

双层高架对轨道交通噪声空间分布的影响研究

韩江龙¹, 李奇², 顾民杰³

(1. 太原理工大学道桥系, 山西太原 030024; 2. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 运用振动功率流法计算轮轨粗糙度激励下的轨道和桥梁振动速度, 采用二维声学模型计算单位荷载下轨道和桥梁结构的振动速度及辐射声压。联合前两步, 根据振动功率等效原则预测钢轨和桥梁实际的辐射声压, 某 U 梁现场实测轨道交通噪声验证了该方法的准确性。对比研究了合建高架和独立轨道交通的噪声分布特性, 结果表明: (1) 道路桥的屏障效应导致该桥面以上扇形区的噪声明显减小, 到轨道中心线的水平距离越近, 降噪值越大; (2) 无声屏障时, 道路桥面高度以下空间的噪声增大 3~10 dB, 到轨道中心线的水平距离越近, 噪声增幅越大; (3) 轨道交通桥上设置声屏障可进一步减小道路桥面以上的扇形区的噪声, 同时增大其余区域的噪声。

关键词: 轨道交通; 噪声控制; 双层合建高架; 功率流法

中图分类号: U270.1⁺6; TB533⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0188-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.020

引言

随着经济发展, 中国城市轨道交通和快速路建设迅速增长。城市道路和轨道交通合建高架结构(上层城市交通+下层轨道交通)节省土地、线路资源与投资, 应用渐增, 如上海市共和新路高架, 宁波市北环快速路、宁波机场南延线与宁奉铁路共建段等。然而, 轨道交通噪声一直困扰业界, 也是影响高架方案能否采用的重要因素。与独立的单层轨道交通相比, 双层结构由于上层道路桥面的存在导致整体几何外形和声能量传播路径改变, 这对线路两侧受声区的影响尚不明确。

轨道交通噪声计算方法以边界元、无限元和统计能量法与有限元的混合应用为主。初期的研究多采用边界元与有限元混合法, 但计算效率低。文献[1-3]从 90 年代开展了统计能量法计算桥梁结构噪声的研究, 并进行了钢梁导纳实测与理论预测的对比。王重实等^[4]、徐良^[5]、李小珍和刘全民等^[6-9]、Liang 等^[10]、张旭等^[11]较早应用统计能量法与有限元混合研究轨道交通桥梁噪声。统计能量法计算效率高且适用于解决高频区高模态密度的系统宽带振动噪声, 尤其适合钢构件和钢-混凝土组合桥。在混凝土桥梁方面, Li 等^[12-13]、顾民杰等^[14]开展了无限元与

有限元的混合应用研究, 罗文俊等^[15-16]开展了有限元与统计能量法混合预测 U 梁和箱梁噪声的研究。雷晓燕等^[17]开展了以高铁箱梁缩尺模型与原型梁的噪声对比研究, 为噪声反演提供依据。

对梁型的研究既有针对高速铁路箱梁和钢桁梁的, 也有针对城市轨道交通 U 梁和箱梁的。文献[18-19]对箱梁和 U 梁截面进行了优化研究, 包括腹板倾角、顶板宽度等, 以期减小桥梁结构噪声或轮轨噪声。文献[20-21]指出腹板开孔能降低结构某些频段的噪声辐射。文献[14, 22]得到了箱梁结构噪声小于 U 梁, 且单箱双室箱梁的结构噪声小于单箱单室箱梁的结论。目前, 对轨道交通振动噪声的研究仍集中在高速铁路和独立的单层城市轨道交通, 缺少对公-轨合建高架桥梁声场的研究。该类结构应用案例渐增, 但研究严重落后于实践, 无法指导工程声学优化及应用。

