文章编号:1005-0523(2023)04-0001-08

基于混合FE-SEA法的箱梁结构噪声特性研究

雷晓燕[1],翁凌霄[1,2],余亮亮[3],王鹏生[1],罗 锟[1]

(1. 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; 2. 南昌应用技术师范学院电子与信息工程学院,江西 南昌 330108; 3. 深圳综合交通设计研究院,广东 深圳 518001)

摘要:为探讨箱梁结构噪声规律及其影响因素,以南昌某高架铁路箱梁为研究对象,建立混合FE-SEA模型进行数值仿真分析,并进行现场试验验证。在此基础上,探讨了板厚对结构噪声的影响规律,分析了箱梁各子系统对远场声压的声贡献量。研究结果表明:混合FE-SEA法适用于箱梁结构噪声研究;箱梁结构振动的峰值频率为125 Hz,结构噪声频率范围为50~160 Hz;箱梁顶板和翼板对远场声压级的贡献量较大:增加各板厚度能降低结构噪声,其中增加顶板厚度效果较为明显。因此在减振降噪的过程中,应着重关注顶板和翼板。

关键词:FE-SEA模型;结构噪声;现场试验;箱梁

中图分类号:U24 **文献标志码**:A

本文引用格式:雷晓燕,翁凌霄,余亮亮,等. 基于混合FE-SEA法的箱梁结构噪声特性研究[J]. 华东交通大学学报,2023,40(4):1-8.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.009

Structural Noise of Box Girder for Elevated Track: An Analysis Based on the Hybrid FE-SEA Model and Experiment

Lei Xiaoyan[1], Weng Lingxiao[1,2], Yu Liangliang[3], Wang Pengsheng[1], Luo Kun[1]

(1. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. College of Electronical and Information Engineering, Nanchang Normal College of Applied Technology, Nanchang 330108, China; 3. Shenzhen Integrated Transportation Design Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: To study the vibration and noise characteristics of elevated railway bridge structures and the influencing factors, a certain elevated railway bridge on the Shanghai-Kunming high speed railway was taken as the research object, a hybrid FE-SEA model for numerical simulation analysis was established and on-site experimental verification was conducted. Accordingly, the influence of plate thickness on structural noise and the contribution of each bridge plate subsystem to the overall noise were analyzed. The results showed that the FE-SEA method is suitable for the study of structural noise of elevated railway bridge. The peak frequency of vibration for the box girder structure is 125 Hz. and the frequency of structural noise ranges from 50 Hz to 160 Hz. The top plate and wing plate of the box girder contribute considerably to the far-field sound pressure level. The results indicated that increasing the thickness of each plate can reduce the structural noise, and this reduction is greater when the thickness of the top plate is increased.

Key words: FE-SEA model; structure-borne noise; field test; box girder

Citation format: LEI X Y, WENG L X, YU L L, et al. Structural noise of box girder for elevated track: An analysis based on the hybrid FE-SEA model and experiment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 1-8.

收稿日期:2023-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51978264);江西省科技厅科技计划项目(20223AEI191004);江西省教育厅科技项目(GJJ219001)

随着我国高速铁路的快速发展和高架桥梁在高速铁路上的大规模应用，高架铁路混凝土桥梁引起的噪声越来越被人们所关注，尤其是桥梁辐射的低频噪声(频率在200 Hz以内)对人体有诸多负面影响,如对注意力、反应时间,以及语言的辨识能力等[1]。

Ngai等[2]对一座香港混凝土箱型桥梁进行了测试,结果表明列车以140 km/h的速度通过桥梁时产生的振动和噪声频率集中在20~157 Hz范围内,峰值频率为43 Hz和54 Hz。Zhang等[3],Li等[4]分别现场实测了32 m长的高速铁路双线与单线混凝土桥梁振动和噪声，结果表明桥梁结构辐射噪声主要为箱梁振动产生中低频段噪声，主要由桥梁板件的局部刚度决定,峰值频率为50 Hz和63 Hz。采用实测法研究高架铁路桥梁的结构振动噪声能够获得真实准确的结果,但需要耗费大量的时间、人力和物力,还可能带来对既有交通的影响,同时也无法满足工程论证、设计和规划阶段的要求。仿真分析方面,李小珍等[9]利用车-线-桥耦合理论,对桥梁的竖向振动以及梁体面板的声学贡献率与贡献量进行了分析。

张迅等[5]利用有限元-统计能量法(FE-SEA)模型对铁路混凝土桥梁的低频结构噪声进行计算和验证,得到了较好的结果。高飞等[6]对城市轨道交通高架桥梁及车辆参数对结构的振动与噪声影响进行了仿真分析规律。罗文俊等[7]利用FE-SEA法对桥梁结构噪声特性进行了仿真分析,但建模过程中未考虑上部钢轨以及轨道板等结构。李奇等[8]利用有限元法和模态叠加法分析列车-轨道-桥梁的瞬态响应,并重点研究了桥梁的局部高频振动。韩江龙等[9]利用模态叠加法对城市轨道交通U型梁进行了车-线-桥耦合动力计算,同时利用SYSNOISE软件计算得到了模态声传递向量,并结合梁的模态坐标响应计算得到了梁的结构噪声。

