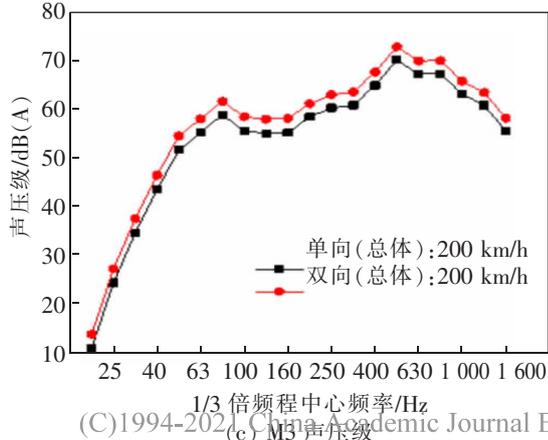
Fig.3 Field points sound pressure level spectrum



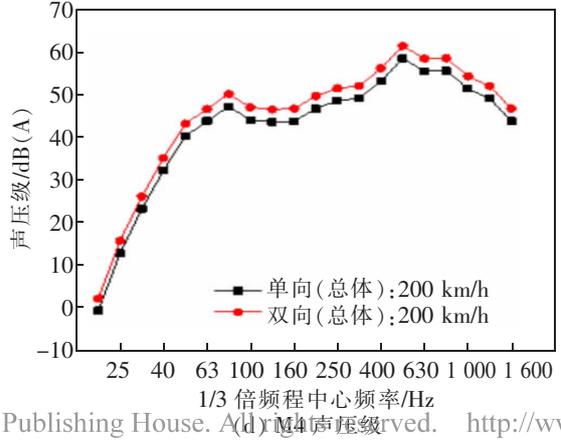
(a) M1 声压级



(b) M2 声压级



(c) M3 声压级



(d) M4 声压级

(C)1994-2021, China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 4 2 种工况各场点声压级频谱图

Fig.4 Sound pressure level spectrogram of each field point under the two working conditions

4.2.3 声压贡献量

列车单向行驶和交会时场点 M1 的噪声频谱如图 5 所示;场点的声压值如表 1 所示。

由图 5 可知,列车交会时,全频段内桥面板、腹板和下翼缘结构噪声声压级均有所增大;2 种状态下各板块声压级变化规律相似,峰值频率都在 500 Hz 左右。桥面板的声压级在达到峰值后整体变化幅度较为平缓,幅值为 8 dB(A)左右,腹板和下翼缘的声压级呈现相似的变化规律。

综合整个频段,桥梁板块对场点 M1~M4 的声压值贡献量如表 1 所示。

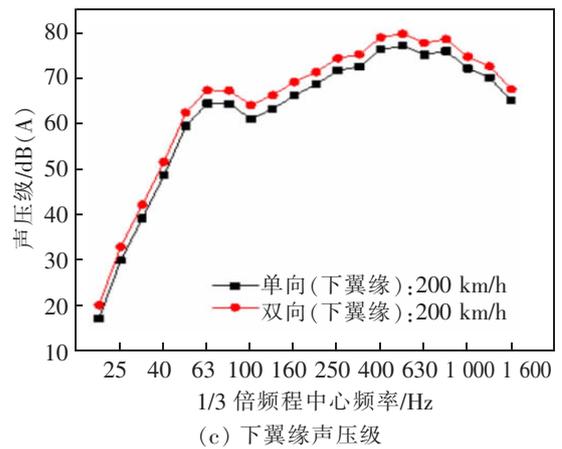
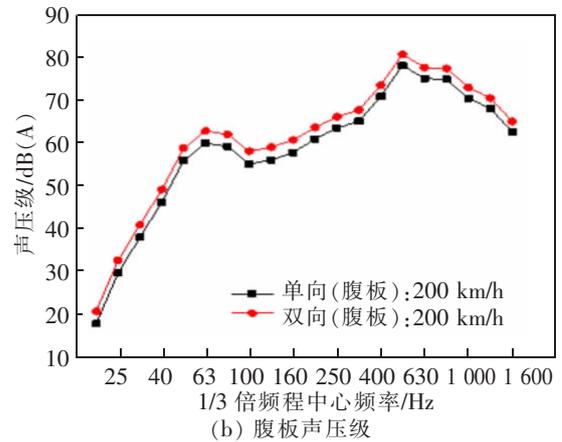
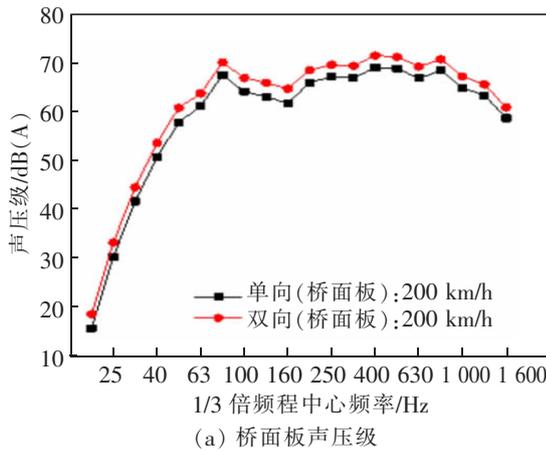


