

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.007

铁路和地铁桥梁结构噪声研究

李宝银^a, 杨宜谦^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:分析桥梁结构噪声产生的机理和声振特性,介绍了国内外结构噪声的相关标准,综述了结构噪声的测试方法及计算方法,并指出了其不足之处,探讨了列车速度、空气、水等不同流体对结构噪声的影响,以及内部空腔结构和薄板等结构噪声特性,介绍了减小轨道结构振动、改变结构边界条件、增加结构刚度、改变桥梁截面等降低桥梁结构噪声的措施,指出多种措施的联合使用才是降低桥梁结构噪声的合理方法。

关键词:铁路;地铁;桥梁结构噪声;低频噪声;降噪

中图分类号: TB535; U233 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S2-0028-05

Research on Bridge Structure Noise of Railroads and Underground

Li Baoyin^a, Yang Yiqian^b

(a. Graduate Faculty; b. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper analyses the generating mechanism of radiation noise which produced by bridge structures and vibro-acoustic characteristics, and reviews the current situation of the researches on the relevant standards of structure noise at home and abroad. The author summarizes the method of measurement and calculation about structural noise at home and abroad, further notes their limits. This paper explores the impact of such factors as rain speed and other different fluids on structure noise. The noise characteristics of structures like cavity structure and thin-slab structure are also discussed. Strategies for reduce the bridge structure noise are summed up by reducing the vibration of track structure, altering the structure of boundary conditions, increasing the stiffness and changing the bridge cross section. Finally it comes to a conclusion that a combination of these strategies is the root way to settle the question of the bridge structure noise.

Key words: Railroads; Underground; Bridge structure noise; Low frequency noise; Noise Reduction

随着经济的发展及人类生活水平的提高,人们对环境问题越来越关心。铁路和地铁引起的振动与结构噪声问题就是其中之一。1963年,以Wilson为首的欧洲噪声问题委员会提交的报告指出铁路噪声在未来是影响人类生活的一个潜在因素。1963年,Stuber^[1]对两座钢桥进行了噪声级比较,结果表明道砟桥面比明桥面的A计权噪声级低。1975年,Stuber^[2]对另外一座铺设砂垫层的桥梁进行研究,结果显示梁底噪声降低。在1966年、1969年、1971年,ORE(国际铁路联盟试验研究所)分别进行了类似于Stuber的桥梁噪声试验研究,这是桥梁噪声研究的开端。

长期以来,对铁路噪声的研究主要集中在轮轨噪声、空气动力噪声等高频噪声,而桥梁结构低频噪声研究较少。近年来,对桥梁结构噪声的研究逐渐活跃,其中以欧美、日本和香港的研究最有代表性。

1 桥梁结构噪声产生机理及低频噪声标准

1.1 桥梁结构噪声产生机理

铁路和地铁桥梁结构噪声产生机理:当列车通过桥梁

时,列车移动荷载通过轨道结构传递给桥梁结构及其它桥梁附属构件,引起振动并向四周辐射噪声,即桥梁结构噪声。桥梁结构噪声以低频噪声为主,其传播距离比高频噪声更远,传播范围更广且衰减更慢。如果人长期处于低频噪声的环境,容易神经衰弱、失眠等,因此低频噪声在医学界被称为“隐形杀手”^[3]。

1.2 国内外结构(低频)噪声标准

各国对于低频噪声的规定,有些是专门针对铁路或地铁的结构噪声,其它通常是针对室内低频噪声的规定,但是这些规范有时也被用作铁路或地铁项

目振动噪声评估的参考依据。

各国对低频噪声的频率范围未达成共识,但大多限定在16~250 Hz。室内噪声的常采用的声级也不尽相同,中国^[4]、瑞士^[5]等一般采用等效A声级 L_{pAeq} ,美国^[6-7]采用最大A声级 L_{pAmax} ,而ISO^[8]、澳大利亚^[9]同时采用两个指标; L_{pAmax} 和 L_{pAeq} 的不同在于:前者与人睡眠质量相关,而后者与人的生活质量相关^[10]。德国^[11]、瑞典^[12]等国家同时采用 L_{Aeq} 和 L_{Ceq} ,且当 $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 15 \sim 20$ dB,认定含有低频噪