尽管国内外学者对高架轨道结构引起的结构振动噪声做了不少研究,但是针对高速铁路桥梁尤其是列车车速在300 km/h及以上的箱梁结构振动与噪声实测及仿真分析较少。本文针对沪昆高铁某高架铁路桥梁,建立混合FE-SEA模型,并进行了现场试验验证,在此基础上分析了板厚和各板的声学贡献量,研究结果能够为高架铁路桥梁结构的减振降噪设计提供一定的参考价值。

1 现场试验测试

本文选取沪昆高铁南昌段某一高架铁路桥梁进行测试研究。被测桥梁段由32 m多跨混凝土简支箱梁构成，箱梁由C50预制混凝土和Q235(HRB335)钢筋组成,桥梁承载两条轨道,轨道中心线间距为4.4 m。桥面上铺设CRTS-Ⅱ钢轨板和60 kg/m标准钢轨。在试验中运行的高速列车分别为CRH380系列和CRH2系列,设计速度为350 km/h。

如图1所示,在箱梁跨中断面处安装6个加速度传感器,其中A1与A6为跨中底板和顶板振动加速度测点,A2与A4为跨中左右腹板振动加速度测点,A3与A5为跨中左右翼板的振动加速度测点;同时在桥梁跨中断面处安装4个声学传感器,其中N1距离底板0.3 m,N2距离右腹板0.3 m,N3距离右翼板0.3 m,N4距离底板2.7 m。测试采用393B04加速度传感器、GRAS声传感器以及德国海德公司的DATaRec 4 DIC24数据采集仪。

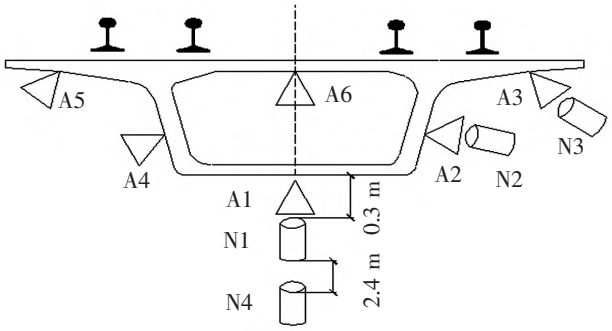


图1 跨中截面测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring points at the mid-span section

2 实验测试结果分析

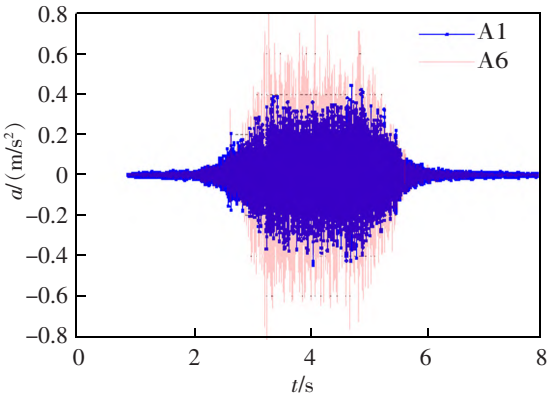
2.1 箱梁振动加速度分析

由于高架铁路桥梁结构是对称的,因此,只需要测量列车通过近轨侧（下行方向,A2、A3测点侧)时的振动和噪声。桥梁振动加速度级VL_Z计算公式为

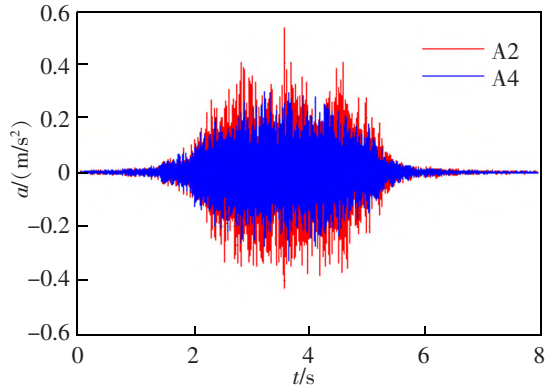
$$VL_Z=20\lg\left(\frac{a}{a_0}\right) \tag{1}$$

