

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.215



轨道交通桥梁减振降噪 2020 年度研究进展

李小珍, 郑净, 毕然, 张迅, 罗浩, 曹智扬

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:随着高速铁路与城市轨道交通的快速发展,振动与噪声问题愈发突出。传统直立声屏障对轮轨噪声降噪效果明显,当列车运行速度超过 250 km/h 时,其降噪量不足,为此,我国高速铁路正力推全封闭声屏障的建设。同时,随着钢桥或钢-混组合桥在我国高速铁路和城市轨道交通中逐步得到广泛应用,钢桥或钢-混组合桥的声辐射能力更强,具有频谱宽、幅值大和难控制等特点。因此,在环境敏感区域建造钢桥或钢-混组合桥时,亟待解决其噪声控制问题。围绕“高速铁路声屏障降噪性能与动力特性”和“钢桥减振降噪”两个研究方向,简要评述了该方向的研究动态及发展趋势。

关键词:轨道交通;减振降噪;桥梁结构噪声;声屏障

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0142-10

State-of-the-art review of vibration and noise reduction of rail transit bridges in 2020

LI Xiaozhen, ZHENG Jing, BI Ran, ZHANG Xun, LUO Hao, CAO Zhiyang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: With the rapid development of high-speed railway and urban rail transit, the problems of vibration and noise become more and more prominent. The noise mitigation of traditional vertical sound barrier is obvious on wheel rail noise, but it is insufficient when the train speed exceeds 250 km/h. Therefore, fully enclosed sound barrier is pushed the construction alongside high-speed railway. In recent years, steel bridges or steel-concrete composite bridges have gradually been widely applied in high-speed railway and urban rail transit. Steel bridges or steel-concrete composite bridges have greaterer sound radiation ability, wide spectrum, large amplitude and difficult to control. Therefore, it is urgent to solve the noise radiation issue when steel bridges or steel-concrete composite bridges are built in environmentally sensitive areas. Focusing on the two study directions of "noise reduction performance and dynamic characteristics of high-speed railway sound barrier" and "vibration and noise reduction of steel bridge", the research trends and development trend of this direction are briefly reviewed in this article.

Keywords: rail transit; vibration and noise reduction; bridge-borne noise; sound barrier

本文在《轨道交通桥梁减振降噪 2019 年研究进展》^[1]基础上,围绕“高速铁路声屏障降噪性能与动力特性”和“钢桥减振降噪”两个研究方向,简要评述该方向的研究动态及发展趋势。检索文章主要来自国内外高水平学术期刊,包括:《铁道学报》《交通运输工程学报》《振动与冲击》《西南交通大学学报》《土木工程学报》《中国公路学报》, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *Engineering Structures*, *Applied Acoustics*, *Journal of Sound and*

Vibration 等。

1 高速铁路声屏障降噪性能及动力特性研究

1.1 高速铁路声屏障降噪特性研究

预测声屏障的降噪效果对评估声屏障的声学性能具有重要作用。开展声屏障降噪效果分析,一般包含以下三个方面研究内容:1)列车声源特性;2)安装声屏障前后列车声源的空间分布特性;3)声屏障降噪性能评价。

收稿日期:2021-08-07

基金项目:国家自然科学基金(51878565)

作者简介:李小珍(1970-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事车-桥耦合振动研究,E-mail:zxzhl@swjtu.edu.cn。
郑净(通信作者),博士,E-mail:zhengjing927@163.com。

1.1.1 高速列车声源特性 声源特性研究是高速铁路声屏障降噪分析的前提。通过高速线路噪声实测,可以获得列车声源的构成及其声场分布。一般采用多通道阵列式声源识别系统对声源进行定位、识别和测量,伍向阳^[2]、鞠龙华等^[3]基于我国高铁线路对高速列车声源及其空间分布特征进行现场测试,测试车速范围为 170~380 km/h。

以上研究将高速铁路噪声源按照高度分布,简化为轮轨区、车体、弓网等等效噪声源,并明确了各个位置声源的频谱特性:1)列车底部声源以轮轨噪声为主,等效位置为轨面以上 0.4~1 m,噪声优势频段为 1 000~1 250 Hz;2)列车中部声源以车体气动噪声为主,等效位置为轨面以上 2~2.5 m;主要频率为 1 600~2 000 Hz;3)列车顶部声源以弓网气动噪声为主,等效位置为轨面以上 4.5~6 m,主要频率为 630~1 600 Hz。

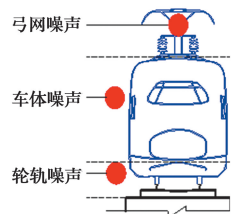
1.1.2 高速列车声源的等效简化 列车声源在空间中的衰减特性通常可看作为多个相干或非相干线声源,也可等效为间距相等的非相干点声源。Jean 等^[4]发现使用相干线声源二维边界元建模会导致对声屏障性能的过高估计,因此,高速列车不同位置处的声源通常近似为三维非相干线源或二维点声源。鞠龙华等^[3]、吴小萍等^[5]采用了多个线声源或点声源来模拟高速列车声源并开展了噪声衰减相关研究,经验证,均能达到满足工程需求的计算精度。

郑净等^[6]对车速 120 km/h 的线路噪声开展了测试,并结合 300 km/h 实测列车声源,将实测高铁列车声源简化为分别位于轨面 0.5 m、2.3 m、4.5 m 以上的轮轨区、车体区、弓网区等效单极子声源(图 1(a)、(b)),并以此作为声源激励建立有无声屏障的高铁桥梁周围扩散声场,开展了全封闭声屏障降噪性能分析(图 1(c)),经验证,均能达到满足工程需求的计算精度。

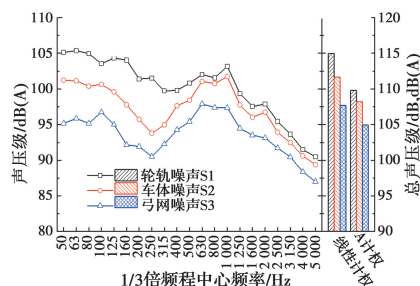
1.1.3 声屏障降噪性分析

(1)现场测试研究

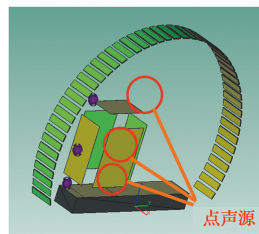
声屏障作为一种声源与接收者之间的隔声结构,无论是在既定的声环境中,还是在设计阶段,都是控制噪声最有效的途径之一。现有研究通过现场测试或数值仿真方法获得声屏障降噪性能的插入损失,并以此来确定声屏障的降噪量。