收稿日期:2013-09-30

作者简介:李宝银(1987-),男,硕士生,主要从事结构减振降噪研究,(E-mail)yinbaoli1987@163.com。

杨宜谦(通信作者),男,研究员,硕士生导师,(E-mail)yqyang@yeah.net。

声成分。各国标准的限值范围不尽相同: L_{pAmax} 变化范围为30~45 dB, L_{pAeq} 变化范围为25~40 dB,不相同的原因可能是标准侧重的噪声(结构噪声、空气噪声、低频噪声等)来自于建筑物内、外不同的声源。各国最大声级以 L_{pASmax} (时间常数:慢)为主,只有挪威和瑞典采用 L_{pAFmax} (时间常数:快)。 L_{pAFmax} 一般比 L_{pASmax} 大1~2 dB^[8]。对于低频噪声的测量,50 Hz以下的噪声测量难度大于50 Hz以上噪声的测量难度。杨宜谦^[13]全面分析了世界各国的结构(低频)噪声标准。

2 桥梁结构噪声测试和计算

2.1 结构噪声的测试

列车在桥梁上运行时,对桥梁进行结构噪声的现场测试,将测量位置设在桥梁结构底部。桥梁结构的轮廓充当了屏障的功能,一定程度上屏蔽了轮轨噪声等干扰,这样结构噪声的测量数据可靠性更高。Moritoh等^[14]介绍了日本新干线桥梁结构噪声测试并对数据进行了分析,利用桥梁上部结构封闭物,减小空气噪声等对测试数据准确性的影响,见图1。测试得到距离混凝土桥梁线路中心25 m处的结构噪声 $L_s(P_{25})$ 的预测公式:

$$L_s(P_{25}) = 10 \lg \sum_{f_n} 10^{\frac{\{L_0(f_n) - \Delta L\}}{10}} \quad (1)$$

$L_0(f_n)$ 为桥梁结构底部 P_0 点1/3倍频程A声级(f_n 为中心频率); $\Delta L(f_n)$ 为 P_0 点和 P_{25} 点1/3倍频程A声级差值(P_0 点和 P_{25} 点如图1所示)

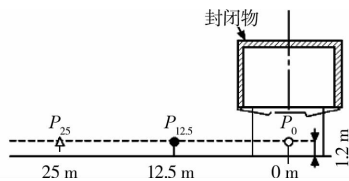


图1 混凝土桥梁结构噪声测试

并且指出桥梁结构噪声与列车速度有一定的相关性,结论见表1。

表1 日本新干线距高架桥线路中心25 m测试结果

车速/(km·h ⁻¹)	240	300	350	400
结构噪声/dB(A)	<60	63	66	69

Ngai等^[15]对混凝土箱梁铁路桥进行了结构噪声测试(见图2),在点1处采用麦克风等测试仪器测试桥梁的结构噪声,并且将麦克风放在具有屏蔽噪声性能的圆柱体内,以减小背景噪声对测量数据的影响。李小珍等^[16]也采用了类似的方法对某城际铁路32 m单线和双线单室混凝土简支箱梁桥进行了噪声测试,研究了箱梁结构噪声的声辐射特性,以及峰值频率产生的原因。Ngai^[17]通过分析日本新干线和香港地铁桥梁的测试数据,指出车速、桥梁结构外形和高架系统设计的不同可能是造成结构噪声峰值频率不同的原因。

Au等^[18]研究了矩形正交各向异性薄板在简支、固支等约束条件下承受移动荷载作用的振动声辐射问题,结果表明,移动荷载速度越快,声压越大。战家旺等^[19]对北京地铁5号线实测数据的分析表明,箱梁底部的结构噪声随车速的