本文结合某双层高架的建设, 研究公-轨双层高架结构的声场分布特点。以振动功率流法^[13-14]计算轨道-桥梁耦合振动, 得到钢轨和桥梁空间的平均振动均方速度; 以有限元-无限元法计算单位力激励下桥梁和钢轨二维振动模型产生的声场, 同时考虑车辆轮廓对声传播的影响; 最后根据振动功率等效原则确定实际轮轨激励下的桥梁和钢轨的辐射声压。根据城市轨道交通高架噪声现场实测和数值模拟,

A 计权声压级的峰值频率在 630 Hz 附近,车轮噪声主要控制 2000 Hz 以上部分^[23],本文拟研究 1000 Hz 内的桥梁和轨道噪声,既包含了主要噪声成分又具有较好的代表性。

1 功率流计算结构振动

1.1 系统输入功率

一般轨道交通列车转向架的刚体自振频率低于 10 Hz,车体的刚体自振频率在 1 Hz 左右。研究表明^[23]:转向架和车体贡献的噪声分别比总噪声低 20 和 30 dB,可将列车简化为仅包含车轮刚体质量和轮轨接触弹簧的模型。钢轨采用无限长梁模型,桥

梁采用有限元模型。轮轨竖向接触用线性赫兹弹簧模型,钢轨、桥梁之间以及桥梁支座等均采用线性弹簧阻尼元件连接。实测表明钢轨竖向振动对噪声起控制作用,故本文仅考虑钢轨的竖向振动。

采用力法原理求解车-轨-桥耦合系统振动方程。将各弹簧元件内力作为基本未知量得到车-轨-桥模型的离散体系,如图 1 所示。根据弹簧的变形协调建立力法方程为:

$$\delta(\omega)F(\omega) + \Delta_p(\omega) = -\mathbf{A}(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

式中 ω 为外激励的圆频率; $F(\omega)$ 为待求的弹簧力向量; $\delta(\omega)$ 为结构的动柔度矩阵; $\Delta_p(\omega)$ 为在单位简谐力作用下各弹簧的压缩变形向量; $\mathbf{A}(\omega)$ 为弹簧动柔度矩阵,与弹簧的刚度及阻尼有关。

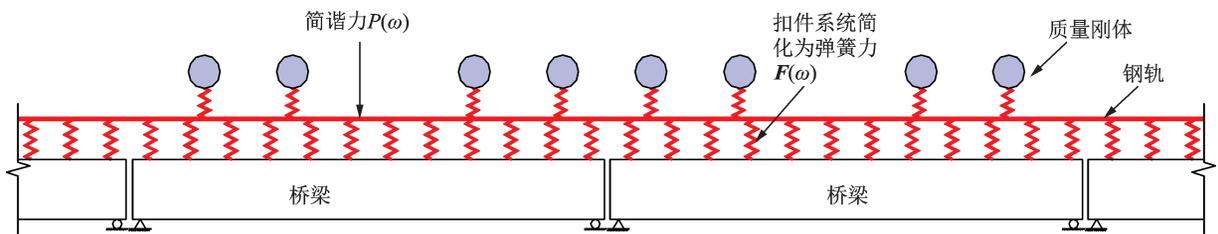


图1 车-轨-桥耦合基本体系

Fig. 1 Vehicle-track-bridge coupling basic system

根据式(1),可求得单位简谐力 $P(\omega)$ 作用下的弹簧力 $F(\omega)$ 。进一步得到第 m 个弹簧 a 节点的速度导纳:

$$Y_{a,m}(\omega) = (-1)^a j\omega \left[\sum_{n=1}^{N_s} \sum_{b=1}^2 \delta_{ab,mm}(\omega) F_n(\omega) - \delta_{a1,mp}(\omega) P(\omega) \right] \quad (2)$$

式中 N_s 为 a 节点所在部件上连接的弹簧数, $F_n(\omega)$ 表示第 n 个弹簧的弹簧力。 $\delta_{ab,mm}$ 为在弹簧 n 的节点 b 上施加单位力对弹簧 m 的节点 a 产生的动柔度; $\delta_{a1,mp}$ 为荷载 p 作用在节点 1 上对弹簧 m 的节点 a 产生的动柔度。