(a) 高速列车声源



(b) 实测噪声频谱分布



(c) 列车声源简化

图 1 实测列车声源及其等效简化^[6]

伍向阳^[7]和党辉^[8]通过高速铁路沿线声场环境中声压测试获得了我国铁路沿线半封闭、全封闭声屏障降噪效果;邵琳等^[9]在高速铁路的城市低速区段分别选取钢轨阻尼与声屏障组合措施区段、声屏障区段及对照区段 3 处进行了降噪效果对比试验。通过测试,在运行速度低于 150 km/h 时,半封闭声屏障的降噪量约 16 dB(A),全封闭声屏障降噪量为 16~18 dB(A)。郑净等^[6]通过选取高速铁路沿线无声屏障桥梁段、直立声屏障段和全封闭声屏障路段 3 种典型路段,在声场环境中布置典型噪声测点如图 2 所示,开展列车通行时的声压测试,获得了直立声屏障、全封闭声屏障的降噪性能。

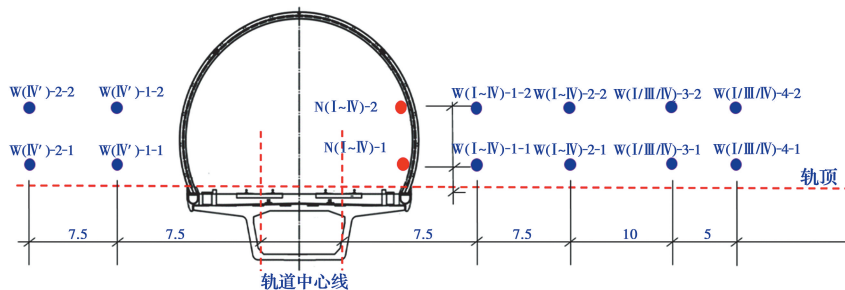


图 2 测点布置示意^[6]

在高铁线路噪声现场测试中,除采用声压法测试外,还可采用声强进行测试。马爱英等^[10]将声强法应用于 3 种不同类型的高速铁路声屏障的隔声测量中,并与声压法的隔声测量结果进行对比分析,讨论了声强法在高速铁路声屏障隔

声测量中的优势。研究表明,声强法能直观地检测出声屏障存在的漏声点,能为高速铁路声屏障的精细设计提供支撑,为高速铁路异型声屏障测量、现场隔声测量提供依据。

以往测试研究表明,传统直立声屏障的高度主要在

2~3.5 m 的范围内,主要用于控制轮轨噪声带来的影响。Kholodov 等^[11]研究发现在声屏障顶部设置锯齿形吸声结构可以增大插入损失,顶部构造对降噪效果的影响主要与锯齿幅度、波长和形状曲线有关。Kim 等^[12]基于 Lighthill 方程,提出了考虑随机空气声源的声屏障形状拓扑优化方法,克服了 Helmholtz 方程只考虑简单声源的限制,设计了优化后的顶部结构,在 50~350 Hz 频率范围内,其插入损失可比相同高度直立声屏障高 3~4 dB。

直立声屏障降噪效果有限,部分学者还从如何提高声屏障板件的隔声性能角度开展了研究。Xiao 等^[13]提出了非线性双曲相位的干涉表面形式,显著地提高了直立声屏障的插入损失。王建辉等^[14]通过对 FAC 吸声材料进行系统性的研究,确定了其可改善声屏障内部 1 000 Hz 以内噪声的吸声性能。在采用周期结构进行噪声控制方面,秦晓春等^[15]针对高速公路噪声特性设计了三种人工周期声屏障,并分析了各自的能带结构。结果表明,3 种形式均可以产生阻带;对散射体进行开口处理可以有效增加低频阻带的宽度;随着散射体数量增多增大,阻带总宽度增大。

(2) 数值预测

数值仿真方法可近似模拟高速铁路多声源及其复杂频谱、各种声屏障结构形式和声学边界条件,在预测声屏障降噪性能的应用研究中获得广泛运用。目前,针对声屏障降噪性能的研究,应用较多的理论方法主要包括边界元法(BEM)和统计能量分析法(SEA)。

Li 等^[16]利用 2.5 维边界元法建立了近封闭声屏障的仿真模型,在不同数量非相干点声源作用下,模拟了声屏障的声学性能,详细地描述了声场的声学环境,结果表明,声衰减约为 10~15 dB。范静等^[17]采用边界元法对比计算了城际线路近轨 C 型和近轨直立声屏障的降噪效果。Wang 等^[18]利用二维边界元法对直立声屏障顶部栅格排列方式进行了分析,结果表明,在 400 Hz 以上的宽频带内,声场内所有噪声观测点均受其布置方式的影响,其中,以从声源往外声场方向栅格由浅到深的布置方式最为有效。Mostafa 等^[19]基于边界元法对声屏障进行了优化设计。

统计能量分析法用统计的概念研究多个子系统间能量的传递与平衡,作为预测高模态密度的中、高频结构传声或空气传声问题的有效方法,被广泛运用于航空、高速列车、铁路钢桥的噪声分析中,目前也用来预测声屏障的插入损失。周强等^[20]利用统计能量法对半封闭声屏障声学性能进行了预测分析,其降噪效果比传统直立声屏障高 2.9~5.7 dB(A),内部的多重反射会带来 2~3 dB(A)的噪声增值,是封闭式声屏障的一大弊端。Li 等^[21]建立了桥梁-声屏障体系 SEA 仿真模型(如图 3 所示),对直立声屏障展开了详细的参数分析,定量分析了材料、高度、结构、声泄露对声屏障插入损失的影响。结果表明,5 m 高直立声屏障的插入损失约为 12 dB(A),在 3~4 m 区间内增加声屏障的高度获得的附加插入损失最大,结构形式的不同对 200 Hz 以上噪声控制影响较大,而材料组成则主要影响 100~1 000 Hz 频率范围内

的插入损失值。

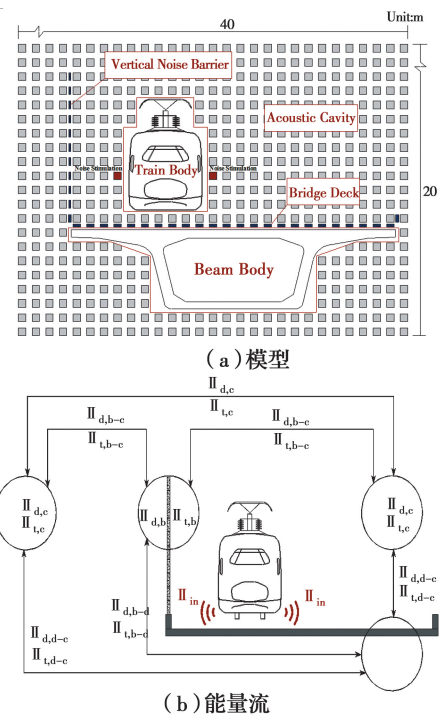


图 3 声屏障-桥梁 SEA 仿真^[21]