式中:a为振动加速度;a_0为基准加速度，一般取$a_0=10^{-6}$ m/s^2。

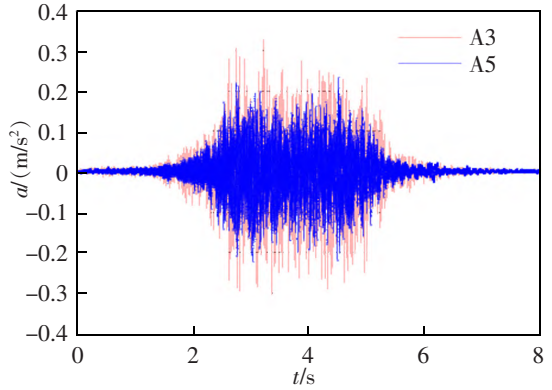
图2给出了8节编组列车通过时箱梁顶板、翼板、腹板测点的振动加速度时域图,列车从接近到远离桥梁时间t共计8 s,可以看出桥梁结构振动幅



(a) A1 and A6



(b) A2 and A4



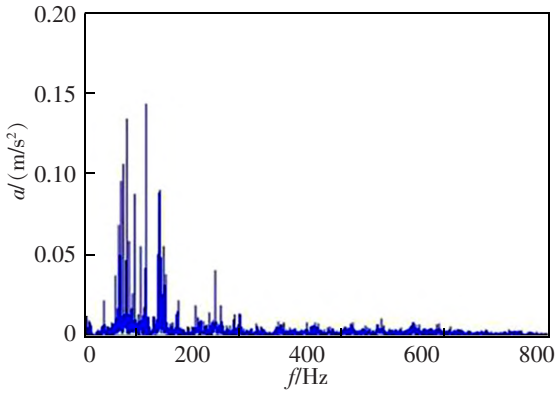
(c)A3 and A5

图 2　箱梁 A1~A6 测点振动加速度时域图

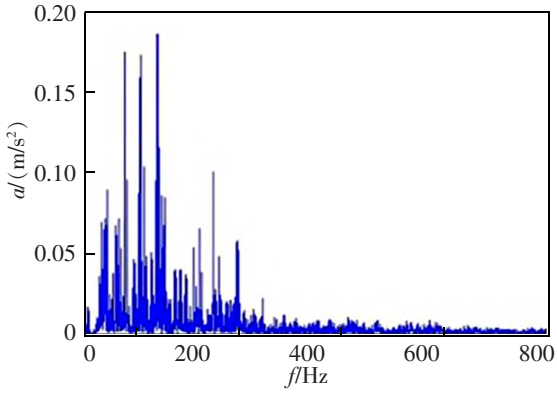
Fig.2　Time domain diagram of vibration acceleration of box girder A1~A6

值大小:顶板>底板>腹板>两翼。图 3 为箱梁顶板、底板加速度频谱,可以看出桥梁振动频率主要范围集中在 200 Hz 内。

选取 20 趟 8 节编组列车通过时的振动加速度值并取平均值,结果如图 4 所示。各测点加速度振级(VL_Z)随频率(f)的变化规律非常相似,在 20~200 Hz 范围内桥梁顶板振动最大,加速度振级峰值频率位于 40 Hz, 频率高于 250 Hz 时加速度振级急剧下降。在 0~50 Hz 频率范围,加速度振动级一般呈顶



(a) A1



(b) A6

图 3　箱梁 A1、A6 测点振动加速度时域图

Fig.3　Time domain diagram of vibration acceleration of Box girder A1、A6

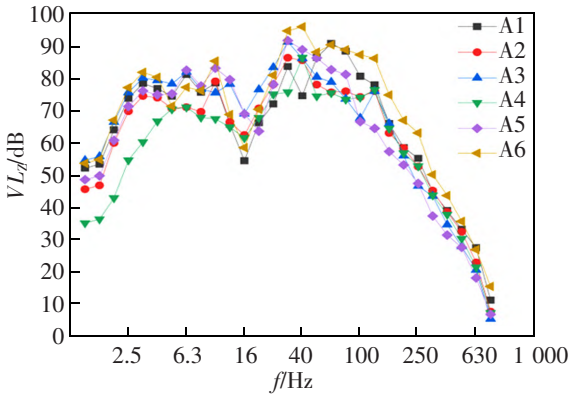


图4　箱梁 A1~A6 测点振动加速度频域图

Fig.4　Vibration acceleration frequency domain diagram of box girder A1~A6

板>两翼>底板>腹板的规律;在 50~200 Hz 范围,加速度振动级一般呈顶板>底板>两翼>腹板的规律,且车辆运行侧的桥梁振动要大于另一侧。加速度振级在 16 Hz 处存在一个由列车激发桥梁的反共振引起的明显波谷。部分频率处,箱梁远轨翼板振动较近轨翼板大,这是因为列车高速通过时,在振动

传递过程中，由于翼板的鞭梢效应，振动情况相对复杂。

2.2 箱梁结构噪声分析

图5、图6为箱梁结构噪声测试结果，其中图5为箱梁噪声测试时域图，从时域数据来看，各噪声测点的声压(*SP*)时域信号相差不大均为0.4~0.5 Pa，同时列车经过的时间信号基本同步，经过的时间历程约为4.5 s。由图6可知。

