

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.120

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



轨道交通桥梁减振降噪 2019 年度研究进展

李小珍¹, 郑净¹, 宋立忠², 梁林¹, 朱艳¹, 张迅¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013)

摘要:列车通过高架桥梁时,振动能量通过轨道结构传递到桥面及其他桥梁构件,激发桥梁振动并向空中辐射噪声,这被称为“桥梁结构噪声”。近年来,随着高速铁路和城市轨道交通的迅猛发展,轨道交通桥梁结构噪声预测方法、产生机理及控制措施研究已成为一个热门研究方向。另外,随着桥上声屏障的广泛应用,其降噪性能、振动及二次结构噪声特性研究也成为热门研究方向。梳理了近一年来轨道交通桥梁及桥上声屏障的振动噪声相关研究,总结了当前的研究热点,展望了未来的发展趋势。

关键词:轨道交通;桥梁结构噪声;声屏障;减振降噪;研究进展

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0223-12

State-of-the-art review of vibration and noise reduction of rail transit bridges in 2019

Li Xiaozhen¹, Zheng Jing¹, Song Lizhong², Liang Lin¹, Zhu Yan¹, Zhang Xun¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: When the train passes through a viaduct bridge, the vibration energy is transmitted to the bridge deck and other bridge components through the track structure, which gives rise to bridge vibration. The vibrating bridge radiates noise into the air, which is known as bridge-borne noise. In recent years, with the rapid development of high-speed railway and urban rail transit, the prediction methods, generation mechanisms and control measures of rail transit bridge-borne noise have become hot research topics. In addition, with the wide application of the sound barriers on bridges, the noise reduction performances, vibration and secondary structure-borne noise characteristics of sound barriers have also become hot research directions. In this paper, the research on vibration and noise of rail transit bridges and sound barriers in the past year is reviewed, the current research hotspots are summarized, and the future development trend is forecasted.

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

收稿日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金(51878565)

作者简介:李小珍(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事车-桥耦合动力学研究,E-mail: xzhli@swjtu.cn.
朱艳(通信作者),女,博士,E-mail: zhuyan@swjtu.cn.

Received:2020-04-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878565)

Author brief: Li Xiaozhen(1970-), professor, doctoral supervisor, main research interest: vehicle-bridge interactions, E-mail: xzhli@swjtu.cn.

Zhu Yan (corresponding author), PhD, E-mail: zhuyan@swjtu.cn.

列车通过高架桥梁时,振动能量通过轨道结构传递到桥面及其他桥梁构件,激发桥梁振动并向空中辐射噪声,这被称为“桥梁结构噪声”。长期以来,相关研究主要集中在轮轨噪声方面,对桥梁结构噪声研究较少。近 10~20 年来,随着高速铁路和城市轨道的迅猛发展,高速列车运行于桥梁上引起的车辆-桥梁耦合振动以及城市轨道交通高架结构的振动与噪声产生机理、减振降噪技术等问题研究,已成为高速铁路和城市轨道交通领域的重大课题。作为一门具有交叉学科性质的技术学科,轨道交通桥梁减振降噪的基础理论研究和工程实践应用都取得了巨大发展,已居于世界前列。

笔者总结了轨道交通桥梁减振降噪研究进展,简述其研究动态及发展趋势。围绕混凝土桥梁结构噪声预测与控制、钢桥与钢混组合桥结构噪声预测与控制、桥上声屏障降噪特性,分 3 个方面简要梳理和总结了 2019 年以来主要研究进展,具有连贯性的研究将文献范围拓展至 2014 年以后。

1 混凝土桥梁结构噪声预测与控制

轨道交通混凝土桥以简支梁为主,包括箱梁、U 型梁等不同的截面形式。混凝土桥梁结构噪声主要集中于低频段(20~200 Hz),尽管幅值较小,但却容易使人感到烦扰和不适,并且随距离的衰减较慢。A 声级常被用作噪声评价的指标,但其对 1 000 Hz 以下的低频成分有较大幅度的衰减,因此,混凝土桥梁结构噪声一般采用线性声压级进行评价。混凝土桥梁结构噪声研究主要以简支箱梁和 U 型梁的结构噪声研究为主。近年来,随着连续梁和连续刚构等梁型在轨道交通中应用的增多,这些梁型的结构噪声问题也逐渐引起相关学者的关注。

1.1 混凝土桥梁结构噪声预测理论与模型研究

在混凝土桥梁结构噪声预测方面,主流预测采用的是传统声学边界元法。李克冰^[1]首先采用基于全过程迭代法的车桥耦合振动分析求解列车荷载作用下桥梁的动力响应,并以此作为声学边界条件,采用基于 Helmholtz 方程的间接边界元法预测了高速铁路 32 m 混凝土槽型梁的结构噪声,然后以现场测试结果验证了数值模型。张小安^[2]首先基于显式-隐式混合积分法进行车-线-桥耦合振动分析,得到桥梁动力响应,然后,基于边界元法求解了高速铁路 32 m 混凝土箱梁的结构噪声,并与李小珍等^[3]的现场测试结果对比,验证了其数值模型。刘林芽等^[4]对比了采用有限元-边界元法进行桥梁结构预测时

考虑单跨或多跨桥梁对噪声预测精度的影响,结果表明,考虑多跨桥梁时的远场噪声预测结果与实测结果更吻合。

尽管采用声学边界元法进行混凝土桥梁结构噪声预测的计算精度尚可,但计算效率却会随着预测频率的提高和模型规模的增大而急剧降低。为此,宋立忠^[5]和 Song 等^[6]基于波导有限元法和二维边界元法,创新性提出轨道交通桥梁结构噪声的快速预测方法:首先,采用移动轨道不平顺模型求解轮轨力,然后,基于波导有限元模型(图 1(a))求解轮轨力作用下的桥梁动力响应,结合二维边界元模型(图 1(b))开展桥梁结构噪声快速预测,以广州地铁混凝土简支梁^[5]和连续刚构^[6]的现场测试结果验证了该预测方法。虽然该预测方法的计算效率大大提高,但相较于三维声学边界元法,其计算精度却有所降低。

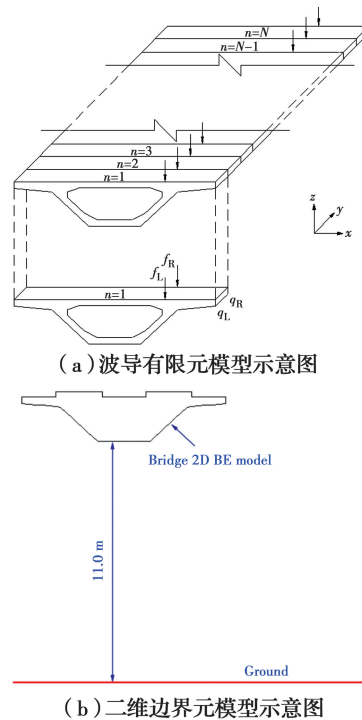


图 1 城市轨道交通箱梁波导有限元-二维边界元模型示意图^[6]