1.2 声屏障车致振动噪声

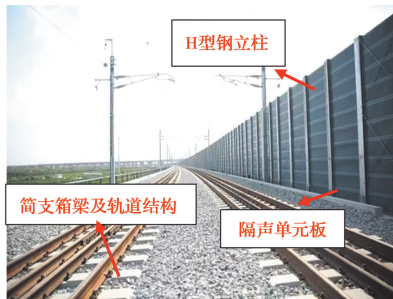
声屏障,尤其是全封闭声屏障对列车声源的高频成分降噪性能较好,在全封闭声屏障外部声场中以中低频噪声为主,需考虑同为中低频的桥梁-声屏障振动噪声的影响。

桥梁-声屏障系统在移动列车动态轮轨力作用下产生振动并向外部辐射噪声。首先需开展桥梁-声屏障的车致振动分析,并以此作为边界条件,开展桥梁-声屏障的振动噪声分析,预测声屏障对外部噪声场点声场的贡献量。

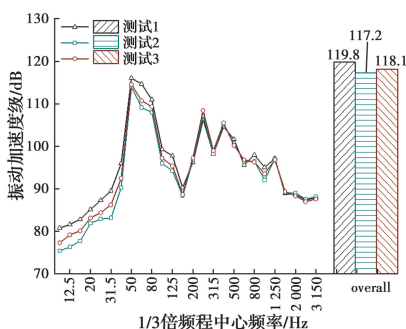
1.2.1 桥梁-声屏障的车致振动 列车致桥梁-声屏障的振动研究以车-线-桥耦合振动理论为基础,以轮轨接触不平顺条件为耦合系统的激励源,将车辆视为由车体、转向架、一系悬挂、二系悬挂和轮对组成的多体系统,将轨道结构视为等截面梁,分别建立子系统耦合模型,求解车辆、轨道动力学方程,发现轮轨接触处的动轮轨作用,再将其施加在桥梁-声屏障有限元模型上以获得声屏障的振动响应。

采用现有振动测试手段可获得桥梁-声屏障的振动响应,以此验证桥梁-声屏障结构振动理论与数值预测。谢伟平等^[22]以某城市轨道交通高架线为工程背景,实测列车在直线段和曲线段行驶时半封闭式声屏障的加速度响应,并基于车-线-桥耦合振动理论,建立车-曲线桥-声屏障结构振动分析模型,分析了高架桥曲率对声屏障车致振动的影响规律,结果表明,城市轨道交通高架线曲线段半封闭式声屏障的车致振动响应大于直线段,以横向振动为主,优势频段为 70~140 Hz,横向振动位移峰值与曲率呈线性正相关。李小珍等^[23]以 32 m 混凝土简支箱梁上直立声屏障为研究背景,现场测试了列车通过时桥梁跨中断面处钢轨、箱梁和声屏障立柱的振动加速度,见图 4。基于车-线-桥耦合振动理

论,建立了桥梁-声屏障耦合振动分析模型,探讨了行车速度、行车方向等参数对声屏障振动响应的影响。结果表明:声屏障立柱底部和中部的振动具有相似的频谱特性,优势频段均为50 Hz;立柱的振动从梁端向跨中逐渐增大,同一断面内,顶部最为剧烈、底部次之、中部最小。



(a) 试验照片



(b) 立柱根部振动

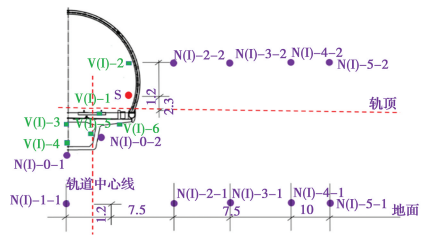
图4 铁路桥上直立式声屏障车致振动测试^[23]

1.2.2 桥梁-声屏障的结构噪声 结构振动并向外部辐射噪声,需建立无限大的流体包围网络,并需要在最外层边界加入无反射边界条件。基于积分方程的边界元方法(BEM)

能够自动满足声学波动问题在无限远处的辐射边界条件,因此,BEM在轨道交通混凝土桥梁结构声辐射领域取得了一定的研究成果。

Song等^[24]基于波导有限元法和二维边界元法,提出了轨道交通桥梁振动噪声的快速预测方法,并以广州地铁六号线3×40 m连续刚构箱梁振动噪声测试结果验证了该预测方法,使得计算效率大大提高。张晓芸等^[25]分析了高架桥梁直立式声屏障的结构噪声,表明直立式声屏障辐射噪声主要集中在低频范围。此研究主要采用数值分析,但缺乏噪声试验验证。

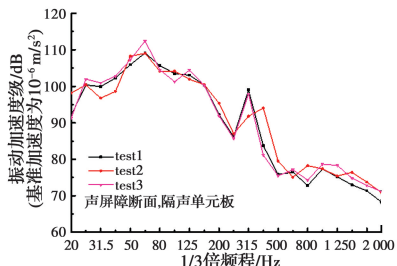
当桥梁上安装声屏障,尤其是高铁桥梁上部安装全封闭式声屏障时,结构体型较大,采用传统边界元算法求解会占用大量的时间,随着分析频率增高,甚至无法进行准确的计算。为提高效率,也可开展快速多极子边界元仿真分析。郑净等^[26]开展了系统的高速铁路全封闭式声屏障振动、噪声测试,建立了高铁桥梁-全封闭式声屏障的振动噪声分析的快速多极子边界元模型并开展了研究。结果表明:板件的振动与结构噪声频谱规律基本一致;受全封闭声屏障隔声作用和梁体的遮蔽作用,全封闭式声屏障下部箱梁底板表面的测试噪声基本反映了底板的结构噪声特性,其余测点则不同程度受到其他板件辐射噪声或者轮轨噪声的影响,主要测试过程和结论如图5所示。结果表明:全封闭声屏障的安装导致桥梁板件的振动及噪声均减小,也改变了桥梁上部声场分布,桥梁下方的总声级降低0.8 dB,梁体斜上方噪声降低近9.6~18.1 dB,全封闭声屏障顶部局部区域结构噪声大于无屏障断面约12.4 dB以上;FMBEM计算耗时仅为传统边界元的1/3,计算更高效。