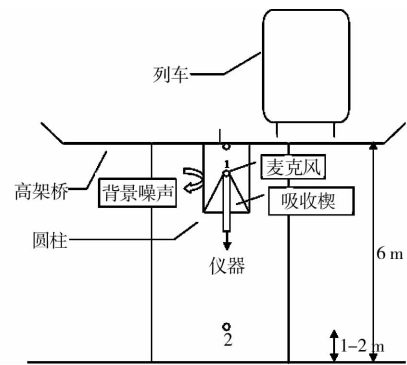


图2 混凝土铁路桥梁振动和结构噪声测试

增大而增强。贺建良等^[20]对上海地铁3号线的噪声特性进行了研究,采用偏奇异值重置方法辨识主要声源,对1 000 Hz以下中低频噪声分段(0~300 Hz; 300~600 Hz; 600~1 000 Hz)分析结果表明:车速越高,车辆噪声对总噪声的贡献度越大,车速越低,桥面振动引起的结构噪声对总噪声的贡献度越大。虽然说明噪声的贡献度与速度有关系,但是没有说明结构噪声与车速的关系。高铁等^[21]计算研究了40~120 km/h范围内车速对地铁桥梁结构噪声的影响,结果表明:车速变化对结构噪声的影响较小,声级的差异在1.02 dB(A)以内波动。刘加华^[22]对上海地铁1号线北延伸呼兰路一秦和路段高架线进行了实测,指出结构噪声随车速的增加变化不显著。因此车速对噪声的影响还没有统一的定论,还需要更进一步的研究。

2.2 结构噪声的计算

板结构振动引起的声辐射问题的理论已经相对成熟。板的振动模型、辐射效率和传播特性得到了广泛的研究,建立了适用于板结构的理论、实验和预测方法。薄板中波的传播不仅与板面介质有关,而且不同的薄板边界条件,得到的辐射声压也是不同的。刘先锋等^[23]指出同一薄板其辐射功率不受激励点位置变化而改变。赵志高等^[24]研究了四面简支的薄板,指出激励频率和板厚度是影响板声辐射的重要参数。

温玉君^[25]对地铁箱梁的研究指出,箱梁的内部空腔的声场共振可能会使桥梁的上下两个面的辐射声压增加。通过共形映射可以把箱梁声辐射问题转化为圆柱壳来求解,谢伟平等^[26]研究了两端简支的钢筋混凝土加肋壳体在空气中的声辐射问题,计算表明:在低频阶段内,壳体内部空气对壳体外部辐射声级影响甚微,在研究壳体的振动和声辐射特性时可以不考虑内部空气的影响。孙亮明^[27]研究了无限长混凝土圆柱壳处于不同流体中的声辐射问题;壳体处于外部充满水的环境产生的噪声明显大于空气中,即重质流体对结构的影响比轻质流体大,空气对壳体的作用可以忽略。

Janssens等^[28]、Lee等^[29]采用统计能量法计算了包括桥梁结构噪声在内的总体噪声。Augusztinovicz等^[30]研究了钢箱梁的结构噪声,采用有限元、统计能量法和边界元法进行数值模拟。统计能量法适用于高频区、高模态密度的平均噪声的预测,在低频区,由于模态密度较低,统计能量法的应用受到限制。

Au等^[18]采用解析法研究了简支、固支等约束条件下的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,基于瑞利积分和薄板的动力响应解析解,获得了时域下

板周围的声压分布。Ngai 等^[15]采用有限元法分析了混凝土简支箱梁,确认结构噪声和振动的响应频率。朱彦等^[31]在已知桥梁振动特性的条件下,基于简化的二维模型,应用边界元法进行了噪声场和频谱的计算预测。Li 等^[32]采用有限元法研究了瞬态列车—线路—桥梁动力相互作用问题,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,再通过时频转换得到时域内的声压。韩江龙等^[33]采用有限元法分析了车辆—轨道—桥梁结构相互作用,进一步研究板厚和加肋对槽型梁结构噪声的影响。赵志高等^[34]采用有限元法和瑞利积分研究了四面简支的薄板的厚度和激振频率对其声辐射的影响。桥梁结构的振动分析,有限元法要选择能够反映桥梁结构局部振动特性的单元模型。有些单元不够精细,无法实现局部振动特性的分析。韩江龙^[35]指出铁路桥梁动力学研究需要考虑车辆、轨道、结构的相互作用,以及轨道不平顺等因素,因此很难得到结构声辐射的解析解。