1）由于桥梁本身是一个巨大的遮蔽物，对上部轮轨噪声、空气动力噪声、受电弓噪声等高频噪声具有较好的隔绝效应，所以当频率高于1 000 Hz时，噪声急剧下降，但中频噪声由于波长较长、衰减较少，能够部分绕过遮蔽到达箱梁周围。

2）N1~N4测点声压级(*SPL*)和分布规律基本一致，主要集中在中低频阶段，除N4外峰值频率为63~160 Hz表明箱梁的结构噪声主要表现为低频特性。声压级优势频率为50~1 000 Hz。

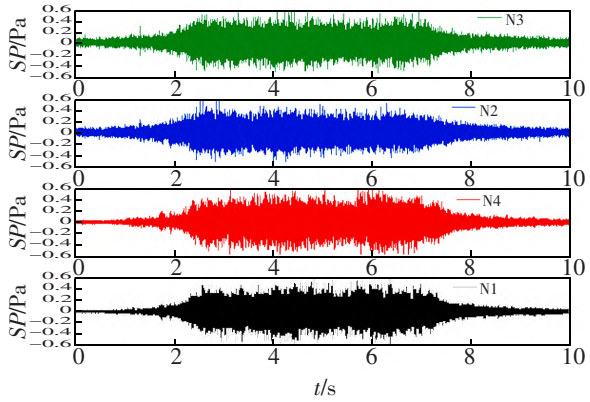


图5 N1~N4测点A计权声压时域图

Fig.5 Weighted sound pressure time domain diagram of N1~N4 measuring point A

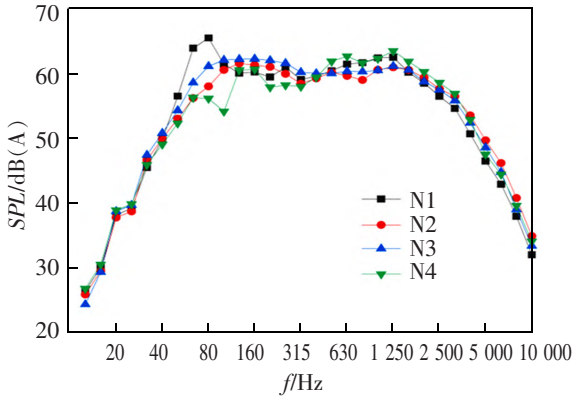


图6 N1~N4测点A计权声压级频域图

Fig.6 Weighted sound frequency domain diagram of N1~N4 measuring point A

3）N1、N4处声压级衰减在80 Hz时非常大，主要是由于地面反射[10]引起的等声干扰抵消。由于地面反射作用，底板中心(N1)可视为声源S，与地面对称处为虚声源S′。由声源S和虚声源S′产生的声波是相干波。底板离地高为2.7 m，因此N1处S与S′之间路径差为4.8 m，而N4测点路径差为2.4 m。频率为50，63，80 Hz的声波波长分别为6.9，5.5，4.3 m。N1测点声波路径差大约是80 Hz波长的整数倍，N1处于相长干涉区域。虽然底板的振动在80 Hz时不是特别大，但此时N1处噪声非常大。N4在80 Hz时的声波路径差约为半波长的奇数倍，N4处于干涉相消区域，N4噪声在80 Hz时较小。

3 数值仿真分析

3.1 混合FE-SEA理论

高架铁路结构的振动和噪声分析包括钢轨、轨道板、箱梁结构3个子系统。各子系统的振动和噪声频率范围也有所不同。有限元法(FE)在处理结构的低频振动方面具有优势，但不适用于中、高频振动分析。轨道和轨道板的振动频率很高，高达数百至上千赫兹，此时，统计能量法(SEA)是一个更好的选择。但是，如果采用SEA对混凝土箱梁进行分析，其弯曲模数可能不够，导致预测精度大大降低。此外，如果对不同的频率范围使用不同的模型，这可能会导致它们之间在分频处出现不连续。而混合FE-SEA法能够避免上述情况[11]。

利用混合FE-SEA模型在全频范围内解决各子系统的振动和噪声，从而避免了多个模型的频率划分，可以显著提高了计算效率，并且保证计算模型的一致性。

包含多个子系统的运动方程可以用拉格朗日方程来表示

$$\boldsymbol{M}\ddot{q}+\boldsymbol{C}\dot{q}+\boldsymbol{K}q=\boldsymbol{F} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{K}$分别为质量矩阵，阻尼矩阵及刚度矩阵；$\boldsymbol{F}$为广义力向量；q，$\dot{q}$，$\ddot{q}$分别为系统的位移，速度和加速度。经傅里叶变换后有

$$(-\omega^2\boldsymbol{M}+i\omega\boldsymbol{C}+\boldsymbol{K})q=\boldsymbol{D}_{\mathrm{d}}q=\boldsymbol{f} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{D}_{\mathrm{d}}$为动态刚度矩阵；$\omega$为圆频率；$q$和$f$为复频率相关量，分别表示节点位移和外力的振幅向量。