Fig. 1 Schematic diagram of WFE-2D BE model of urban rail transit box-girder^[6]

除了声学边界元法,还有一些学者采用统计能量分析、声学有限元、声学无限元、逆边界元、混合方法、模型试验反演等方法预测桥梁结构噪声辐射。罗文俊等^[7]为了提高桥梁结构噪声的预测效率,采用 FE-SEA 混合法,即在低频段采用 FE 分析法,保证低频计算精度;在高频段采用 SEA 建模,保证高频段计算效率;在中频段则采用 FE-SEA 混合法建

模,兼顾计算精度和计算效率,首先,采用多体动力学分析软件 SIMPACK 开展车辆-轨道耦合动力分析,得到轮轨力,然后,将其施加到采用 VA One 建立的桥梁 FE-SEA 混合模型上,求解高速铁路 32 m 混凝土箱梁振动噪声。Song 等^[8]首先基于模态叠加法开展车-线-桥耦合振动分析,然后基于 2.5 维声学有限元/无限元法计算声模态传递向量 (MATVs),预测了轨道交通 25 m 混凝土简支 U 型梁的结构噪声。Song 等^[9]以逆边界元法为理论基础,提出通过少量测点声压结果重构桥梁周围声场分布的方法并进行了数值验证,但其可靠性有待现场测试的进一步验证。雷晓燕等^[10]和欧开宽等^[11]以高速铁路 32 m 混凝土简支箱梁为原型,在声学实验室内制作了 1:10 的缩尺箱梁模型,通过模态试验和面板声学贡献分析验证了箱梁模型与原型的相似关系,为缩尺模型试验结构噪声反演至箱梁原型奠定了基础。

1.2 混凝土桥梁结构噪声特性及机理研究

在混凝土桥梁结构噪声特性研究方面,主要以现场测试和数值仿真为主。李克冰^[1]实测了高速铁路 32 m 简支槽型梁的结构噪声,测试结果表明:列车以 300、350 km/h 的速度通过时,槽型梁结构噪声的优势频段均在 25~80 Hz 之间,声压级峰值出现在 40 Hz,与梁体振动加速度峰值相对应。宋立忠^[5]实测了城市轨道交通 30 m 混凝土简支箱梁的结构噪声,结果表明:列车以 70 km/h 的速度通过时,箱梁结构噪声的优势频段在 63~100 Hz,声压级峰值出现在 80 或 100 Hz。罗文俊等^[7]通过数值仿真分析了高速铁路 32 m 简支箱梁的结构噪声特性,结果表明:列车以 140 km/h 的速度通过时,箱梁振动和结构噪声峰值均出现在 50 Hz。学者针对中小跨度桥梁(如简支箱梁、简支 U 型梁等)的结构噪声特性开展了很多研究,但对于大跨度桥梁(如连续梁、连续刚构等)的结构噪声特性还有待于进一步研究。

一些学者通过声模态贡献量、声辐射贡献量、导波特性分析,从不同角度研究了混凝土桥梁结构振动声辐射机理。刘林芽等^[12]基于声模态贡献量分析,研究了引起高速铁路 32 m 混凝土简支箱梁结构噪声峰值的振动模态,结果表明,箱梁的第 16 阶模态(翼缘板局部振动)和第 62 阶模态(顶板局部振动)分别是引起 31.5、80 Hz 箱梁结构噪声峰值的原因。张小安^[2]通过数值仿真分析了轨道交通箱梁不同板件的声辐射贡献量,结果表明,顶板辐射噪声是

箱梁声辐射的主要声源,故应将顶板作为减振降噪设计的主要对象。宋立忠^[5]从导波传播特性的角度,研究了城市轨道交通简支箱梁振动声辐射峰值的产生机理,结果表明,导波 E(图 2(a))和导波 G(图 2(b))的传播引起了箱梁顶板和底板较大的弯曲振动,进而导致了声辐射峰值的产生。虽然有关学者从不同角度、采用不同方法开展了一些研究,但仍未就桥梁结构振动声辐射机理达成共识,还有待于进一步研究。

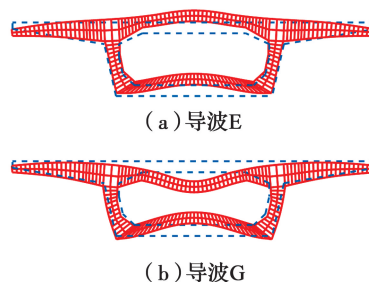


图 2 城市轨道交通箱梁典型导波模态^[5]

Fig. 2 Typical wave modes of urban rail transit box-girder^[5]

1.3 混凝土桥梁结构噪声控制研究

在混凝土桥梁结构噪声控制方面,目前最常用的方法是采用减振轨道。宋晓东等^[8]通过数值仿真分析研究了高弹性扣件和梯形轨枕对轨道交通 25 m 简支 U 型梁结构噪声的影响,结果表明,高弹性扣件能有效降低桥梁结构振动和噪声;梯形轨枕能显著降低桥梁结构振动和噪声,但轨枕自身振动较大,可能取代桥梁成为另一噪声源。宋瑞等^[13]通过数值仿真分析对比了铺设常规型和减振型 CRTS-III 型板式无砟轨道的高速铁路 32 m 混凝土简支箱梁的结构噪声,结果表明,铺设减振型轨道的箱梁结构噪声在近场点和远场点分别降低了 8.15、8.36 dB。Li 等^[14]系统分析了钢弹簧浮置板对城市轨道交通 30 m 简支箱梁振动和噪声的影响,结果表明,地铁列车以 70 km/h 通过时,与铺设普通板式轨道的箱梁相比,铺设钢弹簧浮置板的箱梁底板振动加速度级减小 34.7 dB,底板附近噪声降低 25 dB,如图 3 所示。

除了采用减振轨道,通过优化箱梁结构、截面形式、边界条件以及安装调谐质量阻尼器(TMD)等方法也可以起到降低桥梁结构噪声的作用。刘林芽等^[12]针对引起高速铁路 32 m 混凝土简支箱梁结构噪声峰值的振动模态,开展了结构声学优化设计,在相应位置设置了加劲肋,结果表明,加劲肋的设置使得梁下和梁侧结构噪声显著降低。韩江龙等^[15]基于模态叠加法和模态声传递向量(MATVs),对比了

