

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.022

轨道交通桥梁结构噪声研究进展

王一千^a, 杨宜谦^b, 刘鹏辉^b

(中国铁道科学研究院 a. 研究生部; b. 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 综述桥梁结构噪声的产生机理、桥梁结构噪声的频谱特性、结构噪声与列车速度的关系以及桥梁结构声辐射效率的影响因素。简要介绍结构噪声的分析计算方法及其进展并讨论了每种方法的不足。从减隔振、限制振动传播和能量衰减方面总结了控制结构噪声的措施, 提出减小桥梁结构噪声中有待研究的问题。

关键词: 铁路桥梁; 城市轨道交通; 高架结构; 结构噪声; 噪声控制

中图分类号: TB535; U233 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S0-0113-07

Research Progress of Bridge Structure-borne Noise of Rail Transit

Wang Yigan^a, Yang Yiqian^b, Liu Penghui^b

(a. Postgraduate Faculty of China Academy of Railway Sciences;

b. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: The generating mechanism of bridge structure-borne noise, the spectral characteristics of structure noise and the relation between structure noise and train speed and the influence factors of bridge radiation efficiency are introduced. In the paper, plural calculation methods and the present progress are briefly introduced. The defects of each method are pointed out. Strategies for reducing the bridge structure noise are include vibration reduction/isolation, vibration transmission/limitation and energy attenuation. The problems of reducing the structure-borne noise are pointed out for further studies.

Key words: railroad bridge; urban rail transit; viaduct structure; structure-borne noise; noise control

高架桥是轨道交通的主要结构型式之一, 其穿越或者位于居民区, 相关研究表明, 列车通过高架线路的噪声通常高于地面线路的噪声, 因此, 高架线对周围环境的噪声影响变得十分突出。列车通过桥梁时, 由于轮轨相互作用产生的振动能量经过轨道结构传递到桥梁, 并激发其振动向四周辐射噪声, 这部分噪声称之为“桥梁结构噪声”。桥梁结构噪声属于低频噪声, 在空气中传播时, 具有衰减慢、穿透力强, 难以隔断等特点, 长期处于低频噪声环境中的人容易产生莫名其妙的失眠、头痛、耳鸣、胸闷等症状, 对人的身心健康带来极大的危害^[1]。一直以来, 对铁路和地铁噪声的研究主要集中在轮轨和车辆等产生

的中、高频噪声, 对桥梁结构低频噪声研究较少。李宝银等总结了桥梁结构噪声产生的机理及国内外部分关于低频噪声的标准, 综述了结构噪声的测试和计算方法, 从减振降噪的角度介绍了控制结构噪声的措施^[2]。本文将以地铁和铁路桥梁结构噪声的声振特性为基础; 结合最近提出的结构噪声计算思路和结构噪声控制措施; 提出减小桥梁结构噪声中有待研究的问题。

1 桥梁结构噪声的特性

1.1 桥梁结构噪声频谱特性

不同的桥梁结构类型、材质、尺寸、安装方式以

及高架桥上轨道型式等都会影响桥梁的振动响应,使得桥梁结构噪声的频谱也有所差异。1974 年,Stüber 测试铁路钢桥得到:距轨道中心线 25 m,地面以上 1.6 m 处,列车以 80km/h 的速度运行时,桥梁结构辐射噪声峰值所对应的频率为 50 Hz^[3]。Moritoh 等对日本新干线混凝土桥梁结构噪声进行了现场测量,通过频谱分析得出当列车以 240 km/h 的速度运行时,桥梁正下方处结构噪声峰值频率为 100 Hz^[4]。

Ngai 等对铁路高架桥结构共振和声共振问题进行了专门的研究,研究指出:当列车以 140 km/h 速度运行时,高架桥梁噪声和振动的频率范围在 20~157 Hz 之间,共振频率为 43 Hz 和 54 Hz^[5]。