3 降低桥梁结构噪声的措施

3.1 改变轨道结构

Wang 等^[36]和 Walker 等^[37]研究了轨道隔振降噪,降低轨道的支撑刚度,可以减小移动荷载传递到桥梁结构的作用力,进而降低桥梁产生的噪声,但同时增加了钢轨的振动,增加了高频区噪声,故轨道隔振的整体效果较小。而刘加华^[22]设计了一种新型轨道扣件,测试表明,所有频段内的噪声都有不同程度的降低,总体噪声水平有显著的降低,表明钢轨隔振对降低结构噪声有明显的作用。战家旺等^[38]对比分析了列车通过梯形轨道和普通板式轨道时桥梁附近的噪声,结果表明:梯形轨枕轨道的降噪能力明显优于普通板式轨道。高飞等^[39]对北京 5 号线梯形轨枕桥梁试验段进行了测试,梯形轨枕具有良好的减振降噪作用,低频的振动速度最大值可降 70% 以上,结构噪声最大可降低 2.4 dB(A)。方小华^[40]比较了浮置板道床和普通整体道床的桥梁振动和结构噪声,浮置板道床明显优于普通整体道床。香港西部铁路应用了浮置板轨道和弹性支承块轨道结构等多种措施,使西铁成为世界上最安静的轨道交通线路之一。因此通过轨道隔振可以有效地降低噪声,但需要协调好各构件之间的刚度。

3.2 改变结构边界条件

Au 等^[18]的研究结果表明:在移动荷载作用下,改变板的边界条件,使板的刚度增大,结构的频率增高,产生的声压变大。丁勇等^[41]指出提高桥梁端横梁的刚度可以降低车辆进、出桥时的冲击效应,降低桥梁低频噪声,其作用在高频范围内效果更明显。作为一种简便的局部加固方法,桥头横梁填充混凝土能获得较好的降噪效果。Wu^[42]指出提高箱梁的固有弯模态可以使箱梁在这些固有频率处受到较小的激励力从而减小振级和辐射声级。改变梁边界条件,从简支过渡到固支,来降低噪声。刘先锋等^[23]研究了不同激励点,金属薄板在简支边界约束和固支边界约束条件下的声辐射情况,结果表明:与简支相比,固支约束薄板能显著降低薄板噪声辐射能力。

3.3 改变板厚和加肋

Janssens 等^[43]指出荷兰铁路钢桥板厚一般在 15 ~ 30 mm 之间,通过改变钢板的厚度来降低声辐射的效果微乎

其微的,增加桥梁的输入阻抗是切实可行的措施。荷兰低噪声桥梁课题组成功开发了一种钢桥,梁型是箱梁,板的厚度经过优化以达到声学上最佳的板厚组合。他们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,适当地增加板的厚度可显著降低桥梁结构噪声^[44]。

韩江龙等^[33]通过对槽型梁进行结构振动分析,确定不同构件/面板对场点总声压的影响,然后增加板厚、加肋改变构件/面板的局部刚度,考查对声辐射的影响。分析表明:槽型梁底板对远场区结构噪声的影响大于腹板,距轨道中心线 30 m 处,底板影响明显;增加底板厚度的降噪效果好于增加腹板厚度;设置横肋也能有效降低远场结构噪声,横肋在全跨布置比仅在跨中加密布置效果好,车速高时增设横肋的降噪效果好于车速低时。Bewes^[45]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,因此这不是理想的措施。