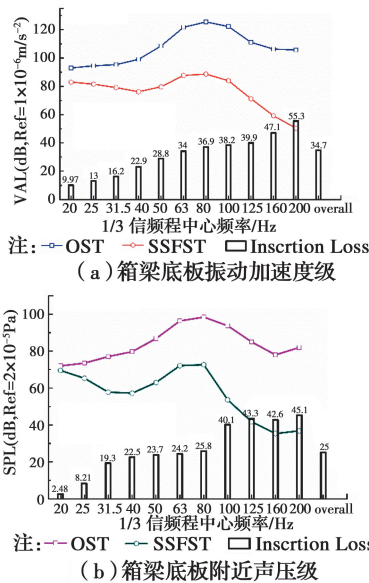


图 3 铺设普通板式轨道和钢弹簧浮置板的箱梁振动噪声对比^[14]

Fig. 3 Comparisons of vibration and noise of bridges with OST and SSFST^[14]

三跨简支和连续槽型梁的结构噪声特性,结果表明,与总长和跨径相同的简支梁相比,相同截面形式的连续梁的结构噪声无明显改善。刘兴龙等^[16]通过现场测试对比了广州地铁 4 号线 30 m 混凝土简支箱梁在安装调谐质量阻尼器前后梁下 1.5 m 处的噪声值,10 次过车试验的平均降噪效果为 2.1 dB(A)。

目前,采用常见的减振轨道或通过优化桥梁结构等措施对桥梁结构噪声的降噪效果已很难得到进一步提升,因此,一些学者开始尝试基于声学超材料、声子晶体理论开展桥梁结构噪声控制研究。

2 钢桥与钢-混组合桥结构噪声预测及控制

近年来,钢桥及钢-混组合桥(图 4)在铁路、城市轨道交通中得到应用。列车经过钢桥和钢-混组合桥梁时引起的结构声辐射问题相比混凝土桥更为突出^[17],钢桥结构噪声主要集中于中频段(200~800 Hz),而钢-混组合桥梁结构噪声的主频范围更宽,约为 63~800 Hz,对沿线居民造成的影响更大。因此,对铁路钢桥及钢-混组合桥的结构噪声进行预测及控制研究具有重要理论意义和工程价值。

2.1 钢桥及钢-混组合桥噪声预测理论与模型研究

考虑到钢桥及钢-混组合桥梁结构噪声辐射频率范围宽,可高达上百甚至上千 Hz,因此,混凝土桥噪声预测常用的边界元法不再适用,不仅计算效率



(a) 钢桁斜拉桥



(b) 钢-混组合梁桥

图 4 钢桥及钢-混组合桥梁

Fig. 4 Steel bridge and steel-concrete composite bridge

低且对中高频噪声预测精度也不高。统计能量分析方法基于功率流的思想,从统计意义上将复杂系统划分成若干便于分析的独立子系统,能够有效针对模态密集的系统进行结构动力分析,模态密度越大,分析精度越高,而钢桥结构的模态在频域内较为密集,因此,基于统计能量法(SEA)对钢桥及钢-混组合桥梁结构噪声进行预测更为准确高效。从近 5 年研究现状看,钢桥结构噪声预测通常结合 SEA 分析方法,具体过程包含两步:第 1 步是获取车致桥梁振动响应,第 2 步是基于桥梁振动响应计算声辐射^[18]。

对结构形式较简单的钢板梁或钢-混组合梁桥,可先计算桥梁时域振动响应,经 FFT 得到频域结果,然后导入 SEA 分析模块,获取桥梁各子系统振动能量分布,最后通过振动声辐射原理,得到桥梁结构噪声分布规律^[19-21]。唐康文^[22]基于声固耦合理论,结合 FE-SEA 法建立了连续板梁钢-混结合梁桥结构噪声预测模型,计算分析了不同参数对钢-混结合梁桥振动及噪声的影响规律。Li 等^[23]和 Liu 等^[24]通过车-线-桥耦合理论、FEM 及 SEA 法建立了钢-混组合梁桥结构噪声预测模型并得到现场实测结果验证。对结构较复杂的大跨度钢桥结构,在车-线-桥耦合模型中建立时域桥梁 FEM 模型难以实现,上述方法不再适用。Liang 等^[25]针对大跨度钢桁梁斜拉桥,直接在频域内建立车辆-轨道-桥梁耦合作用模型,获得频域内轮轨动态作用力及传递到桥梁结构的荷载,基于 FEM 及 SEA 法分别建立大跨度钢桁梁斜拉桥精细化振动预测模型(如图 5)及噪声预测模型,对大跨度钢桁梁斜拉桥的声辐射机理及噪声分布规律进行了研究。

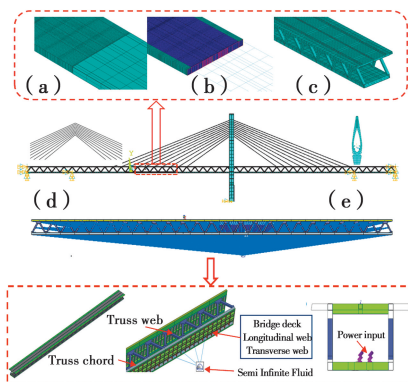


图 5 钢桁梁斜拉桥振动噪声预测的混合 FEM-SEA 模型^[25]

Fig. 5 Hybrid FEM-SEA model for predicting vibration and noise of steel truss cable-stayed bridge

2.2 钢桥及钢-混组合桥声振特性研究

与混凝土桥结构噪声特性研究一致,对钢桥及钢-混组合桥梁结构噪声分布规律及辐射机理的研究,也主要以现场实测和数值仿真两种途径来开展。刘全民等^[19]和 Li 等^[23]对一座 32 m+40 m+32 m 三跨连续钢-混结合梁桥开展了现场振动噪声测试并进行理论预测发现:预测值与实测值吻合较好,钢-混结合梁桥结构噪声优势频段在 20~1 000 Hz,钢梁翼缘板对总声级的贡献很小,315 Hz 以上对总声级贡献起主导作用的主要为钢梁腹板,315 Hz 以下由混凝土桥面板及钢梁腹板共同决定,且混凝土桥面板的声辐射优势频段在 80~160 Hz。