Langley等[12-13]对混合FE-SEA理论形成做了大量的工作和贡献。混合模型中，在FE和SEA子系

统的耦合边界处,弹性波将产生反射效应,从而对 FE 子系统产生额外的混响力。有限元子系统的整体动力学方程可以表示为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}q=f_{\mathrm{ext}}+\sum_{k=1}^{N}f_{\mathrm{rev}}^{(k)} \tag{4}$$

式中:q 为 FE 子系统的自由度;N 为 SEA 子系统总数;f_{ext} 为直接施加于有限元子系统的外力;$f_{\mathrm{rev}}^{(k)}$ 为第 k 个 SEA 子系统中的"混响场"在连接处所产生的混响力;$\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}$ 是有限元子系统总动态刚度矩阵(由质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵决定)。$\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}$ 由两部分组成

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{d}}+\sum_{k=1}^{N}\boldsymbol{D}_{\mathrm{dir}}^{(k)} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{D}_{\mathrm{d}}$ 为边界处 FE 子系统自身动刚度;$\boldsymbol{D}_{\mathrm{dir}}^{(k)}$ 为第 k 个 SEA 子系统对 FE 子系统的直接动刚度。根据式(4),FE 子系统的自由度 q 可以表示为

$$q=\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}^{-1}\left(f_{\mathrm{ext}}+\sum_{k=1}^{N}f_{\mathrm{rev}}^{(k)}\right) \tag{6}$$

根据 Langley[14]研究结论,耦合边界上的混响力可以用下列方程确定

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{ff,rev}}^{(k)}=\left(\frac{4E_k}{\pi\omega n_k}\right)\mathrm{Im}\left\{\boldsymbol{D}_{\mathrm{dir}}^{(k)}\right\} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{S}_{\mathrm{ff,rev}}^{(k)}$ 为混响力互谱矩阵;E_k,n_k 分别为第 k 个 SEA 子系统的平均振动能量及模态密度,Im{ }为虚运算。式(7)建立了 SEA 子系统振动能量与混响力间的联系。

按照能量守恒定律,FE-SEA 系统功率平衡方程可表示为

$$\omega(\eta_j+\eta_{d,j})E_j+\sum_{k=1}^{N}\omega\eta_{jk}n_j\left(\frac{E_j}{n_j}-\frac{E_k}{n_k}\right)=P_j+P_{\mathrm{ext},j} \tag{8}$$

式中:η_j 和 $\eta_{d,j}$ 分别为第 j 个 SEA 子系统的内损耗因子和附加损耗因子,$\eta_{j,k}$ 是 SEA 子系统 j 与子系统 k 间的耦合损耗因子;P_j 为第 j 个 SEA 子系统的外部输入功率;$P_{\mathrm{ext},j}$ 为 FE 子系统对第 j 个 SEA 子系统的外部激励所产生的输入功率,j=1,2,…,N。

结合式(6)和式(7),可推导出 FE 子系统自由度 q 的互谱矩阵为

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{qq}}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}^{-1}\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{ff,ext}}+\sum_{k=1}^{N}\left(\frac{4E_k}{\pi\omega n_k}\right)\mathrm{Im}\left\{\boldsymbol{D}_{\mathrm{dir}}^{(k)}\right\}\right]\left(\boldsymbol{D}_{\mathrm{tot}}^{-1}\right)^{*\mathrm{T}} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{S}_{\mathrm{qq}}$ 为作用于 FE 子系统的力互谱矩阵;"*"和"T"分别为共轭运算和转置运算。

利用式(8)可以得出 SEA 子系统的平均振动能,利用式(9)可以得出 FE 子系统的自由度。结合噪声辐射理论即可得出 FE 子系统的振动速度和加速度,以及空间中任意一点的声压。

3.2　箱梁概况

图 7 为南昌某高速铁路 32 m 双线箱型混凝土简支梁桥典型截面图。梁体全长 32.6 m,梁高 3.05 m,宽 13.4 m,横坡为 2%,顶板厚度为 0.3 m 到 0.409 m,腹板厚度为 0.45 m,底板厚度从 0.28 m 到 0.427 m。Ⅰ-Ⅰ段为中部,Ⅱ-Ⅱ段位于箱梁两端。

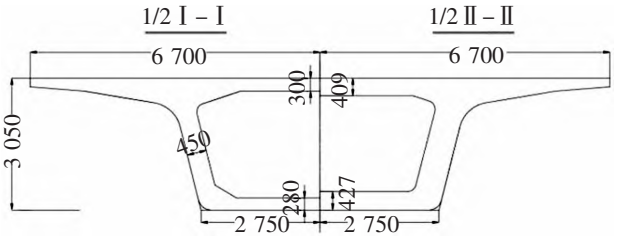


图 7　箱梁截面示意图(单位:mm)

Fig.7　Schematic diagram of box girder section(Unit:mm)