则第 m 个弹簧对 a 节点所在部件输入的功率为:

$$W_{a,m}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [(-1)^a F_m(\omega) Y_{a,m}^*(\omega)] \quad (3)$$

式中 $Y_{a,m}^*(\omega)$ 为 $Y_{a,m}(\omega)$ 的共轭复数。

外荷载激励对系统输入的功率为:

$$W_{in}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [P(\omega) Y(\omega)] \quad (4)$$

式中 $Y(\omega)$ 为外荷载连接的部件节点处的速度导纳。

子系统输入的总功率为所有连接于子系统的弹簧输入功率与作用子于系统的外荷载输入功率之和。

1.2 桥梁振动速度

桥梁各板件视为薄板结构,根据文献[23]输入功率和耗散功率平衡原理,近似求得多车轮作用下桥梁的振动均方速度:

$$\langle \overline{v_b^2} \rangle = \sum_{m=1}^N \frac{W_{inb,m}}{\omega \eta M_b} \quad (5)$$

式中 $W_{inb,m}$ 表示第 m 个车轮的轮轨力激励通过扣件对桥梁的输入功率; η 表示桥梁的阻尼损失因子; M_b 表示桥梁子系统的质量; N 为一列车厢范围内的车轮数。

1.3 钢轨振动速度

列车运行时有多多个车轮同时和钢轨相互作用。由于振动波沿钢轨传播受到轨道系统的阻尼作用而迅速衰减,主要考虑相邻两节车厢距离相近的两个转向架下的车轮相互影响。

考虑多车轮影响后,多车轮引起的单位车辆长度的钢轨均方振动速度按下式计算:

$$\langle \overline{v_r^2} \rangle = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|v(x)|^2}{2} dx \approx \sum_{m=1}^{N_V} \frac{1}{2n_L} |F_{c,m}|^2 \sum_{i=1}^{N_r} |Y_{i,m}|^2 \quad (6)$$

式中 $F_{c,m}$ 为第 m 个车轮处的轮轨力; N_V 为一节车厢范围内的车轮数; L 为一节车厢的长度; n_L 为相邻两节车厢中部(即一节车厢长度)范围内钢轨的节点数; 考虑车厢范围外的钢轨振动对本节车辆长度范围的平均振动的贡献, 以等效计入相邻车辆的贡献, 故 N_r 取全桥范围内钢轨的节点数; $Y_{i,m}$ 为第 m 个车轮作用下第 i 个钢轨节点导纳。

1.4 粗糙度激励下的轮轨力

城市轨道交通列车的速度和轮距导致车轮移动荷载的主要激励频率小于 20 Hz, 因此可以忽略车轮沿钢轨的纵向运动, 而以拖动的“粗糙度带”通过轮轨间隙。仅考虑竖向激励时, 轮轨粗糙度激励下的轮轨力 $F_c(\omega)$ 按轮轨位移协调条件求得^[24]:

$$F_c(\omega) = \frac{j\omega r}{Y_w + Y_c + Y_r} \quad (7)$$

式中 Y_w 为车轮导纳, 车轮采用简化的质量-弹簧模型来模拟; Y_c 为赫兹接触弹簧导纳; Y_r 为钢轨导纳; r 为相应车速和计算频率下某一波长对应的粗糙度幅值。

采用某轨道交通钢轨实测振动加速度对轮轨组合实测粗糙度进行估计^[13], 并将其作为本文计算采用的粗糙度谱。

2 二维声场计算

研究表明^[13,24], 可以分别对钢轨和桥梁采用二维模型进行声场分析。本文采用二维分析, 流体外边界采用无限元, 其余流体和结构采用有限元。应用商业程序, 分别计算单位简谐力作用下钢轨和桥梁的声辐射 p_{ru} , p_{bu} 和平均均方速度 $\langle v_{ru}^2 \rangle$, $\langle v_{bu}^2 \rangle$, 计算模型中建立了车体和桥梁模型, 自动考虑车体和桥梁形状对声辐射的影响。