Liang 等^[25]首次开展了针对既有轨道交通大跨钢桁梁斜拉桥现场振动及噪声测试发现:在轨道交通车辆作用下,钢桥振动呈现宽频特性,结构板件在中频段及高频段均有振动极值出现,输入功率主要分布在桥面板、纵梁腹板和横梁腹板上(如图 6),各板件振动峰值均出现在 63~125 Hz;不同板件在分析频段内的振动特性相似,横梁腹板振动水平最高,桥面板振动次之,翼缘振动最小;由于板件的厚度、尺寸和约束条件差异,使得各板件局部振动特性不同。桥面板中心在 630 Hz 仍有较高振动水平;横梁翼缘与腹板振动优势频段在 40~160 Hz;纵梁腹板面外振动优势频段为 40~250 Hz,且在 3 150~4 000 Hz 之间也有明显峰值;钢桥车致振动结构噪声非常显著,横梁翼缘附近实测结构噪声接近 100 dB。

2.3 钢桥及钢-混组合桥噪声控制理论与措施研究

实际上,对车致钢桥噪声的控制是一个与综合控制措施^[26]相匹配的研究过程,对于时速较低的城市轨道交通桥梁,从控制对象来看主要分轮轨噪声及钢梁结构噪声两大体系,针对轮轨噪声控制,目前

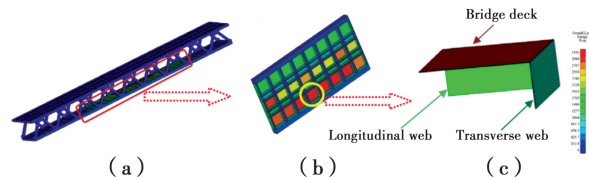


图 6 振动能量分布图^[32]

Fig. 6 Vibration energy distribution diagram^[32]

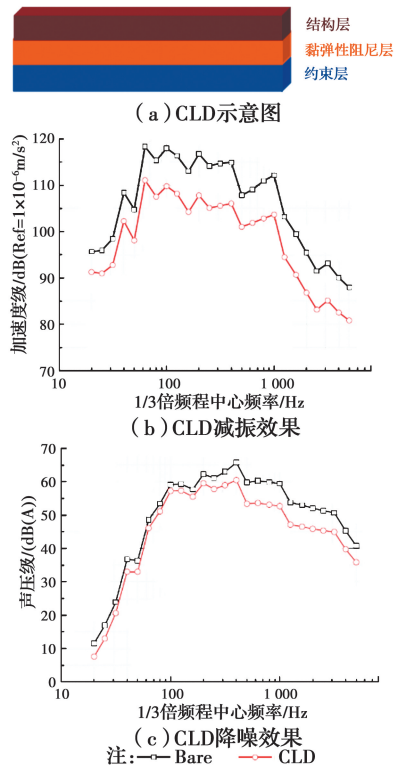
常用方法包括:钢轨打磨^[27-28]及车轮镟轮、采用阻尼钢轨^[29-30]、安装吸振器、在声源附近铺设吸隔音板^[31]以及在传播路径上增设声屏障等。针对钢梁结构噪声控制主要包括:桥梁结构形式优化,增大桥梁阻尼、铺设减振轨道系统以及在钢梁表面敷设阻尼材料^[32]等。

Liang 等^[25, 32]基于动柔度法及线性叠加原理建立了频域内车辆-减振轨道-桥梁三大系统的耦合作用模型,探究了减振垫浮置板轨道结构用于大跨度钢桁梁斜拉桥的减振降噪机理及效果。研究发现:减振轨道主要通过抑制振动能量向下传递来对桥梁结构振动噪声进行控制,轮轨动态相互作用力及减振轨道力传递率共同决定输入到桥梁的激励力,相比普通轨道结构,减振垫浮置板轨道能使钢桥中、高频段振动加速度级以及辐射声压级分别降低 14~18 dB 和 10~13 dB(A)。可见,减振轨道能有效降低钢桥结构振动及噪声水平。Li 等^[23]和 Liu 等^[33-34]基于现场实测、模态应变能法及统计能量法等对约束阻尼层(CLD)用于钢-混结合桥梁的减振降噪机理及效果做了研究,研究发现:约束阻尼层(CLD)可在较宽的频带内对钢-混结合梁桥的振动及噪声进行抑制,可使纵梁和横梁的振动速度级降低 10.5 dB 和 6.1 dB,噪声降低 4.3 dB,如图 7 所示。阻尼材料用于钢结构桥梁的减振降噪不仅操作简单、便捷且效果显著,随着声子晶体及声学超材料的发展,周期性阻尼材料不仅能起到抑振抑噪的效果,还能在特定频带(阻带)内阻振阻噪。因此,周期性阻尼材料将成为钢桥减振降噪领域研究的热点。

3 桥上声屏障振动噪声特性

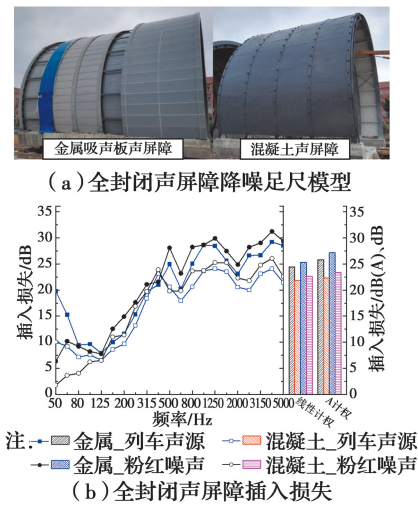
3.1 声屏障选型及降噪特性研究

对声屏障的研究主要集中在声屏障的声学性能方面。传统铁路桥梁 2~3 m 高度的直立声屏障主要作用可以降低列车通过时的轮轨噪声。轮轨噪声是以轮、轨的动力响应为输入条件结合声振耦合进行研究,其频谱特性以中高频分布为主,其峰值频率集中在 630~1 250 Hz、2 000~3 150 Hz^[35-37]。陆

图 7 CLD 示意图及其减振降噪效果^[23]Fig. 7 Schematic diagram of CLD and its vibration and noise reduction effects^[23]