朱彦等对上海明珠线轻轨高架桥进行了理论计算和现场试验验证,研究指出:桥梁结构噪声是构成总噪声低频成分(<250 Hz)的主要来源,而轮轨噪声是较高频噪声(250~1 000 Hz)的重要来源;低频噪声场具有上下两个方向辐射明显强的方向特征,伴随频率的增高,声场混响特征增强^[6]。

高飞对北京地铁 5 号线和北京机场快轨进行了桥梁结构振动和噪声的研究,通过计算和实测分析了 3 跨连续箱梁在地铁列车通过时产生的结构振动和噪声,结果指出结构声辐射的峰值主要出现在 80~125 Hz 范围内^[7]。张旭等研究列车以 240 km/h 的速度通过铁路高架桥时产生的噪声得出:400 Hz 以下桥梁结构的声辐射和总的声辐射几乎完全吻合,表明在这个频带内,桥梁结构振动产生的声辐射对总声贡献量较大^[8]。

李小珍等^[9]、张迅等^[10]基于边界元法和统计能量法对单室混凝土简支箱梁桥进行了理论预测计算和噪声测试试验,理论计算和现场试验均表明:箱梁桥梁结构噪声在 50 Hz 和 315 Hz 出现了两个峰值频率,在 1/3 倍频程中心频率 50 Hz 的频带内,存在箱梁结构多个振动模态,在激振频率处于 50 Hz 附近时,桥梁结构的低阶局部振动容易被激发,声辐射效率较高,因此出现峰值。

刘鹏辉等^[11]对国内某地铁高架桥进行了桥梁结构噪声的实测,测点选在了长度大于 200 m 的全封闭声屏障区段的中部,受全封闭声屏障、桥上遮板和梁体的遮挡,可认为桥底面正下方 0.3 m 处测点测得的噪声中轮轨噪声成分包含很少,主要是桥梁结构噪声;实测结果表明:箱梁桥梁结构噪声在 1/3 倍频程中心频率 63 Hz 处出现峰值(见图 1)。全封闭声屏障梁底面 0.3 m 处列车通过时段 12.5~

250 Hz 等效声级见表 1,可以看出:在梁底面正下方 0.3 m 处,12.5~250 Hz 频段内列车通过时段的暴露声级 L_{Ceq} 与 L_{Aeq} 的差值在 18.7~22.1 dB 之间,根据德国^[12]、瑞典^[13]等国家对低频噪声的判定(当暴露声级 $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 15 \sim 20$ dB 时,认定含有低频噪声成分),桥梁结构噪声为低频噪声。

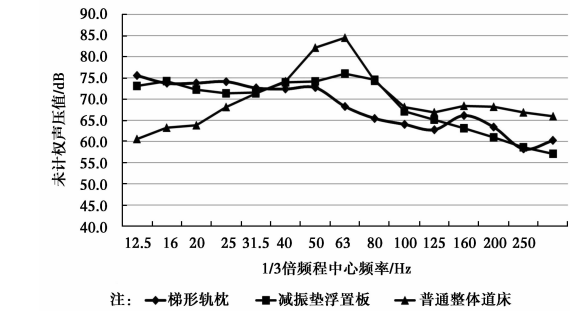


图 1 全封闭声屏障梁底面 0.3 m 处测点噪声的 1/3 倍频程频谱

表 1 全封闭声屏障梁底面 0.3 m 处列车通过时段 12.5~250 Hz 等效声级 dB

轨道类型	等效 A 声级	等效 C 声级	C 声级 - A 声级
普通整体道床	64.4	86.5	22.1
梯形轨枕	60.8	79.6	18.8
道床垫浮置式整体道床	60.0	78.7	18.7

1.2 桥梁结构噪声与列车速度的关系

列车车速对桥梁结构噪声的影响并没有统一的定论。Moritoh 通过对新型的测试车辆经过新干线桥梁时的噪声实测分析结果,估算了在考虑所有减振降噪措施后,新干线在不同列车速度下,距高架桥线路中心 25 m 处地面测点的最小噪声值及噪声不同组成成分的变化情况(估算结果见表 2)^[4];对于结构噪声部分,Moritoh 认为车速越高,结构噪声越大。