谢伟平^[26,46]、孙亮明等^[47]对钢筋混凝土加肋壳体声辐射问题进行了研究,由于内部钢筋和环肋的影响,增加了结构的不均匀性,使系统的共振频谱更为复杂,加肋壳体较无肋壳体较大地改变了系统的声辐射特性。加设合理的环肋能够改变壳体的声辐射特性并可降低结构的辐射声,小间距环肋壳体的辐射声级幅值小于大间距的环肋壳,这为降低空气中钢筋混凝土上结构振动引起的结构噪声提供了一种解决办法。

刘先锋等^[23]对加筋薄板和光板表面声压和空间平面场点声压进行了比较,加筋后的薄板其表面声压最大值和空间平面场点的最大声压值都远远小于光板。赵志高等^[34]指出:声辐射功率随着板厚的增加,其总体趋势是减小的,但不是单调减小,在某些特殊的厚度下,声辐射功率随着板厚的增加,其辐射功率反而增加。产生此种现象的原因是由于当薄板的厚度变化时,其中某一阶固有频率变化到与外界的激励频率十分接近时,导致结构共振而使声辐射功率增加。刘聪等^[48]研究了加筋板结构,当激励频率远离结构固有频率时,加筋可以使结构辐射声功率降低;然而加筋后结构的固有频率接近激励频率时,甚至会有负面影响,这种情况下,通过加筋来降低结构辐射声功率是不可行的。

3.4 改变桥梁结构的截面形式

荷兰低噪声桥梁课题组设计的钢桥截面为一种箱梁,板厚经过优化,而且两侧槽可以埋置钢轨,可以为钢轨提供垂直和水平刚度,同时可有效的封闭钢轨^[44]。张迅等^[49]计算了高速铁路 32 m 单箱单室和单箱双室箱梁声辐射特性,其结果表明:在相同跨度和支承条件下,单箱单室箱梁的动力响应和噪声辐射均比单箱双室箱梁大;考察腹板倾角 0°、12°、24° 时箱梁结构噪声的变化,发现腹板的倾角越小,测试场点的平均声级越小。方小华^[40]采用 ANSYS 建立了三维有限元模型,对单箱单室箱梁、单箱双室箱梁、U 型梁三种断面形式对桥梁传递特性的影响分析。在 20 Hz 以内,各种桥梁形式的底板垂向振动差别不大,在 20 Hz 以上,U 型梁结构噪声最大,两种箱梁比较接近,但双箱单室的减振降噪略优于单箱单室箱梁。张迅等^[47]以跨度 32 m 混凝土简支箱梁为研究对象,香港西部铁路通过修改桥梁的截面形状,降低桥梁的结构噪声。Cooper 等^[50]通过大量的计算,对香港西铁混凝土箱梁进行优化设计,采用了一种更薄的混凝土截面,使

得箱梁的腹板直接置于轨道之下。与原先的设计相比,不仅箱梁质量减小 30%,而且结构噪声级也降低。见图 3。

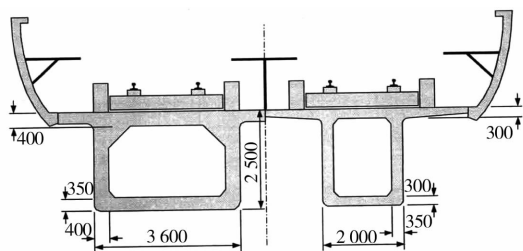


图 3 香港西铁桥梁原先的设计(左),改进后的设计(右)

Crockett 等^[51]对香港西铁延伸段进行了研究,降低噪声辐射面积,将双线桥变为单线桥可以显著降低结构噪声,同时铺设柔性垫板支承的浮置板降噪效果更好。证明了香港西铁可以成为全世界最安静的地铁原因就是多种降噪措施的共同合理使用。

夏禾等^[52]指出高架结构箱梁内设置隔声板,将箱梁腔内的声学共振频率向上移至轨道交通噪声的主要频率范围以外,可降低噪声。在箱梁腔内安装调频质量阻尼器,是控制桥梁结构噪声最有效的方法。