维姆^[38]通过现场实测测得铁路桥上 2.15 m 高直立声屏障降噪量为 6~14 dB,列车车速在 250 km/h 时,降噪量可达 10 dB,随列车车速提高降噪量呈递减趋势。周红梅^[39]采用声学边界元法分析了城市轨道交通近轨矮墙式声屏障对轨道交通噪声的降噪性能。张天琦等^[40]分析了地面隔声墙式屏障对车速为 60 km/h 的列车通过城市轨道交通高架桥梁产生的低频结构噪声的隔声效果。以上研究表明:传统直立式声屏障的降噪效果有限。近年来,新结构形式声屏障逐渐应用于轨道两侧,伍向阳^[41]实测了高铁列车以 132 km/h 的速度通过桥梁时,全封闭声屏障实际降噪效果达到了 16~18 dB,并且不同于直立声屏障仅在声影区降噪较好,全封闭声屏障可大幅降低铁路噪声且不存在声亮区。Li 等^[42]通过缩尺模型声学测试和 2.5 维边界元法研究了顶部开口的近似全封闭声屏障的降噪效果,表明其近场降噪达 15 dB,远场降噪达 10 dB。李小珍等^[43-44]、杨得旺^[45]先后分别对高铁桥梁半封闭、圆弧形全封闭声屏障开展现场测试及声学足尺测试,如图 8 所示,其中,现场测试了高铁时速 300 km/h 以下时半封闭声屏障内外表面噪声、敞开侧和封闭侧噪声。模型测试将实测线路噪声作为声源,分别对全封闭金属吸

声板、混凝土全封闭声屏障进行声学测试,并建立了全封闭声屏障降噪统计能量分析预测模型,研究发现,半封闭声屏障降噪效果约 15 dB(A),全封闭声屏障降噪效果超过 20 dB(A)。

图 8 全封闭式声屏障降噪效果足尺模型测试及降噪效果^[42]Fig. 8 Full-scale model tests and noise reduction effects of fully enclosed sound barriers^[42]

除了采用新型结构声屏障,陈磊磊等^[46]、何宾^[47]、吴小萍等^[48]等均对铁路桥梁声屏障结构优化进行了研究。雷一彬等^[49]通过隔声板内填充聚氨酯、外覆 TUP 防尘膜,提高了声屏障隔声板的吸声系数,进而提高了声屏障的降噪性能。Lee 等^[50]在混响室内测试了不同材质隔声板的吸声特性以及样本尺寸对声屏障声学特性的影响。这些研究均是针对声屏障中某隔声板材或某个构件进行的声学性能测试,与声屏障整体结构的降噪性能存在一定差异。

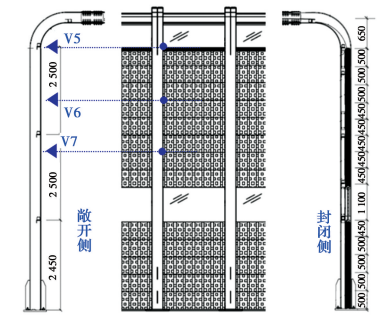
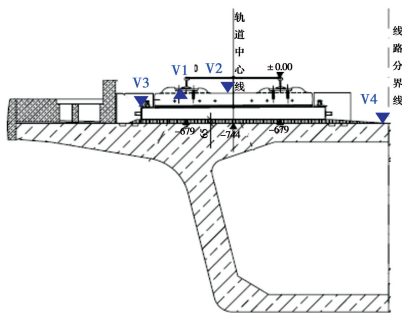
近年来,声学超材料、声子晶体、主动噪声控制技术均因可实现对预设的频带范围内的噪声实现有效控制而被运用于声屏障的研究中。林远鹏等^[51]提出一种超材料通风隔声屏障设计,利用类 Fano 共振耦合实现了隔离特定频带内的声波。易强等^[52]分别研究了直立式与全封闭周期型声屏障对轮轨噪声的控制效果。Lee 等^[53]总结了主动噪声控制(ANC)声屏障的研究现状和运用的局限性。目前,主动噪声控制作为被动噪声控制的补充手段,在复杂的环境条件下(如风速、温度变化),其降噪性还需进一步研究。

3.2 声屏障车致振动与风致振动研究

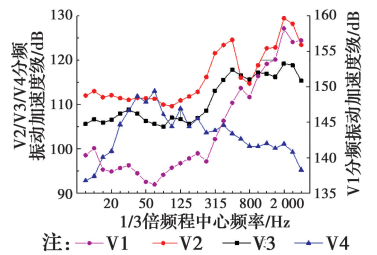
除了声屏障的降噪特性,一些研究还关注了列车运营时声屏障的动力特性,如声屏障的车致振动、风致振动等。

一些学者针对声屏障车致振动特性开展了现场

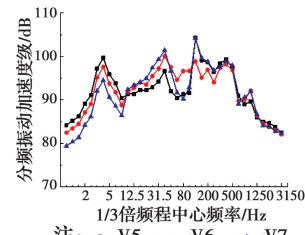
测试或数值模拟。谢伟平等^[54]通过振动试验研究了地铁列车低速通过时城市轨道交通高架桥上半封闭式声屏障的振动响应及传播规律,测试结果表明,地铁列车低速过桥时具有“移动轴重激励”的荷载特性;声屏障的振动相对于桥面轨道板有显著的放大,声屏障立柱顶端振动较大,且纵向振动稍大,声屏障隔声板的横向振动明显大于立柱的振动。罗云柯等^[55]实测了高速列车通过时轨道结构、箱梁和梁上半封闭式声屏障的振动,如图9所示,研究表明高铁桥上半封闭式声屏障振动峰值出现在40、125 Hz,顶部横梁振动较大,通过提高刚度或在箱梁翼板底部增设斜撑均可减小声屏障的振动。



(a) 轨道-桥梁-声屏障振动测点示意图



注: — V1 — V2 — V3 — V4



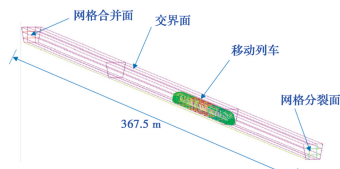
注: — V5 — V6 — V7

(b) 轨道-桥梁-声屏障振动测试结果

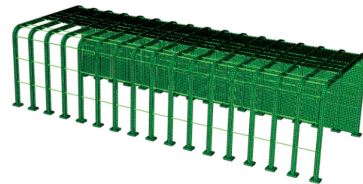
图9 轨道-桥梁-声屏障车致振动测点与测试结果^[52]

Fig. 9 Measuring points and measured results of the train-induced vibrations of the track-bridge-sound barrier system^[52]