Au 等用解析法研究了一般边界条件下矩形正交各向异性薄板在移动荷载作用下的振动声辐射问题,证实了随着移动荷载远离,声压降低;荷载移动速度越大,产生的声压越大^[14]。

贺建良等通过实测对上海地铁 3 号线的噪声,并对声源进行识别分析,当地铁列车车速在 30~60 km/h 范围内变化时,分析结果指出:车速影响总噪声不同声源的贡献程度,车速越高,车辆噪声贡献量越大^[15];而车速越低,桥面振动辐射噪声的贡献量就越大;但他们并未分析桥梁结构噪声的绝对大小

与列车速度的关系。战家旺等对北京地铁 5 号线高架桥进行的噪声实测试验,分析表明:当地铁列车车速在 30~70 km/h 范围内变化时,混凝土箱梁的结构噪声随着车速的增大而增大^[16]。

刘加华通过相干性分析和重相干分析桥梁结构噪声的特性,得出结构低频噪声随列车速度的增加无显著变化^[17]。

表 2 不同噪声成分的预估值

噪声成分	列车时速/(km·h ⁻¹)			
	240	300	350	400
轮轨噪声	64	67	69~70	72
车辆气动噪声	60~62	66~67	70~71	74
受电弓噪声	62	68	72	74~75
结构噪声	<60	63	66	69
总噪声	68	72~73	76	79

高飞等计算了地铁列车速度对桥梁结构噪声的影响,结果表明:当车速在 40~120 km/h 范围内变化时对结构噪声的影响较小,声级的差异在 1.02 dB (A) 以内波动^[18]。

1.3 梁板声辐射效率的影响因素

Putra 等对比研究了板在简支、固支的边界条件下声辐射效率的差异:相比于简支板,固支板会大幅减少声辐射效率^[19]。

Xie 等用模态叠加法研究了受点激励矩形板的声辐射效率;研究指出:对于长宽比较大的板(带状板),当频率低于带状板第一阶自振频率时,板的声辐射效率与其短边长度的平方成比例;当频率位于基频和带状板的第二阶弯曲模态频率之间时,带状板平均声辐射效率和内损耗因子成比例,而对内损耗因子的依赖程度是长宽比适中的矩形板的两倍;最后,文献给出了带状板平均声辐射效率的近似计算表达式^[20]。

Thamburaj 对夹芯板结构的声振特性研究指出:在不同的频率域内,声的传播除了受质量荷载和刚度影响外,板厚有很大作用;为了使板有效的阻断声音,板厚最好等于或大于声波波长的 1/4^[21]。

赵志高等分析了四面简支的薄板,从理论上指出了激振频率与板的厚度是影响板声辐射的重要参数^[22]。

1.4 桥梁结构噪声与局部振动模态的关系

Lee 等研究了箱型梁的桥梁结构噪声受局部模态振动的影响,箱梁顶板的边缘虽是固支但却由腹板支撑,是可运动的,因此局部振动模态分两种,分

别是中心模态(顶板中心运动四周固定)和边缘/腹板模态(顶板中心固定边缘运动)。实验结果表明:在频率低于 520 Hz 时,腹板模态的输入阻抗较中心模态的小,当和中心模态有相当的辐射效率,则频率小于 520 Hz 的腹板模态可能辐射更大的噪声;文中提出了轻质的夹芯板或蜂窝板来代替水泥板来增加阻尼以减小腹板激振引起的响应^[23]。