潘之明^[53]对筒支于空气中的两端封闭、开口的钢筋混凝土圆柱壳体进行了数值计算,在开孔圆柱壳中,同一点处,声级大约降低了 10 dB(A)。结果表明:圆柱壳上开孔的方案对于降低结构的低频噪声是可行的,这为降低桥梁的结构噪声提供了一种思路。

3.5 设置阻尼层

Moritoh 等^[14]指出在日本新干线铁路钢构件中加入阻尼层、屏蔽钢箱梁底部来降噪效果明显。在有砟轨道上,道砟和上层结构之间铺设 30 mm 厚的橡胶垫层,结构噪声降低约 10 dB(A),但对于板式轨道,采用同样的方法没有取得成功。Janssens 等^[43]指出在不改变桥梁结构本身,增加阻尼层可以起到很好的作用。荷兰低噪声课题组指出阻尼夹层可以充当结构构件与附加薄钢板之间的粘弹性材料吸收能量,可以有效地减小小桥梁发出的噪声^[44]。Au^[18]将桥梁视为承受移动荷载作用的正交异性板,分析表明阻尼能够有效地减少产生的声压。孙亮明^[27]证实:随着结构阻尼的增大,声级峰值变小,总体的辐射声压也相对减小。谢伟平等^[54]的研究表明:增加结构阻尼,可以有效降低辐射声压的波峰波谷值。Poisson 等^[55]对钢轨上安装了调频质量阻尼器的 Gaviganot 单线钢桥进行测试。同时也对单线 Gaviganot 钢桥在桥面板安装调频质量阻尼器后进行了结构噪声的测试^[56],车速在 50~80 km/h 之间时,在 30~50 Hz 内,声级降低了 4~6 dB(A)。见图 4。

4 结论

以结构噪声产生机理及声振特性为基础,分析了国内外降低桥梁结构噪声的各种措施。

- 1) 虽然很多学者尝试了进行桥梁结构噪声的实测,提出了预测模型,但是还没有公认的测量方法和预测模型。
- 2) 列车速度和桥梁结构噪声的具体关系有待进一步研究。
- 3) 通过减小轨道结构的振动来降低桥梁结构噪声是最常用的,也是比较有效的。



(a)钢轨上安装调频质量阻尼器



(b)桥面板上安装调频质量阻尼器

图 4 Gaviganot 钢桥安装的调频质量阻尼器

4) 改变桥梁结构的边界条件,来增加结构的刚度,可以降低桥梁结构噪声。

5) 桥梁结构加肋能否降低桥梁结构噪声,要视具体情况而定。如果加肋后的激励频率远离结构振动的固有频率时,加肋可以使结构辐射声功率降低;若加肋后结构的固有频率接近激励频率时,甚至会有负面影响,这种情况下,通过加肋来降低结构辐射声功率是行不通的。

6) 改变桥梁结构的截面形式的研究也处于起步阶段,还没有定论。

7) 增加阻尼层来减少结构噪声是切实可行的。

参考文献:

- [1] Stuber C. Geräusentwicklung beim befahren stählerner eisenbahnbrücken und abwehrmaßnahmen [J]. VDI-Berichte, 1963.
- [2] Stuber C. Air and structure-borne noise of railways [J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 43(2): 281-289.
- [3] M Mirowska. Effect of low-frequency noise at low levels on human health in light of questionnaire investigation [J]. Internoise 2000 Special, 41-45.
- [4] JGJ/T 170-2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准 [S].
- [5] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS) vom 20. Dezember 1999 [S].
- [6] US Department of Transportation-Federal Railroad Administration FRA (2005): High-Speed Ground Transportation-noise and Vibration Impact Assessment [S].
- [7] US Department of Transportation-Federal Railroad Administration FTA(2006): Transit Noise and Vibration Impact Assessment [S].
- [8] ISO 14837-1:2005: Mechanical vibration-Ground-borne noise and vibration arising from rail systems. Part1:General guidance [S].
- [9] ÖNNRM S 9012: 2010: Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden-Schwingungen und sekundärer Luftschall [S].