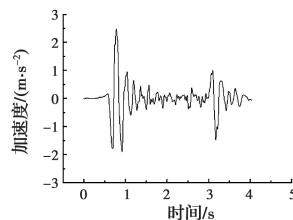
还有一些学者针对声屏障风致振动开展研究。刘功玉等^[56]、杨梦琦等^[57]分别研究了铁路直立、折臂式声屏障在自然风、列车脉动风联合激励下的振动特性。韩旭等^[58]通过风洞试验和数值模拟研究了横风作用下全封闭声屏障的气动特性。罗云柯等^[59]根据高速列车脉动风的频谱特性,将半封闭式声屏障振动测试信号通过低频滤波得到了脉动风压作用下声屏障的振动响应,通过参数分析研究了半封闭式声屏障顶部隔声板覆盖宽度对脉动风压和振动分布规律的影响,如图10所示。由图10可知,除3 Hz以下移动列车轴载的准静态作用及数值模型中未包含所有中间车,声屏障列车脉动风致振动数值分析与实测规律一致。



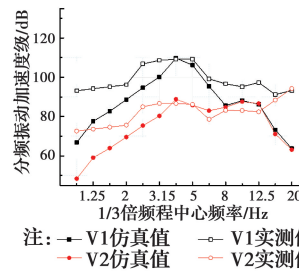
(a) 列车脉动风数值分析模型



(b) 半封闭式声屏障有限元模型



(c) 实测列车脉动风致声屏障振动加速度时程



注: — V1仿真值 — V1实测值 — V2仿真值 — V2实测值

(d) 实测和计算列车动风致声屏障振动加速度频谱

图10 半封闭式声屏障列车脉动风致振动研究^[56]

Fig. 10 Research on vibration of semi-enclosed sound barriers induced by train draft pressure^[56]

3.3 声屏障二次结构噪声研究

近年来,一些学者以声屏障振动为基础,结合振动声辐射原理,开展了声屏障二次结构噪声研究。张小安等^[60]结合车致振动响应,以声学边界元方法

研究了直立式声屏障二次结构噪声辐射特性,发现声屏障的二次结构噪声主要集中在 120 Hz 以下的低频段。张迅等^[58]采用统计能量分析研究了高铁桥上半封闭声屏障的结构辐射噪声,并评估了声屏障二次结构噪声对其降噪效果的影响。杨得旺^[45]研究了不同材料全封闭声屏障二次结构噪声,如图 11 所示,分析结果表明,考虑结构噪声会使全封闭金属吸声板声屏障、全封闭混凝土声屏障降噪量分别降低 7~9 dB、3~5 dB。可见,在声屏障降噪性能研究时,已综合考虑结构辐射噪声的影响。

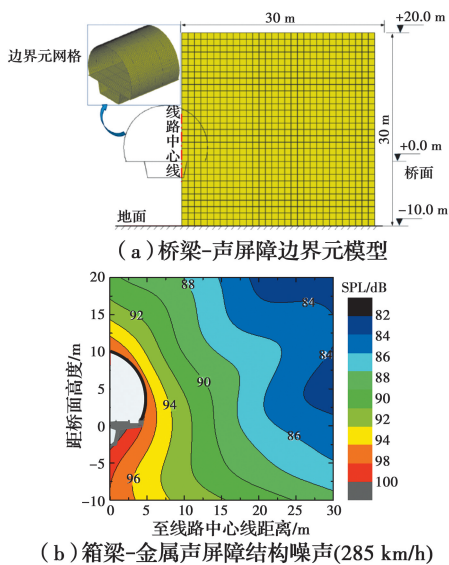


图 11 全封闭声屏障二次结构噪声研究^[42]

Fig. 11 Research on structure-borne noise of fully-enclosed sound barriers^[42]

4 结论与展望

通过梳理 2019 年轨道交通桥梁及桥上声屏障振动噪声的研究进展,总结了当前研究的热点和下一阶段研究的重点:

1) 桥梁结构噪声预测的高效算法。随着桥梁建造技术的进步,轨道交通桥梁跨度越来越大,混凝土连续梁和连续刚构以及大跨度钢桥在轨道交通高架中的应用也越来越多,这为桥梁结构噪声预测提出了新的挑战。在保证预测精度的情况下提高预测效率,是当前轨道交通桥梁结构噪声研究中的一个热点问题。

2) 基于声学超材料、声子晶体理论的桥梁结构噪声控制研究。随着人们环保意识的逐渐提高,轨道交通沿线居民对噪声问题的投诉日益增多。如何有效地降低轨道交通桥梁结构噪声对沿线居民生活的影响仍将是轨道交通桥梁结构噪声研究的一个热

点问题。以轨道减振和桥梁结构声学优化研究为主,基于声学超材料、声子晶体理论开展轨道交通桥梁结构噪声控制是未来的发展方向。

3) 约束阻尼材料用于钢桥结构噪声控制研究。阻尼材料用于钢结构桥梁的减振降噪操作简单、便捷且效果显著,随着声子晶体及声学超材料的发展,周期性阻尼材料不仅能起到抑振抑噪的效果,还能在特定频带(阻带)内阻振阻噪。因此,周期性阻尼材料将成为钢桥减振降噪领域研究的热点。

4) 新型减载式声屏障的研发与运用。传统直立式声屏障、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,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。

参考文献:

- [1] 李克冰. 高速铁路简支槽形梁动力及降噪性能理论与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI K B. Theoretical analysis and experimental study on dynamic and noise reduction performance of simply-supported through girder applied in high-speed railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [2] 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 mechanism and characteristics of acoustic radiation of elevated railway box-girder bridge [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [3] 李小珍, 张迅, 刘全民, 等. 铁路 32m 混凝土简支箱梁结构噪声试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 20-26.
LI X Z, ZHANG X, LIU Q M, et al. Experimental study on structure-borne noise of railway 32 m simply-supported concrete box-girder [J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 20-26. (in Chinese)
- [4] LIU L Y, PENG S Y, YAU J D, et al. Noise-radiation analysis of box-shaped rail bridges considering multi-span effects [J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2019, 22(3): 469-479.
- [5] 宋立忠. 基于波导有限元法的轨道—箱梁系统振动声辐射机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
SONG L Z. Research on vibro-acoustic mechanisms of track and box-girder systems based on waveguide finite element method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong

- University, 2019. (in Chinese)
- [6] 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.
- [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): 100-107.
- 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 the China Railway Society*, 2019, 41(8): 100-107. (in Chinese)
- [8] 宋晓东, 李奇. 轨道交通混凝土 U 梁减振降噪措施数值分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(3): 460-466.
- SONG X D, LI Q. Numerical study on vibration and noise reduction of rail transit concrete U-shaped bridges [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(3): 460-466. (in Chinese)
- [9] SONG X D, LI Q. Reconstruction of low-frequency bridge noise using an inverse modal acoustic transfer vector method [J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2019, 38(2): 224-243.
- [10] 雷晓燕, 欧开宽, 罗锟, 等. 混凝土箱梁相似模型结构噪声对比分析[J]. *应用声学*, 2019, 38(3): 384-391.
- LEI X Y, OU K K, LUO K, et al. Comparative analysis on structural noise of similarity model of concrete box girder [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(3): 384-391. (in Chinese)
- [11] 欧开宽, 雷晓燕, 罗锟, 等. 混凝土箱梁相似模型面板声学贡献对比分析[J]. *振动工程学报*, 2019, 32(6): 1011-1018.
- OU K K, LEI X Y, LUO K, et al. Acoustic contribution comparative analysis of similar model panel of concrete box-girder [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(6): 1011-1018. (in Chinese)
- [12] LIU L Y, QIN J L, ZHOU Y L, et al. Structural noise mitigation for viaduct box girder using acoustic modal contribution analysis [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2019, 72(4): 421-432.
- [13] 宋瑞, 刘林芽, 徐斌. 高速铁路减振 CRTS-III 型无砟轨道桥梁振动噪声研究[J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(2): 151-155, 166.
- SONG R, LIU L Y, XU B. Vibration and noise study on damping layers of CRTS-III slab ballastless track for high speed railway bridges [J]. *Noise and Vibration Control*, 2019, 39(2): 151-155, 166. (in Chinese)
- [14] LI X Z, GUO Z, LEI K N, et al. Effects of steel spring floating slab on vibration and noise of a rail transit box-girder [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 2019: 1-14.
- [15] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 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.
- HAN J L, WU D J, LI Q. Comparison between structure-borne noise characteristics of continuous trough girders and those of simply supported ones in urban rail transit [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(11): 258-263. (in Chinese)
- [16] 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 structure-borne noise control for urban metro viaducts [J]. *Noise and Vibration Control*, 2019, 39(2): 140-144. (in Chinese)
- [17] 李小珍, 杨得旺, 郑净, 等. 轨道交通桥梁减振降噪研究进展[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(7): 55-75, 136.
- LI X Z, YANG D W, ZHENG J, et al. Review on vibration and noise reduction of rail transit bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(7): 55-75, 136. (in Chinese)
- [18] 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.
- ZHANG X, LIU R, RUAN L H, et al. Review on noise radiated by railway steel bridges [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(1): 126-137. (in Chinese)
- [19] 刘全民, 李小珍, 张迅, 等. 铁路结合梁桥结构噪声的数值预测与试验验证[J]. *铁道学报*, 2018, 40(6): 120-126.
- LIU Q M, LI X Z, ZHANG X, et al. Numerical prediction and experimental validation of structure-borne noise from a railway composite bridge [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(6): 120-126. (in Chinese)
- [20] 马广. 客运专线钢板结合连续梁桥结构噪声分析[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(12): 72-76.
- MA G. Analysis of the structure - borne noise of composite steel plate continuous bridge in passenger dedicated line [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(12): 72-76. (in Chinese)
- [21] 李小珍, 刘全民, 宋立忠, 等. 高速铁路钢桁结合梁桥结构噪声预测研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(12): 97-103.
- LI X Z, LIU Q M, SONG L Z, et al. Prediction of

- structure-borne noise of composite steel truss bridge of high-speed railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(12): 97-103. (in Chinese)
- [22] 唐康文. 基于 FE-SEA 混合法连续板梁钢-混结合梁桥结构噪声研究分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
TANG K W. Study and analysis of structural noise of continuous slab beam steel-concrete composite beam bridge based on FE-SEA hybrid method [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [23] LI X Z, LIU Q M, PEI S L, et al. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 353: 378-394.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 高山, VOGIATZIS K, VANHONACKER P. 基于轨道降噪措施的城市轨道交通噪声治理研究[J]. *四川建材*, 2019, 45(10): 154-160, 162.
GAO S, VOGIATZIS K, VANHONACKER P. Noise reduction in urban LRT networks by combining track based solutions [J]. *Sichuan Building Materials*, 2019, 45(10): 154-160, 162. (in Chinese)
- [27] 张凯轩, 宫岛, 周劲松. 钢轨波磨对地铁车内噪声影响的试验研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2018, 47(5): 119-122.
ZHANG K X, GONG D, ZHOU J S. The experiment study on the influence to metro vehicle interior noise caused by rail corrugation [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2018, 47(5): 119-122. (in Chinese)
- [28] HAN J, XIAO X B, WU Y, et al. Effect of rail corrugation on metro interior noise and its control [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 130: 63-70.
- [29] 张校铭, 周海洋, 姚光磊, 等. 宽频型迷宫式约束阻尼钢轨降噪特性试验研究[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(2): 137-142.
ZHANG X M, ZHOU H Y, YAO G L, et al. Experimental study on noise-reducing characteristics of broadband labyrinth constrained damping rail [J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(2): 137-142. (in Chinese)
- [30] 赵峰强, 李成旭. 迷宫式阻尼钢轨减噪装置车内减噪效果研究[J]. *机电技术*, 2019, 42(4): 64-67.
ZHAO F Q, LI C X. Research on in-car noise reduction effect of labyrinth damping rail noise reduction device [J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2019, 42(4): 64-67. (in Chinese)
- [31] 常亮. 高速铁路吸声板结构参数对声学性能影响研究[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(8): 92-97.
CHANG L. Analysis of influence of sound-absorbing panels structural parameters on sound-absorbing performance on high-speed railway [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(8): 92-97. (in Chinese)
- [32] LIANG L, LI X Z, YIN J, et al. Vibration characteristics of damping pad floating slab on the long-span steel truss cable-stayed bridge in urban rail transit [J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 92-103.
- [33] 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.
- [34] 刘全民, 李小珍, 刘林芽, 等. 铁路钢板结合梁桥约束阻尼层减振降噪分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(12): 1392-1400.
LIU Q M, LI X Z, LIU L Y, et al. Vibration and noise mitigation analysis of railway steel-concrete composite bridge using constrained layer damping [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2018, 48(12): 1392-1400. (in Chinese)
- [35] 中华人民共和国铁道部. 关于印发《铁路建设项目环境影响评价噪声振动源强取值和治理原则指导意见(2010年修订稿)》的通知: 铁计[2010]44号[A]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2010.
- [36] 徐志胜, 翟婉明, 王开云. 基于 Timoshenko 梁模型的车辆-轨道耦合振动分析[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(1): 22-27.
XU Z S, ZHAI W M, WANG K Y. Analysis of vehicle-track coupling vibration based on Timoshenko beam model [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 38(1): 22-27. (in Chinese)
- [37] 杨新文. 高速铁路轮轨噪声理论计算与控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