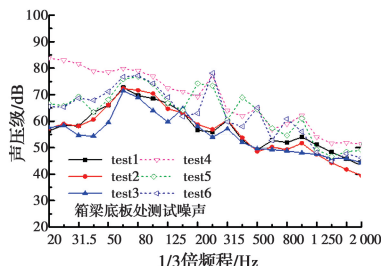
(a) 振动(V)、噪声(S)测点



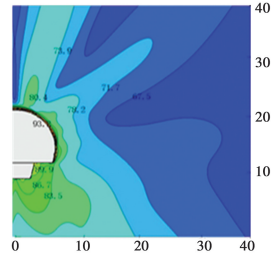
(b) 试验照片



(c) 实测单元板振动



(d) 有无声屏障梁底噪声



(e) 全封闭声屏障振动噪声云图

图5 全封闭声屏障振动噪声试验与FMBEM数值分析^[26]

1.3 声屏障车致脉动压力波特性

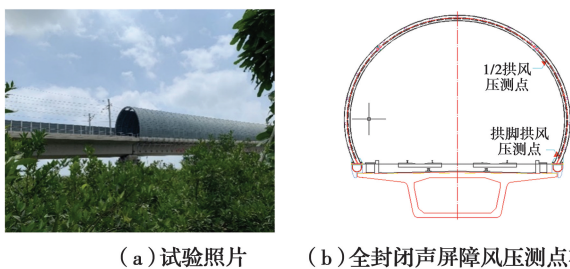
对于高铁线路上的声屏障,列车风引起的声屏障表面脉动压力波突出,例如,现有测试显示其已超过1 000 kPa^[27]。声屏障由此产生突出的动力问题会威胁高速列车行车安全。

为了获得高铁线路声屏障上列车风致脉动压力波作用,王言聿等^[28]在津秦高铁线路上开展了直立式声屏障表面的脉动压力波测试。Luo等^[29]、Du等^[30]描述了采用不同缩尺比的列车动模型实验测量高铁轨道附近声屏障及沿线类

似构造物的脉动压力波规律。何旭辉等^[31]、何佳骏等^[32]基于数值仿真分析得到了列车穿过全封闭声屏障时脉动压力波的时程。赵允刚等^[33]、吕明等^[34]采用了线路实测、风洞测试数值模拟等方法研究了叶片形状为倒 V 形的金属隔声板等间隔排列而成的透风型声屏障表面脉动压力波特性,并将其与传统直立式声屏障对比,声屏障对列车脉动压力波存在的减载性能。

以上研究展示了高速列车通过不同声屏障时的表面脉动压力波时程特性。直立式声屏障内表面脉动压力波时程主要由列车头车产生的正负压快速变化的“头波”、中间车厢小幅度压力波动及列车尾车产生的由负压到正压的“尾波”构成,在声屏障高度方向的脉动压力波的正压峰值分布不均匀,随高度逐渐减小;声屏障上隔声板透风时,脉动风压的峰值明显降低并沿着高度方向均匀分布;全封闭声屏障内部的脉动压力波时程是由头车产生的“压缩波”和“膨胀波”及二者在封闭空间内部的反射波构成的。

李小珍等^[35]在高铁线路直立式声屏障路段和全封闭声屏障段开展了脉动压力波测试,如图 6 所示,获得了直立式声屏障、封闭式声屏障入口处及有“泄露”的封闭式声屏障的脉动压力时程分布。



(a) 试验照片 (b) 全封闭声屏障风压测点布置

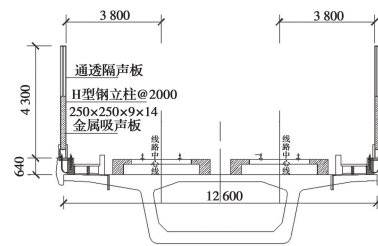
图 6 列车通过不同声屏障断面时的脉动压力波试验研究^[35]

为获得高速条件下声屏障内部的脉动压力波特性,李小珍等^[36]建立了列车通过不同声屏障的 ICEM 几何形状,选取适宜尺寸的计算域,设定边界类型以及生成网格,然后利用 Fluent 求解器,通过定常分析,考虑空气的压缩性,采用 SIMPLE 算法及 SST $k-\omega$ 湍流模型,求解压力耦合,动量、连续性、湍动能、能量及耗散率等项均采用二阶迎风进行离散,最后获得了 400 km/h 车速下不同声屏障在单车形式和双车交会工况下的脉动压力波分布。主要计算模型与结果见图 7。

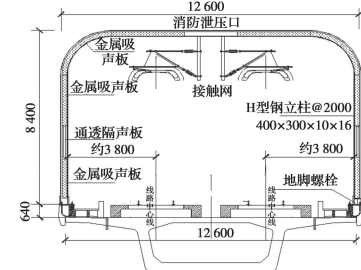
2 钢桥减振降噪

2.1 声振预测及噪声特性

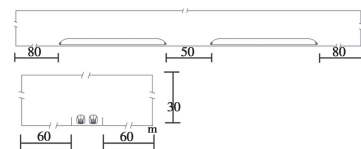
宏观上讲,不同桥型的声振特性存在差异性,厘清这些差异性有助于开展纵深研究。为此,张迅等^[37]首次对国内外有关桥梁区段噪声测试的试验进行了梳理,将桥梁区段的噪声测点方案归纳为 5 类(图 8)。基于我国 4 座高速铁路桥梁(2 座混凝土简支箱形梁、1 座混凝土简支槽形梁和 1 座钢-混组合连续板梁)的噪声实测数据,对噪声的频谱特性和空间分布规律,以及与梁型、车型和车速的关系进行了分析和讨论。结果表明:高速铁路桥梁区段的路旁噪声呈现宽频特性,4 条



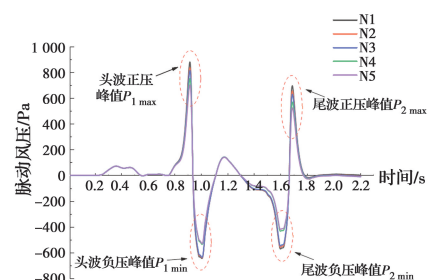
(a) 桥上直立式声屏障



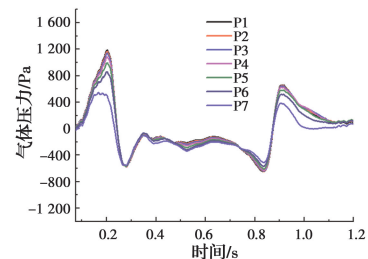
(b) 顶部不同开口宽度全封闭声屏障



(c) 声屏障表面脉动压力波数值分析模型



(d) 400 km/h 单车通行



(e) 400 km/h 双车交会

图 7 列车通过不同声屏障断面时的脉动压力波数值分析^[36]