3.3　混合模型创建

如图 8 所示,利用 VAONE 软件建立混合 FE-SEA 模型,根据各子系统的振动特性,无砟轨道和钢轨采用 SEA 模型,高架轨道桥梁的箱梁部分采用 FE 模型。根据箱梁特性又可以分成顶板、底板、左右腹板和左右翼板等 6 个子系统。无砟轨道与箱梁采用混合手动线连接,钢轨与无砟轨道采用手动点连接来模拟弹簧扣件。

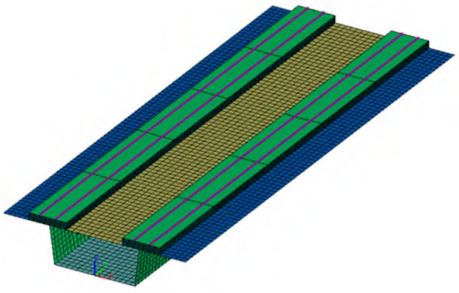


图 8　混合 FE-SEA 模型

Fig.8　Hybrid FE-SEA model

3.4　计算参数

有限元模型的网格划分精度十分重要,一般有限元模型的网格尺寸应不超过振动分析波长的 1/6。本文主要研究箱梁中低频振动噪声问题,研究频率范围为 20~200 Hz。有限元模型单元网格取为 0.2 m,划分单元总数为 10 404 个,保证了计算的精度。箱梁

的弹性模量为36.2 GPa,容重为2 500 kg/m³,泊松比为0.2,内损耗因子为0.04。

桥上无砟轨道结构主要由轨道板、混凝土底座板和CA砂浆层构成,箱梁和轨板的混凝土强度等级为C50(中文混凝土代码),弹性模量为39 GPa,轨道板尺寸为6 450 mm×2 550 mm×200 mm,容重为2 500 kg/m³,泊松比为0.176,内损耗因子为0.04。钢轨为CHN60型,钢轨的截面面积为77.45 cm²,竖向截面惯性矩为321.7 cm⁴,容重为78.3 kN/m³,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3,损耗因子为0.01。扣件间距为0.625 m,扣件刚度大小为60 MN/m。

图9给出了列车以300 km/h速度经过桥梁时的轮轨作用力频谱曲线,由图可知,轮轨力F的峰值频率为50 Hz,并且在200 Hz频率范围内的轮轨力基本呈"上凸"的趋势,与文献[1]的结论一致。

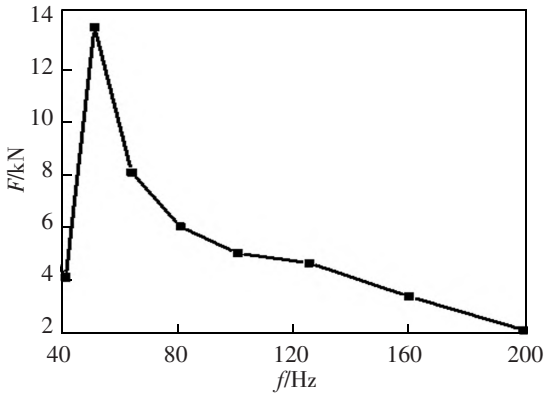


图9 轮轨力幅值谱

Fig.9 Wheel-rail force amplitude spectrum

3.5 理论与试验对比

由于试验车均为过路车,具体载荷情况未知,因此根据实验测试工况,以300 km/h作为仿真分析车速,比较N1点的声压级,图10为理论值与实测值对比。

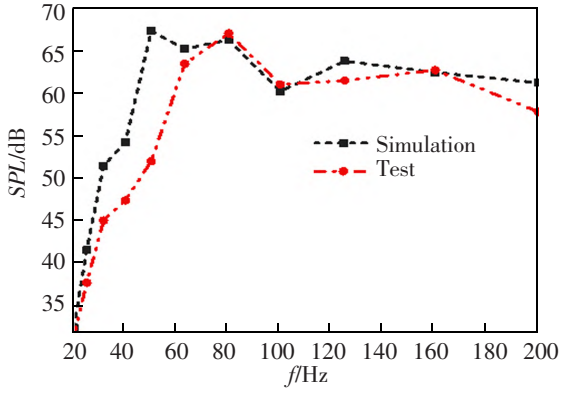


图10 N1测点声压级仿真与实测对比

Fig.10 N1 point sound pressure level simulation and test comparison

由图10可知,在50 Hz及以上频率,理论与实测结果吻合较好,基本趋势保持一致。低于50 Hz时,理论与实际的偏差值主要来自实际车辆的轨道和车轮不平顺的不确定性。

4 辐射特性及参数分析

4.1 声贡献量分析

如图11、图12所示,为研究桥梁结构远场噪声辐射特性,利用VAONE软件计算分析了距离轨道中心线25 m处场点的声贡献量(1/3倍频程),箱梁各板辐射到场点的声贡献量大小关系为:顶板>近轨翼板>远轨翼板>底板>近轨腹板>远轨腹板,箱梁顶板和翼板对远场场点的声贡献量高达84.26%,由此可知,无论近场还是远场,箱梁的顶板与翼板的振动噪声应为关注的重点。