谢伟平等^[24]、孙亮明^[25]均讨论了声场流体与振动壳体声辐射之间的关系;相较于水、空气对于壳体的声辐射影响很小,可以忽略。

但空气流体对结构噪声的影响不止于对声辐射的影响。张迅等以某城际铁路 32 m 混凝土简支箱梁为例,针对桥梁结构噪声进行了理论预测与试验研究,指出箱梁内空腔的声学模态对结构噪声有影响;将试验结果与数值仿真分析进行对比后发现:箱梁结构噪声的实测与计算结果曲线基本吻合,并在 1/3 倍频程中心频率 315 Hz 处均出现峰值;在关于峰值频率的讨论中发现:在中心频率 315 Hz 的带宽内,结构振动和空腔声学模态存在多处吻合,极易诱发箱梁内产生空腔共鸣现象^[10]。

2 桥梁结构噪声计算方法的研究

2.1 解析法

对于简单声源的噪声分析,可以得到解析解或近似解析解。而对于表面形状复杂的大型工程结构,解析解或近似解析解则难以求得。

Au 等根据瑞雷积分和板的动力响应解析解,获得了时域下板周围的声压分布^[14]。孙亮明通过傅里叶积分变换和平稳相法研究箱型梁声辐射问题,根据此法得到了空气中无限长混凝土箱梁声压的理论解析表达式,但并没有进行试验验证^[25]。

2.2 统计能量法

Janssens 等运用功率流分析法来计算桥梁结构噪声,先利用传递阻抗计算从扣件传递到桥梁结构的输入功率,再将结构分成耦合的梁板子系统,计算各部分辐射出的声功率和声压并求和;计算结果通过实测对比验证^[26]。

在桥梁结构噪声所在的低频区,由于模态密度较低,统计能量法的应用受到限制。李小珍等^[9]通过结合边界元法和统计能量法理论,提出高速铁路桥梁结构噪声全频段(整个可听阈:20~20 000 Hz)预测方法:将整个频段以 250 Hz 为界,分为低频段和高频段两部分;以车-线-桥空间耦合振动分析为前提,在不同频段建立直接/间接边界元和统计能量

模型,桥梁和钢轨振动响应作为边界元模型边界输入和统计能量模型能量输入,在不同频段进行稳态声辐射分析,得到桥梁结构噪声全频段结果,并在某城际铁路的噪声测试中进行了试验验证^[10]。

2.3 单元离散法

结构噪声属于低频噪声,中低频区的振动声辐射问题通常采用单元离散法分析:对结构采用有限元离散,对声场可采用边界元法。已有不少文献^[27-32]利用有限元、边界元对桥梁结构的进行声振分析研究,提供了有意义的结论。近年来,进一步分析桥梁结构的局部振动特性与提高离散单元法的数值计算效率是研究的重点。

Li等^[33]采用有限元法研究了瞬态的列车一线路一桥梁相互作用问题,重点分析了桥梁的局部振动,采用边界元法求出了与频率相关的模态声传递向量,再通过时频域转换得到时域内的声压。韩江龙等^[34]采用有限元法分析了车辆一线路一桥梁相互作用,进一步研究板厚和加肋对槽型梁结构噪声的影响。

考虑到有限元模型的计算量巨大,为提高分析效率,张迅等^[35]在平截面假定条件下,通过建立梁一板混合单元有限元模型简化了桥梁振动的计算,提高了计算效率,同时通过与现场试验和全板单元模型对比,验证了新模型的计算精度。结果指出:在梁一板混合单元模型中,跨中板单元取5倍以上梁高时,桥梁的高频振动与结构噪声仿真值均能取得良好的精度;在30 m内的计算得到的结构噪声也与全板单元的结果一致,但在30 m外,前者比后者计算值要小2 dB左右。