测试线路,3 种桥型的共同显著频段为 200~3 150 Hz,且钢-混组合梁的噪声显著频段最宽;中高频噪声对桥侧混合噪声(含其他噪声源)起决定作用,故混凝土梁的低频结构噪声可忽略不计;在 400 Hz 以下频段,钢-混组合梁的结构噪声远大于混凝土箱形梁,差值最大可达 15.3 dB(A)。

对于钢桥结构噪声预测,目前多采用“两步走”思路,即第一步是得到桥梁的车致振动响应;第二步是基于已求得的桥梁振动响应计算声辐射^[38]。车致振动响应的频域解法效率较高,且理论上任何复杂桥梁均可通过有限元建模,这种方法的实际应用最多。对于钢桥的中高频振动响应,由于在所关注频率范围内的振动模态密集,模型单元数急剧增加,

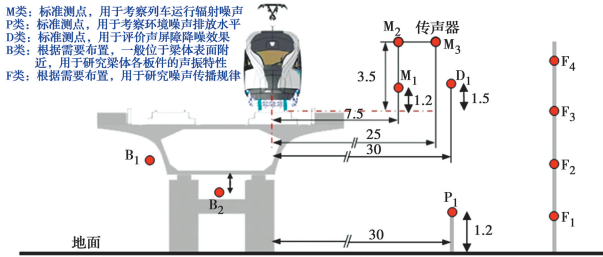


图 8 桥梁区段噪声测试方案(单位:m)^[38]

此时有限元法的求解效率降低,则统计能量分析成为不二之选。对于由复杂板子系统所组成的钢结构桥梁(如钢桁梁),可采用统计能量分析得到各子系统的振动速度,再依据矩形面声源传播公式进行噪声分析。典型统计能量分析软件(如 VA One)中的半无限流体模型即采用类似的方法。2020 年,上述预测思路在一些钢-混组合连续板梁桥、大跨度钢桁梁斜拉桥和钢-混组合箱形梁的声振预测中得到了具体应用。

(1) 钢-混组合连续板梁桥

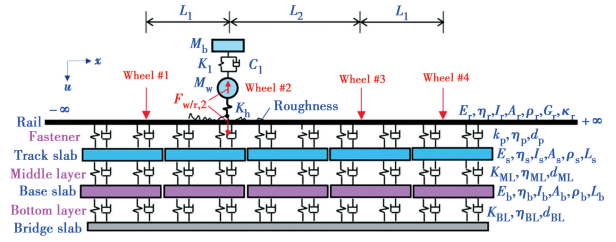
针对钢-混组合连续板梁桥的车致振动噪声, Liu 等^[39]采用混合有限元-统计能量分析方法(Hybrid FE-SEA)进行了预测,研究对象为(32+40+32) m 钢-混组合连续板梁桥。首先在频域内通过列车-轨道解析分析获得传递到桥面板的振动荷载,再分别采用板单元和板子系统对混凝土桥面板和钢板梁进行建模,以达到预测精度和计算效率之间的平衡。仿真结果显示,此类桥梁的结构噪声随车速 v 的增加近似服从 $20\lg(v)$ 的增长规律;在距轨道中心 0.3 倍主跨跨径范围内,主跨跨中断面的结构噪声受邻跨的影响极小。此外, Liu 等^[40]还采用动柔度法计算了桥梁的输入功率,再借助功率平衡方程计算桥梁各板件的振动响应,继而将各板件视为面声源进行了噪声预测。此外,还讨论了粗糙度相位、轮轨交叉柔度、桥梁柔度的影响规律,以简化面向噪声预测的车-轨-桥耦合作用仿真分析。

(2) 大跨度钢桁梁斜拉桥

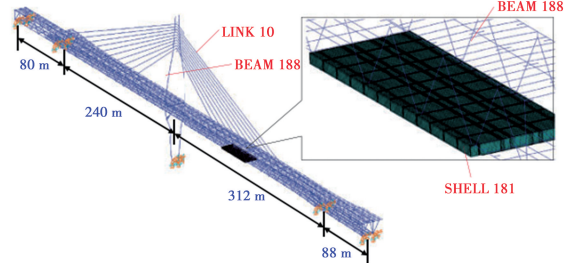
针对大跨度钢桁梁斜拉桥, Liang 等^[41]首先采用与文献^[39]类似的方法计算桥梁的输入功率,再基于统计能量分析软件中的板子系统、半无限流体进行噪声预测。总的来说,统计能量分析存在难以确定控制参数的缺点,而有限元分析相对容易且精度较高。为此, Zhang 等^[42]推导了具有三层轨道结构的列车-轨道解析模型,以便对轨道减振性能进行精细分析;同时,采用混合有限元方法对桥面体系的局部振动及分布规律进行了分析(图 9)。结果表明:桥面板、纵梁和横梁的显著振动频率为 31.5~125 Hz,桥梁结构噪声主要分布在 40~500 Hz 范围;相比弦杆、纵梁和横梁而言,桥面板是主要的噪声来源,故在噪声控制中应予以优先考虑。

(3) 钢-混组合箱形梁

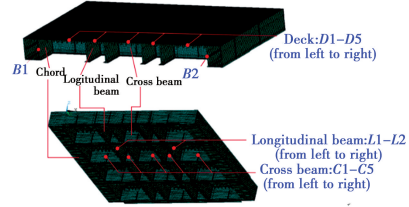
近年来,钢-混组合箱形梁以其优良的力学性能和便捷的施工方法在世界范围内得到快速发展,我国高速铁路和城市轨道交通中也开始将其应用于中大跨度桥梁^[43-46]。针对此类桥梁的结构噪声问题,由于混凝土桥面板与钢箱的结构尺寸、材料属性和模态特征存在显著差异,阮灵辉^[47]基于“分



(a) 车线桥耦合分析



(b) 有限元模型



(c) 测点布置

图 9 大跨度钢桁梁斜拉桥的声振分析^[42]

频预测”的思想提出了混合有限元-边界元-统计能量分析方法(Hybrid FE-BE-SEA)。以某 40 m 钢-混组合箱形梁为对象,在 400 Hz 以下采用 FE-BE 进行声振分析,在更高频段则采用 SEA 进行分析。然而,这一预测方法的有效性还有待进一步的试验验证。