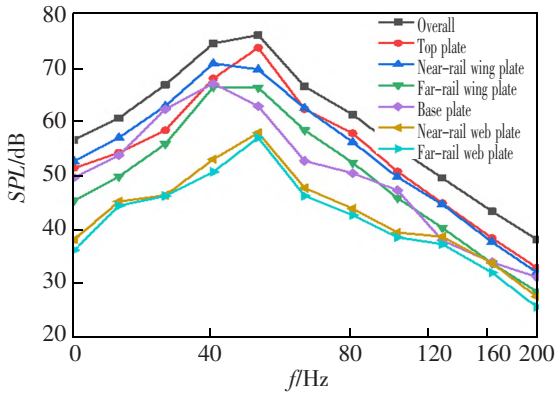


图11 箱梁各板声贡献量(1/3倍频程)

Fig.11 Each plate sound contribution of box girder

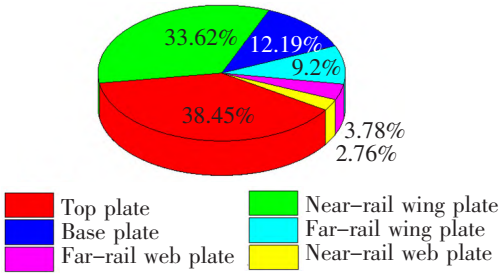
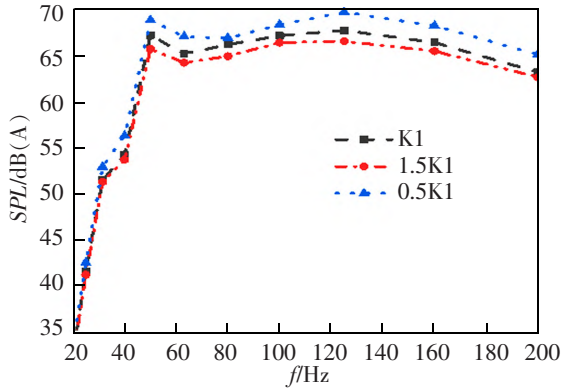


图12 各板声贡献量百分比

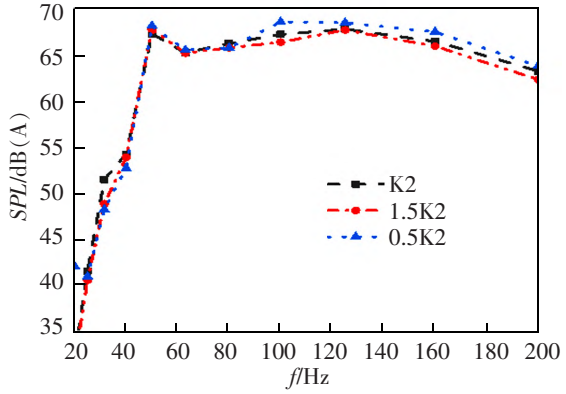
Fig.12 Percentage of sound contribution of plate

4.2 各板厚度影响分析

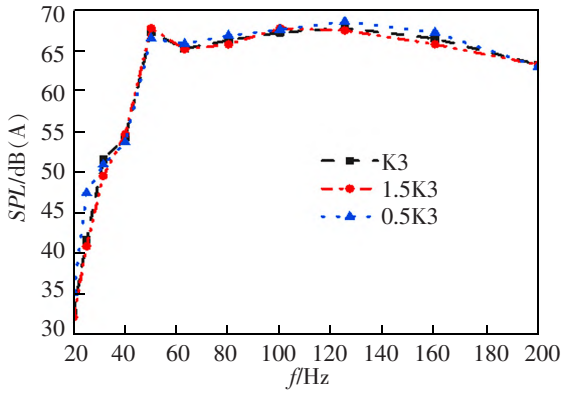
假设混凝土顶板、底板和腹板的厚度分别为K1、K2、K3。图13计算分析了顶板、底板和腹板板厚变化时场点N1的声压级曲线。由于板厚变化,各板质量和刚度均增大,结构振动随之减小,场点的声压级也随板厚的增加而减小,其中顶板的厚度影



(a) Top plate



(b) Base plate



(c) Web plate

图 13　箱梁各板不同厚度下 N1 点结构噪声

Fig.13　Structural noise at point N1 under different thicknesses of each plate of box girder