3 控制桥梁结构噪声的措施

要减小桥梁结构噪声可从减小桥梁结构振动、限制振动在结构中的传播和加快振动衰减三个方面展开。

3.1 减振降噪

结构噪声为振动能量经过轨道结构传递到桥面及其他桥梁构件,因此改变轨道结构型式是一种主观上必需的减振方式,相关的测试与研究很多^[36-38]。

国内某地铁高架线路中采用梯形轨枕、道床垫浮置式整体道床和普通整体道床三种不同的轨道结构型式,刘鹏辉和杨宜谦^[11]对其进行了噪声测试,并将梯形轨枕和道床垫浮置式整体道床的测试结果与普通整体道床进行对比,结果表明:相对于普通整体道床,梯形轨枕、道床垫浮置式整体道床对于40

~80 Hz的桥梁结构噪声有明显的降低(见图1);在全封闭声屏障条件下,列车通过时段,梁底面以下0.3 m处12.5~250 Hz频段A声级,梯形轨枕相对普通道床降噪效果为3.6 dB(A);道床垫浮置式整体道床相对于普通整体道床降噪效果为4.0 dB(A)(见表1),若采用C声级,则降噪效果更加显著,梯形轨枕的降噪效果为6.9 dB(C),道床垫浮置式整体道床的降噪效果为7.8 dB(C)。实测数据表明轨道减振手段对于减少桥梁结构噪声是有效果的。

通过增加桥梁结构的刚度来减小桥梁结构振动也是一条降低声辐射的途径。而增加结构刚度的思路有多种:改变结构边界条件、改变板厚、加肋和改变桥梁结构截面形式等。

Kimura等^[39]进行的板冲击试验表明,边梁固定支撑能够增加输入阻抗减小噪声辐射。沈坚等^[40]指出若使高架结构刚度增大,则仅对控制低频噪声有效。张博^[41]提出了通过改变箱梁边界条件,从而使前几阶重要的受弯模态提升,使辐射声场能量向荷载激励幅值较小的高频移动,来减少总体的辐射声压级,并试用于上海轨道一号线,但应用效果还未见相关报道。

Wu等^[42]研究指出通过改变板厚和加劲肋可以减小结构振动的均方振动速度,但同时增加了声辐射效率。振动结构的声辐射总功率的升降由声辐射效率和结构振动的均方速度共同决定:若是振动均方速度的减小带来的减振效果无法抵消辐射效率的增加,则增加板厚和加劲肋反而会使结构辐射更多的噪声。因此板厚和加劲肋的改变和增减是需要最优化的过程,荷兰低噪声桥梁课题组对一座钢板桥进行了腹板、翼缘板厚度200多种不同组合的噪声测试,成功开发了一种声学上达到最佳板厚组合的钢箱梁,试验验证了适当地改变板的厚度可以显著降低桥梁结构噪声^[43]。Bewes^[44]对混凝土桥、钢筋混凝土桥和钢桥研究表明,增加桥梁某些结构组件的厚度,可以降低这一组件的结构噪声,但同时会增加其它组件的结构噪声。刘聪等^[45]研究了加筋板结构,指出对结构加筋也要考虑激励频率与结构固有频率的关系,若是激励频率与固有频率相差很大,加筋可使结构辐射声功率降低,但若加筋后改变结构固有频率,使其接近激励频率时,通过加筋来降低结构辐射声功率的方式是不可行的。

张迅等^[46]计算指出:在相同支承条件和跨度下,高速铁路32 m单箱单室箱梁的动力响应均比单箱双室箱梁大;腹板倾角越小,测点的平均声级越

小。方小华^[47]和韩江龙^[48]均是通过有限元计算模型讨论了不同梁型截面的声学特性。分析都指出 U 型梁(槽型梁)的结构噪声大于箱梁,而且单箱双室箱梁的减振降噪效果又略优于单箱单室箱梁。香港西部铁路的通过修改桥梁的截面形状,达到了降低结构噪声的目的。J. H. Cooper 等^[49]对香港西铁原有的截面进行了优化,将箱梁的腹板“往内缩”,使得箱梁腹板直接置于轨道之下,与原有设计相比,箱梁质量减小 30%,而且桥梁结构噪声级也降低(图 2)。