(4) 钢箱梁

从本质上讲,钢桥结构噪声来源于幅面尺寸较大的板件的局部弯曲振动^[37]。加劲板是钢箱梁的典型板件,因此对加劲板的声振特性进行研究具有重要意义。张迅等^[48]率先以 U 肋加劲板为对象,设计制作了一足尺 U 肋加劲板结构,通过锤击激励获得不同位置的振动和噪声响应,并采用混合有限元-边界元模型预测其声振响应。进一步地,张迅等^[49]针对某钢箱梁节段(长×宽×高:10.1 m×4.8 m×3.1 m),从统计能量分析参数和声振响应两方面展开了研究(图 10)。刘蕊^[50]基于能量法和瑞利积分法求解了集中谐波荷载作用下加劲板的振动和声辐射,从荷载和结构两个角度探讨了不同荷载作用位置、边界条件的影响规律;分析了不同参数下加劲板的振动和声辐射变化规律。上述研究成果对钢箱结构尺寸和构造的声振优化设计具有积极意义。

需要指出的是,钢箱梁本质上为复杂的加劲板耦合系统,工程中常见的加劲肋形式有板肋、倒 T 肋和 U 肋等,且多采用周期性布置(包括横隔板或横肋)。在中高频段,加劲板中的弯曲波波长与加劲肋周期间距相当或更小,因此必须充分考虑结构的周期性。然而,现有研究中所采用的经典统计能量分析方法在处理此类结构时,由于其方法本身的局限和

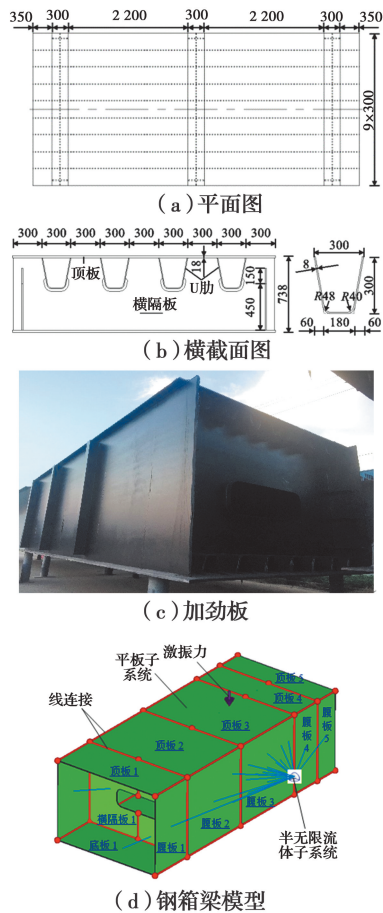


图 10 U 肋加劲板和钢箱梁模型(单位:mm)^[48-49]

周期结构特有的动力学特性,预测结果可能产生显著的误差。为此,张迅等^[51]、罗浩等^[52]以 U 肋加劲板为例进行了初步探索(图 11),对弯曲波带隙特征及其影响参数获得了基本认识。这一视角的进一步研究可以深化对钢箱梁声振行为的认识,并有助于提升传统统计能量分析方法的预测精度。

2.2 声振控制策略

总体上,声振控制无外乎三条途径:从振源(声源)入手、在传播过程进行控制和对受振体(受声体)进行处理。纵观理论和工程实践,可行的桥梁减振降噪方法大体可按桥面减振轨道、桥面吸(隔)声装置、梁体优化设计和构件附属装置等进行划分。针对列车在钢桥上运行时的噪声特点,张迅等^[37]提出降能、抑振、阻噪“三位一体”综合减振降噪策略——“降能”是指降低由轨道结构传递到钢桥的振动能量;“抑振”是指在能量输入既定的情况下,耗散钢桥构件的振动响应;“阻噪”是指在噪声源不变的情况下,阻断噪声在空气中的传播。这一策略是系统解决铁路钢桥噪声的必经途径。

在近年来的减振降噪实践中,一旦涉及振动噪声问题,就在“轨道减振”和“声屏障降噪”上做文章,使得减振轨道的铺设比例逐年上升,甚至不惜使用全封闭式声屏障。然而,减振轨道并非万能,有些仅在有限的频段范围内有效,有些反而会引发新的问题(如:钢轨异常波磨、扣件松动、轨道板开裂等);全封闭式声屏障仅能解决桥面以上的噪声源,但在养护维修及城市景观方面颇受诟病。当前,各种新型减振轨

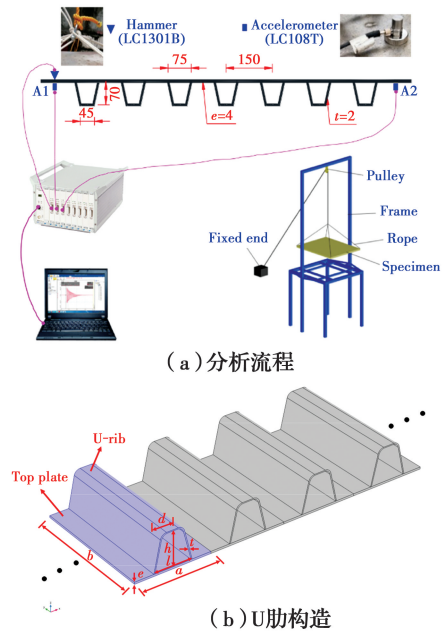


图 11 U 肋加劲板的弯曲波带隙特性研究^[51-52]

道、声屏障、轨道吸音板等的研发正在如火如荼地进行,此处主要讨论了与桥梁结构紧密相关的减振降噪方法。

2020年,Liu等^[53-54]对约束阻尼板粘贴于 H 形钢梁和实际钢-混组合连续板梁桥的减振降噪性能开展了模型试验和数值仿真,取得了较为理想的效果。除约束阻尼板外,颗粒阻尼技术近年来被引入土木工程领域,但当前主要集中在抗风、抗震等应用中^[55]。为此,张迅等^[56]、孔德睿等^[57]首次提出了一种用于钢箱梁减振降噪的新方法——利用 U 肋的天然空腔填充颗粒阻尼(图 12)。初步研究表明:颗粒阻尼对 U 肋加劲板具有较好的减振降噪效果;在较宽频带下,填充颗粒阻尼后的试件振动衰减显著,各频段阻尼损耗因子平均提高至原结构的 2~2.5 倍;均匀填充率为 10%时,总声功率级降低约 3.2 dB(A)。

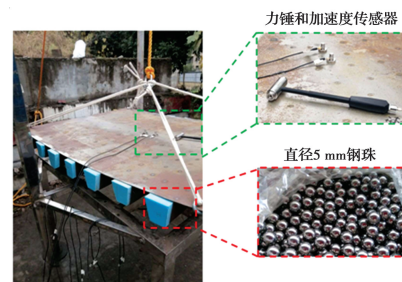


图 12 颗粒阻尼试验照片^[57]