响最为明显,腹板的厚度的影响最弱。这是因为在列车垂向荷载作用下,顶板的振动较大而腹板法向振动较小。因此在桥梁减振降噪的过程中,应着重对顶板进行处理。

5　结论

1) 混合 FE-SEA 法预测混凝土铁路桥梁辐射噪声是可行和准确的。与目前广泛使用的有限元法和边界元法相比,该方法具有较好的计算效率。

2) 桥梁振动的主要来源是轮轨接触面表面粗糙度引起的轮轨力的变化,其中垂直振动在桥梁的能量传递中起着主要作用。不同的车速和轮轨粗糙度会影响轮轨力的频谱特性。顶板、底板、腹板的峰值振动加速度频率为 40 Hz 左右,这与轮轨力的峰值不同,而是由于箱梁的固有频率相关,说明振动的峰值频率不仅与轮轨力有关,而且还可能受到箱梁本身的很大影响。

3) 箱梁的顶板、底板以及腹板的振动加速度的峰值频率为 31.5~60 Hz, 并非轮轨力的峰值处,说明桥梁振动的峰频率不单与轮轨力有关,还与轮轨不平顺和桥梁自身特性有较大关系。

4) 箱梁结构噪声主要频率范围为 50~160 Hz,桥梁的噪声不仅与桥梁的振动有关,而且与各板的辐射效率和传输路径有关,而地面反射也是一个重要因素。各板厚度对箱梁结构噪声有一定影响,随着各板厚的增加,结构噪声呈减小的趋势,其中顶板对结构噪声影响最大,腹板影响最小。

5) 箱梁各板辐射到远场的声贡献量大小关系为:顶板>翼板>底板>腹板,因此桥梁减振降噪应重点针对顶板和翼板。

6) 高速列车行驶下箱梁结构振动噪声大小规律类似,均以顶板与翼板为主要控制对象,但左右翼板的振动峰值频率有所不同。采用混合 FE-SEA 方法, 进一步研究优化箱梁的结构和截面形式、安装调谐质量阻尼器、敷设阻尼层等减振降噪举措,对于减振降噪具有重要价值。

参考文献:

[1] THOMPSON D J. Railway noise and vibration:mechanisms, modeling and means of control[M]. UK:Elsevier,2009.

[2] NGAI K W,NG C F. Structure-borne noise and vibration of concrete box structure and rail viaduct[J]. Journal of Sound Vibration,2002,255(2):281-297.

[3] ZHANG X,LI X Z,SONG L Z,et al. Vibrational and acoustical performance of concrete box-section bridges subjected to train wheel-rail excitation:field test and numerical analysis[J]. Noise Control Engineering Journal,2016,64 (2): 217-229.

[4] LI X Z,ZHANG X,ZHANG Z J,et al. Experimental research on noise emanating from concrete box-girder bridges

on intercity railway lines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(2): 125-135.

[5] 张迅, 张健强, 李小珍. 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.
ZHANG X, ZHANG J Q, LI X Z. Prediction of low frequency noise of box girder by hybrid FE-SEA model and experimental verification[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2): 237-245.

[6] 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): 72-76.
GAO F, XIA H, CAO Y M, et al. Study on vibration and sound radiation of elevated structure of urban rail transit[J]. Vibration and Shock, 2012, 31(4): 72-76.

[7] 罗文俊, 杨鹏奇, 张子正. 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): 100-108.
LUO W J, YANG P Q, ZHANG Z Z. Prediction and analysis of structural noise of box girder based on FE-SEA hybrid method[J]. Journal of Railway, 2019, 41(8): 100-108.

[8] 李奇, 吴定俊. 混凝土桥梁低频结构噪声数值模拟与现场测试[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 89-94.
LI Q, WU D J. Numerical simulation and field test of low-frequency structural noise of concrete bridge[J]. Journal of Railways, 2013, 35 (3): 89-94.

[9] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 城市轨道交通槽型梁结构噪声计算与分析[J]. 工程力学, 2013, 35(3): 89-94.
HAN J L, WU D J, LI Q. Calculation and analysis of structural noise of groove beam in urban rail transit[J]. Engineering Mechanics, 2013, 35(3): 89-94.

[10] 张迅. 轨道交通桥梁结构噪声预测与控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZHANG X. Research on noise prediction and control of rail transit bridge structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[11] 张迅, 张健强, 李小珍. 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.
ZHANG X, ZHANG J Q, LI X Z. Hybrid FE-SEA model and test validation for box-girders radiated low-frequency noise[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2): 237-245.

[12] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 288(3): 669-699.

[13] LANGLEY R S, CORDIOLI J A. Hybrid deterministic-statistical analysis of vibro-acoustic systems with domain couplings on statistical components[J]. Journal of Sound & Vibration, 2009, 321(3): 893-912.

[14] LANGLEY R S. On the diffuse field reciprocity relation and vibrational energy variance in a random subsystem at high frequencies[J]. Architectural Institute of Japan, 2007, 12(2): 913-921.



第一作者: 雷晓燕(1956—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为高速铁路轨道动力学, 轨道交通环境振动与噪声。E-mail: xiaoyanlei2013@163.com。



通信作者: 翁凌霄(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为轨道交通环境振动与噪声。E-mail: lingxiaohust@126.com。

(责任编辑: 姜红贵)