- YANG X W. Theoretical analysis and control studies in wheel/rail noise of high speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [38] 陆维姍. 基于声场分布特性的高速铁路声屏障降噪效果研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- LU W S. Research on noise reduction effect of high-speed railway sound barrier based on distribution characteristics of sound field [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019. (in Chinese)
- [39] 周红梅, 卜炬鹏, 朱万旭, 等. 城市轨道交通近轨吸声矮墙降噪量数值仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 62(8): 176-181.
- ZHOU H M, BU J P, ZHU W X, et al. Numerical simulation analysis of noise reduction for urban rail transit low-height trackside soundproof wall [J]. Railway Standard Design, 2019, 62(8): 176-181. (in Chinese)
- [40] 张天琦, 刘艳, 罗雁云, 等. 地面隔声墙高度对轨道交通高架结构噪声影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 168-175.
- ZHANG T Q, LIU Y, LUO Y Y, et al. Research on the influence of ground acoustic wall height on elevated structure noise of rail transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(1): 168-175. (in Chinese)
- [41] 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.
- WU X Y. Experimental study on noise reduction effect of fully enclosed sound barrier on railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 177-181. (in Chinese)
- [42] 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.
- [43] 李小珍, 杨得旺, 高慰, 等. 高速铁路半、全封闭声屏障振动与降噪效果研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(Sup1): 8-13.
- LI X Z, YANG D W, GAO W, et al. Study on vibration and noise reduction of semi-or fully-enclosed noise barriers of high speed railways [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38 (Sup1): 8-13. (in Chinese)
- [44] 李小珍, 赵秋晨, 张迅, 等. 高速铁路半封闭式声屏障降噪效果测试与分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 661-669, 755.
- LI X Z, ZHAO Q C, ZHANG X, et al. Field test and analysis of noise reduction performance of high-speed railway semi-closed sound barriers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 661-669, 755. (in Chinese)
- [45] 杨得旺. 高速铁路桥上全封闭声屏障降噪效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- YANG D W. Research on noise reduction effect of fully enclosed sound barrier on high-speed railway bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [46] 陈磊磊, 申晓伟, 刘程, 等. 基于等几何边界元法的声屏障结构形状优化分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 114-120.
- CHEN L L, SHEN X W, LIU C, et al. Shape optimization analysis of sound barriers based on the isogeometric boundary element method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 114-120. (in Chinese)
- [47] 何宾. 高速铁路矮声屏障降噪性能测试与优化分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 75-80.
- HE B. Noise reduction performance test and optimization analysis of high speed railway low barrier [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 75-80. (in Chinese)
- [48] 吴小萍, 段贤伟, 杜鹏程, 等. 基于 NSGA-II 算法的高速铁路声屏障高度多目标优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1369-1374.
- WU X P, DUAN X W, DU P C, et al. Multi-objective optimization of noise barrier height for high-speed railway based on NSGA-II algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1369-1374. (in Chinese)
- [49] 雷一彬, 尚瑞华. 聚氨酯填充和 TUP 防尘膜对高速铁路箱型金属声屏障性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(6): 814-819.
- LEI Y B, SHANG R H. Research on the influence of polyurethane filling and TUP dust-proof membrane on the performance of box-type metal sound barrier for high-speed railway [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(6): 814-819. (in Chinese)
- [50] LEE H M, WANG Z M, LIM K M, et al. Investigation of the effects of sample size on sound absorption performance of noise barrier [J]. Applied Acoustics, 2020, 157: 106989.
- [51] 林远鹏, 梁彬, 杨京, 等. 可实现宽频宽角度隔声的薄层通风结构[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 791-795.
- LIN Y P, LIANG B, YANG J, et al. Thin ventilated layer for broadband and wide-angle sound insulation [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science),

- 2019, 55(5): 791-795. (in Chinese)
- [52] 易强, 王宇航, 高鑫, 等. 轨道交通周期型声屏障带隙特性及其降噪性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1263-1270.
- YI Q, WANG Y H, GAO X, et al. Band gap properties and noise reduction performances of periodic noise barriers in rail transit [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (5): 1263-1270. (in Chinese)
- [53] LEE H M, WANG Z M, LIM K M, et al. A review of active noise control applications on noise barrier in three-dimensional/open space: myths and challenges [J]. Fluctuation and Noise Letters, 2019, 18 (4): 1930002.
- [54] 谢伟平, 余华彬, 孙亮明, 等. 城市高架桥半封闭式声屏障的车致振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38 (16): 14-21.
- XIE W P, YU H B, SUN L M, et al. Experimental investigation on train-induced vibrations of a semi-closed noise barrier on the urban viaduct [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (16): 14-21. (in Chinese)
- [55] 罗云柯, 张迅, 李小珍, 等. 桥上半封闭式声屏障在轮轨动力作用下的振动分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37 (22): 255-262.
- LUO Y K, ZHANG X, LI X Z, et al. Vibration analysis of a semi-closed noise barrier installed on a bridge excited by wheel/rail dynamic forces [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 255-262. (in Chinese)
- [56] 刘功玉, 罗文俊, 李恒斌. 风荷载作用下高速铁路声屏障结构的动力响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 27-31.
- LIU G Y, LUO W J, LI H B. Dynamic response analysis of high-speed railway noise barrier structure under wind load [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22 (9): 27-31. (in Chinese)
- [57] 杨梦琦, 贺玉龙, 蔡思奇. 自然风与气动力作用下高速铁路路基段折臂式声屏障动力响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(2): 162-166.
- YANG M Q, HE Y L, CAI S Q. Dynamic response analysis of noise barriers with folded arms on the embankment of high-speed railway under wind load excitation [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39 (2): 162-166. (in Chinese)
- [58] 韩旭, 彭栋, 向活跃, 等. 横风作用下高速铁路桥梁全封闭声屏障气动特性的风洞试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 49(7): 151-155.
- HAN X, PENG D, XIANG H Y, et al. Research on wind tunnel tests for aerodynamic characteristics of closed noise barriers on high speed railway bridges under crosswinds [J]. Railway Engineering, 2019, 49 (7): 151-155. (in Chinese)
- [59] 罗云柯. 高速铁路半封闭声屏障的列车脉动风致振动分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LUO Y K. Analysis of train pulsating wind-induced vibration of semi-closed sound barrier in high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [60] 张小安, 翟婉明, 石广田, 等. 城市轨道交通直壁式声屏障车致振动噪声研究[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(1): 78-87.
- ZHANG X A, ZHAI W M, SHI G T, et al. Structure noise of straight-wall noise barrier in urban rail transit [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, 38 (1): 78-87. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)