针对钢-UHPC(超高性能混凝土)这一新型组合桥面体系,Zhang等^[58]从声振特性角度开展了足尺模型试验研究,重点关注了 6 方面的问题:1)激励特性对结构声振响应的影响;2)UHPC 层对振动传递的影响;3)大 U 肋的振动特性;4)横隔板对结构振动的影响;5)桥面板不同部件中的振动传播规律;6)桥面板不同部件的阻尼特性。同时,采用数值方法对比了钢-UHPC 桥面、传统正交异性钢桥面和钢-普通混凝土桥面三种体系的动力差异性(图 13)。

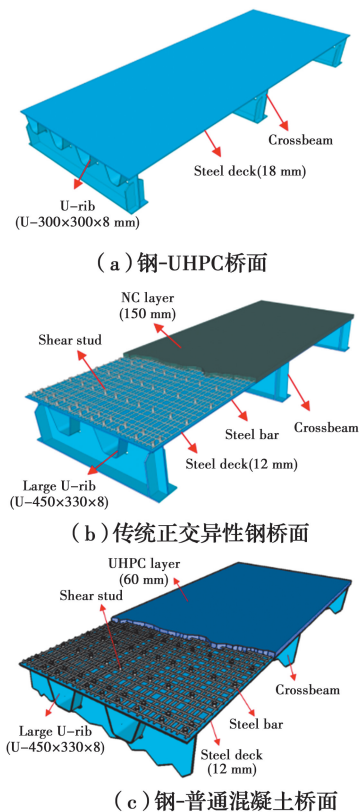


图 13 3 种桥面体系^[58]

应该指出:在实际工程中,有关桥梁结构的材料、构造和尺寸等任何变化均可能带来结构承载力、稳定性和抗疲劳性能等的变化,所以在对具体工程进行减振降噪分析时应充分考虑到这一点。

3 结论

1) 减载、降噪性能良好的高铁桥上新型声屏障

由于高速列车风致声屏障表面脉动压力冲击作用显著,已有研究表明,通风型声屏障对脉动压力的卸载作用明显,因而兼顾降噪与减载作用的高铁通风型声屏障研究是未来声屏障的发展方向之一。

2) 高铁桥梁-全封闭声屏障结构体系噪声传播的高效预测方法

由于高铁桥上全封闭声屏障的尺寸较大,内部列车声源呈宽频范围分布,且高频噪声成分显著;另外,高铁桥梁声屏障的振动噪声频率成分分布多分布在 200 Hz 以下的中低频,因此,当研究桥梁声屏障的空气传声及结构传声规律时,需考虑分析研究的截止频率。现有边界元算法随着分析频率升高和结构体型增大,分析效率降低且难以达到分析精度,需发展高铁桥梁-全封闭声屏障结构体系噪声传播的高效算法。

3) 高铁桥上声屏障低频噪声控制

传统直立声屏障、封闭式声屏障在中高频降噪性能良好,但随着列车速度提高,声屏障自身振动与二次噪声问题越来越严重。有必要基于声学超材料、噪声主动控制等技术来改善声屏障的低频降噪性能,研发新型减载式声屏障,并

应用于高速铁路或轨道交通桥梁。

4) 精准的钢桥声振控制措施

当前,在桥梁结构层面施行的声振控制措施主要是结构设计及参数优化、阻尼处理等传统的声振控制手段。各控制手段在应用中仍有一些问题有待于进一步解决,例如:低频声振控制、控制频段的拓宽、控制效果的增强、附加成本的降低以及声振综合控制等方面。针对这些问题,一方面可以通过发展上述技术本身来解决或改善;另一方面就需要探索新的振动与噪声控制方法,开发新型减振降噪材料/结构,实现对钢桥结构噪声的精准控制。

参考文献:

- [1] 李小珍,郑净,宋立忠,等. 轨道交通桥梁减振降噪 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 223-234.
- [2] 伍向阳. 高速铁路运动声源几何发散模型及声屏障插入损失计算方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
- [3] 鞠龙华,葛剑敏,郭彦婕. 基于多声源模式的高速铁路噪声预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 58-63.
- [4] JEAN P, DEFRANCE J, GABILLET Y. The importance of source type on the assessment of noise barriers [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(2): 201-216.
- [5] 吴小萍,费广海,廖晨彦. 双声源模式下高铁声屏障降噪效果仿真分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 49-54.
- [6] 郑净,刘德军,李小珍,等. 高铁桥梁全封闭声屏障降噪性能试验与数值研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 152-161.
- [7] 伍向阳. 铁路全封闭声屏障降噪效果试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 177-181.
- [8] 党辉. 京沈客运专线全封闭声屏障设计与研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2020, 10(4): 8-12.
- [9] 邵琳,李晏良. 钢轨阻尼与声屏障组合降噪效果试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 157-159.
- [10] 马爱英,汪臻. 声强测量在高铁声屏障检测中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2666-2671.
- [11] KHOLODOV P, MOREAU S. Optimization of trailing-edge serrations with and without slits for broadband noise reduction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 490: 115736.
- [12] KIM K H, YOON G H. Aeroacoustic topology optimization of noise barrier based on Lighthill's acoustic analogy [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 483: 115512.