3.2 限制噪声传播

对板状结构穿孔是一种经常被使用到的实际工程噪声控制手段,它可以有限的减少结构的噪声辐射效率,达到减少结构噪声的目的。

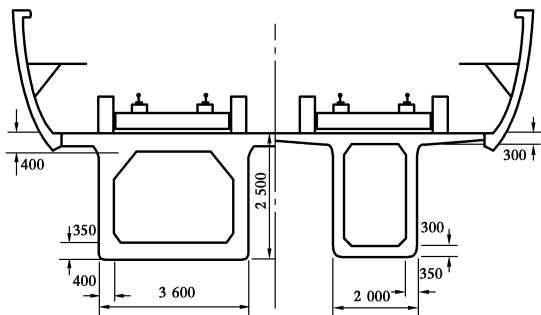


图 2 香港西铁高架桥原设计(左)和改进后的设计(右)

Fahy 和 Thompson^[50]提出了对刚性板开孔的模型计算。计算显示开孔有效的减小了刚性板在低频区域的声辐射效率。Putra 和 Thompson^[51]又对开孔板的声辐射模型进行了优化,计算指出:增加开孔板的开孔率或者在相同的开孔率中减小空隙直径都能减少开孔板的声辐射效率;计算预测与试验验证结果吻合。

潘之明^[52]对筒支于空气中的两段封闭、开口的钢筋混凝土圆柱壳进行了数值计算,结果表明:在同一点处的响应,开孔圆柱壳上的方案,声级大约降低了 10dB(A)。开孔圆柱壳有效地改变了原结构的噪声辐射效率,因此降低了结构的低频噪声。

Daneryd 等^[53]提出了车轮穿孔来降低车轮噪声,通过车轮穿孔造成声学短路来减少声辐射效率,此方法的效果取决于孔洞的大小和孔洞间距;并且指出此方法只对低频有效。

开槽、开洞是实际工程中限制振动传播的有效措施,尽管这些工作已在研究项目中做过,但对于桥梁结构来说,这些措施会给施工带来不便或是影响结构设计,因此关于这些措施在实际桥梁的应用中未见报道,但也为减少桥梁结构噪声提供了一种

思路。

3.3 加速能量衰减

增加阻尼层是加速振动在传播过程中衰减的常用手段。在有砟轨道上,Stüber^[3]在道砟和桥梁之间铺设 30 mm 厚的橡胶垫层,结构噪声降低 10 dB(A)。

Moritoh 等^[4]指出在日本新干线中的钢构件里加入阻尼层降噪效果明显。Michishita 等^[54]将钢板梁模拟成一个无限长的弹性条状板,并通过数值模型模拟结构表面粘贴阻尼材料吸收结构振动能来讨论降低结构噪声的效果 Kruger^[55]优化计算了阻尼材料的粘贴位置和面积。Poisson 等^[56]对钢轨上和桥面板上分别安装了调频质量阻尼器的 Gaviganor 钢桥进行了结构噪声的测试,结果表明:车速在 50~80 km/h 时,在 30~50 Hz 的频率范围内声级降低了 4~6 dB(A)。

4 结 论

本文综述了结构噪声的特性和计算方法,并以此为基础从噪声的产生、传播和衰减三个方面介绍了降低桥梁结构噪声的措施。

1) 轨道交通桥梁结构噪声属于低频噪声,其频率主要分布在 250 Hz 以内,峰值频率多以 50 Hz 为主。

2) 桥梁结构噪声与列车车速之间的关系还没有定论,有待进一步研究。

3) 结构声辐射效率受边界条件、板厚和激励频率的影响。

4) 近年来声振分析都采用以车—线—桥耦合振动为前提的离散单元数值方法,精确程度与计算效率都有所提高,但仍有待进一步优化;解析法的应用还有待检验。

5) 改变轨道结构以达到减振降噪的方式是目前桥梁结构噪声控制的最常用手段,其效果在实际工程运用中得到了验证与肯定。

6) 通过改变桥梁结构的边界条件,调整结构刚度,在理论上是可以达到降低桥梁结构噪声的目的,但实际应用较少,且运用效果未见报道。

7) 对于设置加劲肋和修改截面形式的降噪措施现在还没有定论。

8) 可以通过增加阻尼层来减少桥梁结构噪声。

参考文献:

[1] Mirowska M, Mroz E. Effect of low frequency noise at

- low levels on human health in light of questionnaire investigation[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2000 Conference. 2000, 5: 2809-2812.
- [2] 李宝银, 杨宜谦. 铁路和地铁桥梁结构噪声研究[J]. 土木建筑与环境工程. 2013, 35(Z2): 28-32.
- [3] Stüber C. Air-and structure-borne noise of railways [J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 43(2): 281-289.
- [4] Moritoh Y, Zenda Y, Nagakura K. Noise control of high speed Shinkansen [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 319-334.
- [5] 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.
- [6] 朱彦, 陈光冶, 林常明. 城市高架轨道桥辐射噪声的计算与分析[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(3): 37-41.
- [7] 高飞. 城市轨道交通高架结构振动与噪声影响的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [8] 张旭, 宋雷鸣. 列车通过高架桥结构时的运行噪声统计能量分析(SEA)研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(2): 77-78.
- [9] 李小珍, 张迅, 刘全民, 等. 高速铁路桥梁结构噪声的全频段预测研究(I): 理论模型[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 101-107.
- [10] 张迅, 李小珍, 刘全民, 等. 高速铁路桥梁结构噪声的全频段预测研究(II): 试验验证[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 87-92.
- [11] 刘鹏辉, 杨宜谦. 国内某地铁一期工程高架线减振降噪测试研究总报告(R). 北京: 北京铁科工程检测中心. 2014.
- [12] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm-TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)[S].
- [13] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS) vom 20. Dezember 1999 [S].
- [14] Au F T K, Wang M F. Sound radiation from forced vibration of rectangular orthotropic plates under moving loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3): 1057-1075.
- [15] 贺建良, 万泉, 蒋伟康. 高架城市轨道交通的噪声特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(8): 57-60.
- [16] 战家旺, 夏禾, 善田康雄, 等. 城市轨道交通高架桥梯形轨枕轨道降噪性能试验分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 37-38.
- [17] 刘加华. 从轨道结构降低城市轨道交通高架结构振动与噪声的研究与应用[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [18] 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.
- [19] Putra A, Thompson D J. Sound radiation from rectangular baffled and unbaffled plates [J]. Applied Acoustics, 2010, 71(12): 1113-1125.
- [20] Xie G, Thompson D J, Jones C J C. The radiation efficiency of baffled plates and strips [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280(1): 181-209.
- [21] Thamburaj P. Structural-acoustic studies of sandwich structures for global transport aircraft[M]. 2001.
- [22] 赵志高, 黄其柏, 何铿. 基于有限元边界元方法的薄板声辐射分析[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(1): 39-43.
- [23] Lee Y Y, Ngai K W, Ng C F. The local vibration modes due to impact on the edge of a viaduct [J]. Applied Acoustics, 2004, 65(11): 1077-1093.
- [24] 谢伟平, 陈西德. 钢筋混凝土圆柱壳声辐射特性的有限元研究[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 769-773.
- [25] 孙亮明. 箱型梁结构噪声的理论研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [26] Janssen M H A, Thompson D J. A calculation model for the noise from steel railway bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 295-305.
- [27] Oulaa N, Rezaiguia A, Laulagnet B. Vibro-acoustic modelling of a railway bridge crossed by a train [J]. Applied Acoustics, 2006, 67(5): 461-475.
- [28] Schedin S, Lambourg C, Chaigne A. Transient sound fields from impacted plates: Comparison between numerical simulations and experiments [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 221(3): 471-490.
- [29] 胡新伟, 黄醒春. 高架轨道梁振动与结构噪声的数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2007, (2): 54-56.
- [30] 张鹤. 交通荷载作用下桥梁振动与噪声问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [31] 吴国强. 基于边界元法的高速铁路混凝土箱梁振动声辐射研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [32] Kawatani M, Kim C W, Kawada N, et al. Assessment of traffic-induced low frequency noise radiated from steel box girder bridge [J]. Int J Steel Struct, 2008, 8(4): 305-314.
- [33] Li Q, Xu Y L, Wu D J. Concrete bridge-borne low-frequency noise simulation based on train-track-bridge dynamic interaction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2457-2470.
- [34] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 板厚和加肋对槽型梁结构噪声