图 5 2 种工况下场点 M1 噪声频谱图

Fig.5 Noise spectrum of field point M1 under two working conditions

表 1 各场点综合频率对应的声压级贡献量

Tab.1 Contribution of sound pressure level corresponding to the comprehensive frequency of each field point

场点	行驶状态	总体压级/ dB(A)	桥面板/ dB(A)	桥面板声压 级贡献占比/%	腹板/ dB(A)	腹板声压级 贡献占比/%	下翼缘/ dB(A)	下翼缘声压 级贡献占比/%
M1	单向行驶	84.0	77.8	24.3	82.2	66.4	73.6	9.3
	双向交会	86.5	80.3	23.8	84.8	66.8	76.3	9.4
M2	单向行驶	82.1	74.8	18.6	80.6	70.0	72.8	11.4
	双向交会	84.8	77.4	18.2	83.3	70.3	75.5	11.5
M3	单向行驶	75.2	68.3	20.3	73.6	69.0	65.5	10.7
	双向交会	77.9	70.9	20.1	76.3	69.1	68.2	10.8
M4	单向行驶	63.3	56.3	20.2	61.7	69.3	53.5	10.5
	双向交会	66.2	59.2	20.1	64.6	69.4	56.4	10.5

在全频段内,腹板对各场点辐射结构噪声的声压级最大,下翼缘最小。各板块对场点声压级贡献量的大小规律为:腹板>桥面板>下翼缘;当列车双向行驶时,桥梁的结构噪声逐渐增大,各板块声压级的变化规律为:腹板和下翼缘的声压级贡献量逐渐增大,桥面板声压级贡献量有所减小。

4.3 功率与能量分析

2种工况下桥梁的振动功率级损失如图6所示。

钢-混结合梁的振动功率即为输入功率,由车轨相互作用和梁体产生,结构的振动功率损失为输入功率与输出功率之差。由图6可知,2种工况下的振动功率级损失随着频率的增加均逐渐增大,在40~63 Hz频段有减小的趋势。当列车单向行驶时,桥梁功率损失为13.0~30.0 dB,列车交会时,功率级

损失为9.2~27.3 dB。

2种工况下桥梁的振动能量级如图7所示。

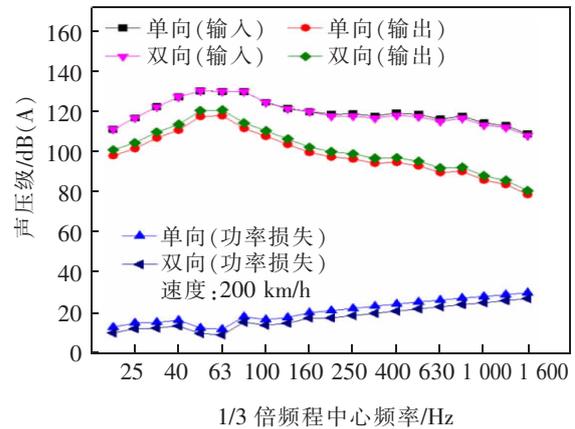
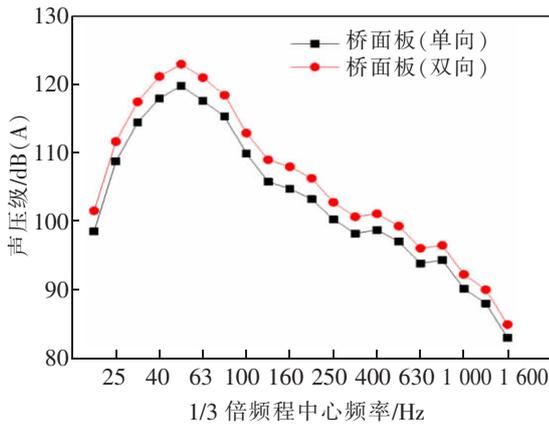
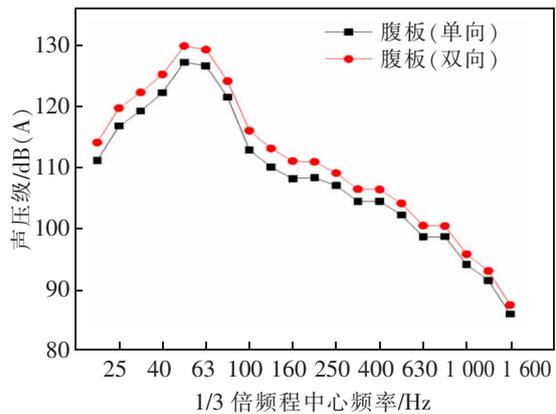