声压的平方和振动均方速度成正比, 则列车运行时的场点声压为^[13]:

$$\begin{cases} p_r = p_{ru} \sqrt{\langle v_r^2 \rangle / \langle v_{ru}^2 \rangle} \\ p_b = p_{bu} \sqrt{\langle v_b^2 \rangle / \langle v_{bu}^2 \rangle} \end{cases} \quad (8)$$

钢轨噪声和桥梁噪声为非相干声源, 根据叠加原理, 声场总声压为^[13]:

$$p = \sqrt{p_r^2 + p_b^2} \quad (9)$$

声学计算模型如图 2 所示。流体参数如下: 空气密度为 1.225 kg/m^3 , 空气中声速为 340 m/s 。

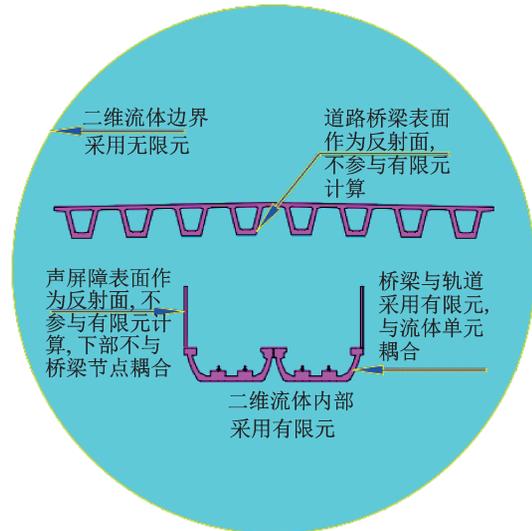


图2 二维声学模型示意图

Fig. 2 2D-acoustic model

3 理论计算与试验验证

某标准跨径 30 m 的轨道交通 U 梁, 跨中截面尺寸如图 3 所示。

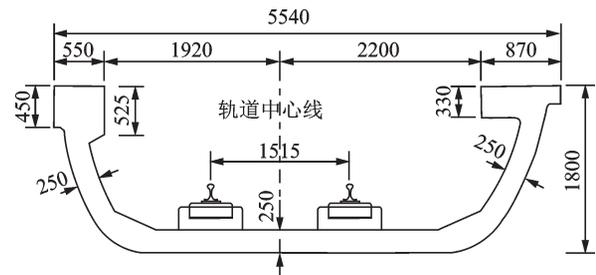


图3 16号线梁跨中断面(单位:mm)

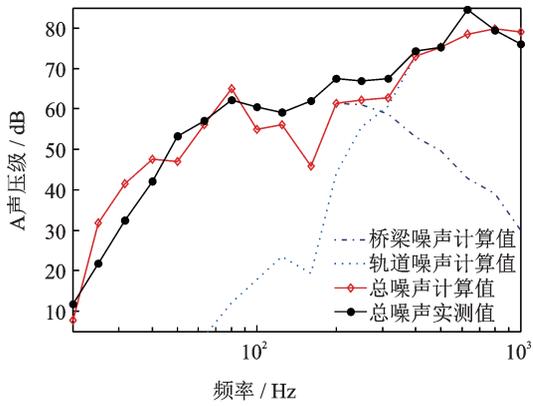
Fig. 3 Mid-span section of 16 line's beam (Unit: mm)

混凝土强度等级为 C50, 损耗因子为 0.02。采用 CHN60 钢轨和 WJ-2A 型扣件, 扣件间距为 0.6 m, 刚度为 40 MN/m, 损耗因子为 0.15^[25]。噪声测点位于跨中, 近场点 N1 距轨道中心线 7.5 m, 高于轨面 1.5 m。远场点 N2 距轨道中心线 25 m, 高于轨面 1.5 m。两测点距地面 13.0 m。U 梁采用实体有限元模拟, 钢轨采用无限长 Timoshenko 梁模型。