- 的影响[J]. 振动工程学报, 2012, 25(5): 589-594.
- [35] 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.
- [36] Walker J G, Ferguson N S, Smith M G. An investigation of noise from trains on bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 307-314.
- [37] Wang A, Cox S J, Gosling D, et al. Railway bridge noise control with resilient baseplates [J]. Journal of sound and vibration, 2000, 231(3): 907-911.
- [38] Crockett A R, Pyke J R. Viaduct design for minimization of direct and structure-radiated train noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 883-897.
- [39] Kimura S, Inoue K. Practical calculation of floor impact sound by impedance method [J]. Applied Acoustics, 1989, 26(4): 263-292.
- [40] 沈坚, 张俊峰, 耿传智. 香港西线铁路噪声控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2005, 8(3): 65-67.
- [41] 张博. 都市高架轨道箱梁的声学优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2006 年.
- [42] Wu X. Experimental validation of finite element and boundary methods for predicting structural vibration and radiated noise [D]. USA: the University of Kentucky, 1991.
- [43] 郑陵 译. 荷兰的低噪声钢桥设计[J]. 国外桥梁, 1998(1): 29-31.
- [44] Bewes O G. The calculation of noise from railway bridges and viaducts [D]. USA: University of Southampton, 2005.
- [45] 刘聪, 姜哲. 薄板结构辐射声功率及其灵敏度分析[J]. 噪声与振动控制, 2012, (4): 116-120.
- [46] 张迅, 李小珍, 刘全民, 等. 混凝土箱梁的结构噪声及其影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 409-414.
- [47] 方小华. 城市轨道交通高架线桥梁结构与噪声辐射相关的振动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [48] 韩江龙. 城市轨道交通桥梁结构噪声特性及降噪技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [49] Cooper J H, Harrison M F. Development of an alternative design for the West Rail viaducts [J]. Proceeding of Institution of Civil Engineers, Transport, 2002, 153(2): 87-95.
- [50] Fahy F J, Thompson D J. The effect of perforation on the radiation efficiency of vibrating plates [J]. In, Proceedings of the Institute of Acoustics Spring Conference 2004. Institute of Acoustics Spring Conference St. Alban, UK, Institute of Acoustics, 223-234.
- [51] Putra A, Thompson D J. Sound radiation from perforated plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(20): 4227-4250.
- [52] 潘之明. 开孔钢筋混凝土圆柱壳声辐射特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [53] Daneryd A, Nielsen J, Lundberg E, et al. On vibro-acoustic and mechanical properties of a perforated railway wheel [C]//Proceedings of the sixth International Workshop on Railway Noise, 1998: 305-317.
- [54] Michishita K, Yamaguchi Z, Nakajima N, et al. Numerical study on reduction of the elevated structure noise by surface absorption on plate girders [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(9): 1143-1147.
- [55] Kruger D H. Minimizing the radiated sound power with minimal structural modification [D]. USA: Iowa State University, 1995.
- [56] Poisson F, Margiocchi F. The use of dynamic dampers on the rail to reduce the noise of steel railway bridges [J]. Journal of sound and vibration, 2006, 293(3): 944-952.

(编辑 吕建斌)