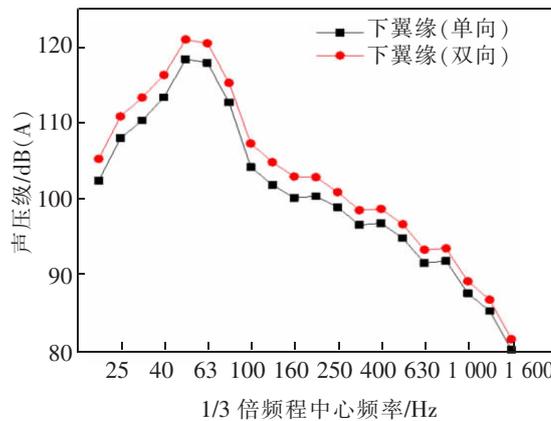
图6 2种工况下振动功率级损失
Fig.6 Vibration power level loss under two working conditions



(a) 桥面板能量级



(b) 腹板能量级



(c) 翼缘能量级

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图7 2种不同工况下桥梁各板块的振动能量级
Fig.7 Vibration energy levels of each plate of the bridge under two different conditions

由图7可知,列车交会时各板块的能量级在全频段内均大于单向行驶。振动能量级的分布大小规律为:腹板>桥面板>翼缘,能量级的峰值频段在50~63 Hz;在低于50 Hz的频段,随着频率的增加各板块的能量级逐渐增大,在50~1 600 Hz频率处,各板块的振动能量级随着频率的增加而减小。在频率为100 Hz时,腹板和下翼缘的振动能量级出现拐点,说明该频率对能量级的影响较大。

5 结论

基于FE-SEA混合法,通过建立钢-混结合梁结构分析模型,对比列车单双向行驶时,桥梁的结构振动和噪声传播规律。

1) 桥梁各板块拾取点的振动加速度级均有所增大,且变化规律基本一致,优势频率为40~110 Hz,峰值频率在63 Hz。

2) 全频段内各板块结构噪声的声压级均有所增大;2种状态下的各板块声压级峰值频率在500 Hz。桥面板的声压级在达到峰值后变化不大,幅值为8 dB(A)左右,腹板和下翼缘的声压级变化规律较为相似。

3) 当列车交会时,桥梁的结构噪声逐渐增大,腹板和下翼缘的声压级贡献量也增大,但增大幅度一般,桥面板的声贡献量减小。

4) 当列车单向行驶时,桥梁功率损失为13.0~30.0 dB,列车交会时,功率级损失为9.2~27.3 dB。列车交会时桥梁各板块的能量级在全频段内均大于单向行驶;腹板的振动能量级最大,各板块振动能量级的峰值频率为50~63 Hz。

参考文献:

- [1] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives[J]. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2011(2):240-253.
- [2] THOMPSON D J. Railway noise and vibration: mechanisms, modeling and means of control[M]. UK: Elsevier, 2009.
- [3] 韩江龙,吴定俊,李奇,等. 城市轨道交通连续梁和简支梁的结构噪声特性比较[J]. *振动与冲击*, 2019,38(11):258-263.
- [4] 罗文俊,唐康文,程龙,等. 列车荷载作用下U型梁振动与结构噪声分析[J]. *振动工程学报*, 2018,31(6):1031-1040.
- [5] 苏庆田,刘玉擎,曾明根,等. 钢混组合箱梁桥受力的有限元仿真分析[J]. *桥梁建设*, 2006(5):28-31.
- [6] 张迅,王曦阳,刘蕊,等. U肋加劲板的声振特性研究[J]. *中国公路学报*, 2020,33(7):76-85.
- [7] 高飞. 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):72-76.
- [8] 张迅,张健强,李小珍,等. 混合FE-SEA模型预测箱梁低频噪声及试验验证[J]. *振动工程学报*, 2016,29(2):237-245.
- [9] 李奇. 混凝土桥梁低频结构噪声数值模拟与现场实测[J]. *铁道学报*, 2013,35(3):89-94.
- [10] 张迅,张健强,李小珍,等. 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.
- [11] 张鹤,谢旭,山下幹夫,等. 交通荷载引起的钢箱梁桥振动辐射瞬态噪声评估[J]. *振动工程学报*, 2011,24(3):221-228.
- [12] LANGLEY R S, BREMNER P. A hybrid method for the vibration analysis of complex structure-acoustic system[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999,105(3):1657-1671.
- [13] LANGLEY R S, CORDIOLI J A. Hybrid deterministic-statistical analysis of vibroacoustic systems with domain couplings on statistical components[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009,321(3/5):893-912.
- [14] 罗文俊,蒋峻楠,雷晓燕,等. 基于FE-SEA混合法的车内结构噪声预测分析[J]. *铁道学报*, 2017,39(12):137-145.
- [15] 纪琳. 中频振动分析方法:混合模型解析[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [16] 罗文俊,杨鹏奇,张子正,等. 基于FE-SEA混合法箱形梁结构噪声预测分析[J]. *铁道学报*, 2019,41(8):100-107.
- [17] 刘维宁,马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估、控制[M]. 北京:科学出版社,2014.



特约专家徐长节:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委副书记、副校长(主持行政工作),教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技领军人才,国家百千万人才工程入选者,国务院特殊津贴获得者。主持及参与国家及省部级科研项目10余项、工程项目100余项。获国家科技进步二等奖等。



特约专家陈梦成:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才555工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。主持完成及在研国家973、国家自然科学基金江西省等各类科研项目30余项;发表学术论文400余篇。获省部级奖项5项等。



特约专家刘林芽:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,国家百千万人才工程国家级人选,教育部新世纪优秀人才,享受国务院特殊津贴专家,赣鄱英才555工程领军人才,主持国家自然科学基金、教育部等各类科研项目50余项。获国家科技进步二等奖,江西省自然科学一等奖等奖项11项。



特约专家杨辉:男,二级教授,博士生导师。新世纪百千万人才工程国家级人选,赣鄱英才555工程领军人才,江西省优势科技创新团队领军人才,获国务院特殊津贴、江西省突出贡献人才等荣誉,现任华东交通大学副校长,江西省人大常委。获江西省自然科学奖一等奖、江西省技术发明一等奖等省部级奖项7项。



特约专家罗文俊:女,教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,防灾减灾研究所所长。教育部青年长江学者,江西省主要学科学术及技术带头人,首批江西省青年井岗学者,享受国务院特殊津贴专家。主持国家自然科学基金4项,省部级科研课题10余项。获教育部科技进步二等奖2项、江西省科技进步一等奖等。



特约专家刘燕德:女,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,智能机电装备创新研究院院长,第三批国家“万人计划”领军人才,科技部重点领域创新团队负责人,江西省光电检测工程技术中心主任等。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖等省部级奖项8项。



特约专家宋立军:男,教授,博士生导师,智能激光制造湖南省重点实验室主任。研究方向:激光智能制造(3D打印、超快激光微纳制造)、激光光谱学、激光制造材料科学、传感及控制。主持及参与多项国家自然科学基金、湖南省等各类科研项目。获中国机械工业联合会和中国机械工程学会一等奖等。



特约专家肖乾:男,教授,博士生导师。现任华东交通大学机电与车辆工程学院院长,华东交通大学天佑拔尖人才,江西省百千万人才工程人选,获全国詹天佑铁道科学技术奖青年奖、茅以升铁道科学技术奖、江西省科技进步一等奖等。近5年来,主持国家自然科学基金3项,省部级科研课题多项以及企业横向课题等近20项。