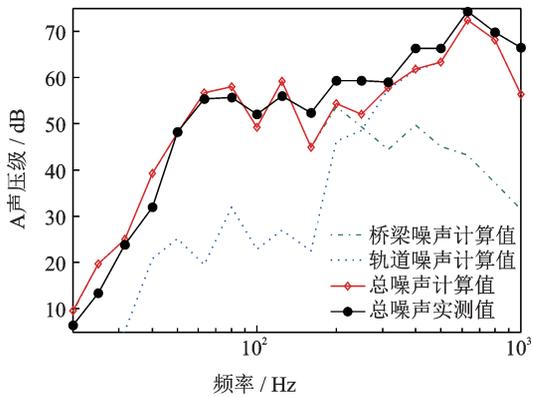
计算与实测的桥梁和钢轨振动辐射的 A 声压级如图 4 所示。可以看出: A 计权下 1000 Hz 以内, 钢轨噪声对总噪声起控制作用, 实测的总噪声峰值频率为 630 Hz, 由钢轨贡献; 桥梁噪声计算值的峰值频率与实测噪声的低频段峰值频率重合。无论远场点还是近场点, 数值预测的桥梁噪声 200 Hz 以下低频段、轨道噪声 400 Hz 以上高频段和总噪声与实测结果总体趋势吻合良好, 表明该噪声预测方法可行。

A 声级总噪声指标主要衡量人耳的听觉感受。

低频桥梁噪声虽然对总噪声贡献小,但影响人的身心健康^[26]。后续研究继续关注桥梁噪声,虽然这不能降低 A 计权总噪声,但有利于通过控制措施减小噪声对人身心的影响。



(a) 测点N1
(a) Measured point N1



(b) 测点N2
(b) Measured point N2

图 4 噪声计算与实测结果

Fig. 4 Comparison between calculated and measured noise

4 合建高架声场分布特性

4.1 结构布置、尺寸布置及声场

某合建高架下层轨道交通 U 梁宽 5.1 m,跨中截面梁高 1.875 m,腹板厚 0.27 m,底板厚 0.27 m,宽 3.67 m,如图 5 所示。底板宽厚比 13.59,横截面面积 2.8998 m²,横截面周长 17.583 m。上层道路桥面宽约为 25 m,采用小箱梁,双层结构几何关系如图 6 所示。

场点的布置都从距轨道的中心线 10 m 开始,声场区域宽 75 m,高 51 m,具体布置如图 6 所示。

4.2 空间声场及道路桥梁的屏障效应

合建桥梁空间声场如图 7 所示。距离轨道中心线越远,桥梁结构噪声(图 7(a))等值线越稀疏,空间的声压梯度越小。整个声场中轨道噪声(图 7

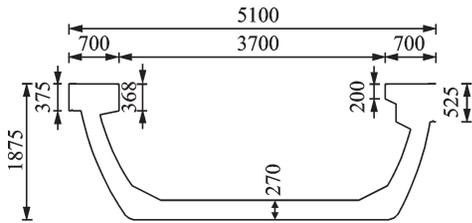


图 5 U 梁跨中断面(单位: mm)

Fig. 5 Mid-span section of U-beam (Unit: mm)