- [13] XIAO Y, LAI H L, LI Q, et al. Improved interference-type sound barriers: Use of hyperbolic phase modulation [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 161: 107186.
- [14] 王建辉, 李沛沛. 聚合物-粉煤灰陶粒多孔降噪声屏障材料制备及影响因素分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(5): 27-37.
- [15] 秦晓春, 倪安辰, 韩莹, 等. 声子晶体型高速公路声屏障的降噪性能[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5493-5501.
- [16] LI Q T, DUHAMEL D, LUO Y Y, et al. Analysing the acoustic performance of a nearly-enclosed noise barrier using scale model experiments and a 2.5-D BEM approach [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 158: 107079.
- [17] 范静, 张捷, 杨妍, 等. 城际列车 C 型近轨声屏障降噪效果预测分析[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(2): 188-193, 206.
- [18] WANG Y P, JIAO Y H, CHEN Z B. Effect of layouts of wells and the walls of wells on noise reduction effect [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 145: 228-233.
- [19] MOSTAFA SHAABAN A, ANITESCU C, ATROSHCHENKO E, et al. Shape optimization by conventional and extended isogeometric boundary element method with PSO for two-dimensional Helmholtz acoustic problems [J]. *Engineering Analysis With Boundary Elements*, 2020, 113: 156-169.
- [20] 周强, 张迅, 郝晨曦, 等. 高速铁路半封闭声屏障声学性能的现场实测及预测模型[J]. *铁道学报*, 2020, 42(9): 127-133.
- [21] LI X Z, HU X H, ZHENG J. Statistical energy method for noise reduction performance of the vertical noise barrier alongside railway bridges [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 170: 107503.
- [22] 谢伟平, 胡喆, 张良涛, 等. 城市轨道交通高架桥曲率对半封闭式声屏障车致振动影响研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(24): 128-133.
- [23] 李小珍, 雷康宁, 龚振华, 等. 铁路桥上直立声屏障车致振动研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 88-95, 119.
- [24] SONG L Z, LI X Z, ZHENG J, et al. Vibro-acoustic analysis of a rail transit continuous rigid frame box girder bridge based on a hybrid WFE-2D BE method [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 107028.
- [25] 张晓芸, 石广田, 王开云, 等. 高速铁路箱梁桥-声屏障结构振动噪声初探[J]. *兰州交通大学学报*, 2020, 39(2): 76-84.
- [26] 郑净, 李小珍, 毕然, 等. 高速铁路桥梁全封闭声屏障结构噪声特性[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(3): 179-192.
- [27] ZOU Y F, FU Z Y, HE X H, et al. Wind load characteristics of wind barriers induced by high-speed trains based on field measurements [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(22): 4865.
- [28] 王言聿, 郭旭, 成志强. CRH3 动车组高速出入声屏障时压力场特性的试验研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(4): 1528-1533, 1858.
- [29] LUO C Y, ZHOU D, CHEN G, et al. Aerodynamic effects as a maglev train passes through a noise barrier [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2020, 105(3): 761-785.
- [30] DU J, ZHANG L, YANG M Z, et al. Moving model experiments on transient pressure induced by a high-speed train passing through noise barrier [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 204: 104267.
- [31] 何旭辉, 郭柯桢, 杨斌, 等. 高速铁路 840 m 全封闭声屏障气压荷载数值模拟研究[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(3): 137-144.
- [32] 何佳骏, 向活跃, 曾敏, 等. 高速铁路桥梁全封闭声屏障列车压力波荷载的数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(20): 175-182.
- [33] 赵允刚, 王鑫涛, 赵晋, 等. 减载式声屏障对高速列车气动阻力影响分析[J]. *北京交通大学学报*, 2020, 44(1): 77-83.
- [34] 吕明, 李强, 宁智, 等. 高速铁路减载式声屏障气动荷载特性的试验研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(10): 106-112.
- [35] 李小珍, 郑净, 毕然, 等. 350 km/h 桥上半封闭式声屏障关键技术研究[R], 2020.
- [36] 李小珍, 郑净, 毕然, 等. 400 km/h 高速铁路减振降噪关键技术研究: 声屏障优化研究[R], 2020.
- [37] 张迅, 刘蕊, 阮灵辉, 等. 铁路钢桥结构噪声的研究进展[J]. *铁道学报*, 2019, 41(1): 126-137.
- [38] 李茜, 张迅, 张金瑞, 等. 基于实测数据的典型高速铁路桥梁区段噪声对比[J]. *铁道标准设计*, 2020. (已录用, 待出版)
- [39] LIU Q M, THOMPSON D J, XU P P, et al. Investigation of train-induced vibration and noise from a steel-concrete composite railway bridge using a hybrid finite element-statistical energy analysis method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 471: 115197.
- [40] LIU Q M, LIU L Y, CHEN H P, et al. Prediction of vibration and noise from steel/composite bridges based on receptance and statistical energy analysis [J]. *Steel and Composite Structures*, 2020, 37(3): 291-306.
- [41] LIANG L, LI X Z, ZHENG J, et al. Structure-borne

- noise from long-span steel truss cable-stayed bridge under damping pad floating slab: Experimental and numerical analysis [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 106988.
- [42] ZHANG X, CAO Z Y, RUAN L H, et al. Reduction of vibration and noise in rail transit steel bridges using elastomer mats: Numerical analysis and experimental validation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2021, 235(2): 248-261.
- [43] 姚南. 时速 400 km 高速铁路 50 m 跨钢-混凝土结合梁设计[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(Sup1): 172-176.
- [44] 杨永明, 李彦博. 京张高铁应急抢修简支钢-混结合梁设计应用[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(1): 199-203, 219.
- [45] 杨得旺, 严爱国, 曾甲华. 沪苏湖铁路虹七特大桥钢-混结合连续梁设计[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(Sup1): 68-72.
- [46] 姜越鑫, 赵欣欣, 陶晓燕, 等. 中大跨高速铁路简支组合梁设计研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(3): 111-116.
- [47] 阮灵辉. 列车激励下钢箱结合梁的振动噪声研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [48] 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.
- [49] 张迅, 曹智扬, 孔德睿, 等. 钢箱梁的声振特性及影响因素研究[J]. *中国公路学报*, 2020. (已录用, 待出版)
- [50] 刘蕊. 正交异性钢桥面板的声振特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [51] 张迅, 郝晨曦, 罗浩. 钢箱梁的声振特性: 对板件带隙行为的初步认识[R]. 上海: 第 3 届轨道交通噪声与振动环境影响青年学者论坛, 2020.
- [52] 罗浩, 张迅. 钢桥结构噪声研究新进展[R]. 成都: 2020 深水大跨桥梁新进展研讨会, 2020.
- [53] LIU Q M, LI X Z, XU P P, et al. Acoustic radiation and dynamic study of a steel beam damped with viscoelastic material [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(7): 2132-2146.
- [54] LIU Q M, LI X Z, ZHANG X, et al. Applying constrained layer damping to reduce vibration and noise from a steel-concrete composite bridge: An experimental and numerical investigation [J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2020, 22(6): 1743-1769.
- [55] 闫维明, 王宝顺, 黄绪宏. 颗粒阻尼器的研究进展及其在土木工程中的应用展望[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(5): 32-41.
- [56] 张迅, 孔德睿, 刘子琦, 等. 一种颗粒阻尼装置及具有该颗粒阻尼装置的钢箱梁: CN212155605U[P]. 2020-12-15.
- [57] 孔德睿, 张迅, 刘子琦. 基于颗粒阻尼的 U 肋加劲板减振降噪初探[J]. *噪声与振动控制*, 2020. (已录用, 待出版)
- [58] ZHANG X, LI X, LIU R, et al. Dynamic properties of a steel-UHPC composite deck with large U-ribs: Experimental measurement and numerical analysis [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110569.

(编辑 崔守奎)