- [10] European Environment Agency. Good practice guide on noise exposure and potential health effects [R]. Copenhagen: 2010.
- [11] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm- TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503) [S].
- [12] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrs-anlagen (BEKS) vom 20. Dezember 1999 [S].
- [13] 杨宜谦. 室内二次噪声的评价 [C]//全国第一届环境噪声影响评价研讨会论文集. 重庆:2013.
- [14] Moritoh Y, Zenda Y, Nagakura K. Noise control of high speed Shinkansen [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 319-334.
- [15] Ngai K W, Ng C F. Structure-borne noise and vibration of concrete box structure and rail viaduct [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 255(2):281-297.
- [16] 李小珍, 张迅, 刘全明, 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.
- [17] Ngai K W. The modal of local mode analysis for structural acoustics of box structures [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [18] 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(3/4/5):1057-1075.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 刘先锋, 薛伟飞, 陈进. 基于 SYSNOISE 软件的薄板振动声辐射数值仿真研究 [C]. LMS 首届用户大会论文集. 北京: LMS 国际北京代表处, 2006.
- [24] 赵志高, 黄其柏, 何程. 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, (1):39-43.
- [25] 温玉君. 城市轨道交通系统的减振降噪措施 [J]. 城市轨道交通研究, 2005, (6):77-79.
- [26] 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.
- [27] 孙亮明. 箱形梁结构噪声的理论研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [28] Janssens 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.
- [29] 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.
- [30] Augusztinovicz F, Marki F, A B Nagy, et al. Derivation of train track isolation requirement for a steel road bridge based on vibro-acoustic analyses [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5):953-964.
- [31] 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.
- [32] Li Q, Xu Y L, Wu D J. Concrete bridge-borne low-frequency simulation based on train-track-bridge dynamic interaction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 331(10):2457-2470.
- [33] 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.
- [34] 赵志高, 黄其柏, 何程. 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, (1):39-43.
- [35] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 城市轨道交通高架结构噪声研究的进展 [J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(3):109-112.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 高飞, 夏禾, 安宁. 北京地铁 5 号线高架结构的辐射噪声分析与实验研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5):134-138.
- [40] 方小华. 城市轨道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.
- [41] 丁勇, 布占宇, 谢旭, 等. 考虑桥面板振动的桥梁结构低频噪声分析 [J]. 土木工程与环境工程, 2011, 33(2):58-64.
- [42] Wu X F. Experimental validation of finite element and boundary methods for predicting structural vibration and radiated noise [D]. Lexington: the University of Kentucky, 1991.
- [43] Janssens 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.
- [44] 郑陵译. 荷兰的低噪声钢桥设计 [J]. 世界桥梁, 1998(1):29-31.
- [45] Bewes O G. The calculation of noise from railway bridges and viaducts [D]. Southampton: University of Southampton, 2005.
- [46] 谢伟平, 陈西德, 潘之明. 空气中钢筋混凝土圆柱壳声辐射特性研究 [J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3):109-112.
- [47] 孙亮明, 谢伟平. 空气中纵向加肋钢筋混凝土圆柱壳的结构噪声辐射分析 [J]. 土木工程与环境工程, 2010, 32(3):41-45.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Cooper J H, Harrison M F. Development of an alternative design for the West Rail viaducts. Proceedings of Institution of Civil Engineers, Transport, 2002, 153(2):87-95.
- [51] 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):883-896.
- [52] 夏禾, 等. 交通环境振动工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [53] 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.
- [54] Xie W P, Sun L M. Analytical approach for rating noise effects of concrete cylindrical shell [C]//H Xia, H Takemiya. Environmental Vibrations; Prediction, Monitoring, Mitigation and Evaluation, Beijing: Science Press, 2009:605-610.
- [55] 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(3-5):944-952.
- [56] Thompson D. Railway Noise and Vibration; Mechanisms, modeling and Means of Control [M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.