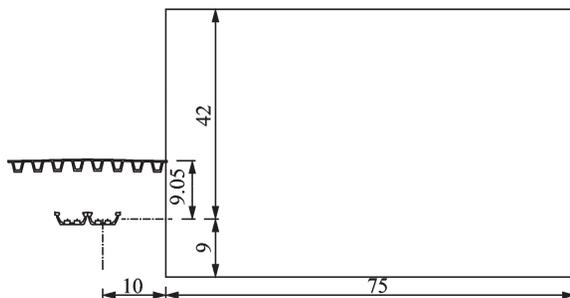


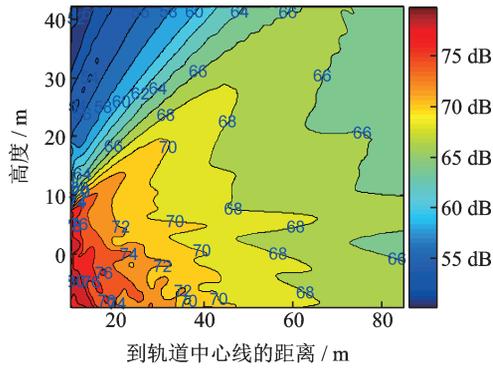
图 6 双层合建结构与声场布置图(单位: m)

Fig. 6 The rail-cum-road viaduct and sound field range (Unit: m)

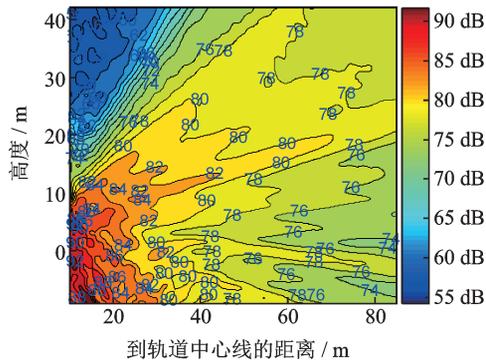
(b))和总噪声(图 7(c))云图分布与数值相差较小,总噪声由轨道噪声控制,距轨道中心线 25 m 处 A 声级大于 80 dB;且二者等值线均密集,声场变化较剧烈,随着到轨道中心线距离的增大,噪声衰减变慢。

由图 8 可见,与单层轨道交通相比,声能量受上层桥面的阻挡不能向上方扩散,道路桥面上方附近空间的轨道交通噪声降低了,但区域非常有限,只有道路桥面以上左上角 30°~90°扇形空间(该空间以道路桥梁外缘为圆心水平线逆时针旋转)噪声减小,降幅 1~30 dB,逆时针角度越大,降噪越多。具体分布如下:轨道噪声(图 8(b))和总噪声(图 8(c))降幅 1~30 dB,其中 30°~45°范围降幅约 10 dB 以内,45°~60°范围降幅约 10~20 dB,60°~90°范围降幅约 20~30 dB,但降幅等值线放射状分布特征变弱。桥梁噪声(图 8(a))分布与此类似,但声级降幅减小,30°~90°范围降幅在 20 dB 以内,降幅小于总噪声和轨道噪声,可能因为桥梁噪声波长较长,衍射范围大于轨道噪声导致道路桥面的影响降低,而轨道噪声在总噪声中起控制作用。

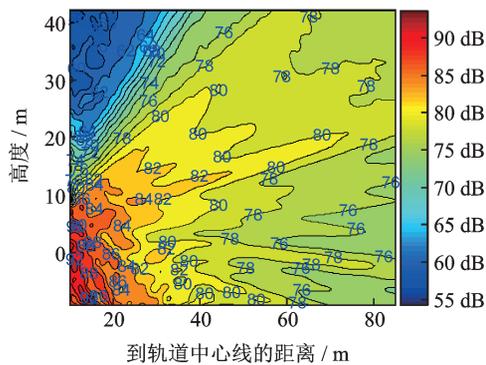
除 30°~90°范围外,合建桥梁的其余声场空间(-90°~30°范围)噪声增大,与下层 U 梁的水平距离越近,噪声增量越大,如图 8 所示。总噪声(图 8(c))和轨道噪声(图 8(b))增幅在 20 dB 以内,-90°~-45°范围增加 10~20 dB,-45°~0°范围增加约 3~10 dB,0°~0°绝大部分范围增幅不超过 3 dB。但桥梁噪声(图 8(a))在-90°~-45°范围内增幅小,约 4~6 dB,其中-45°~30°范围内增加约 2 dB 以内。整体而言,将有很大的生产生活区噪声污染加剧,而近



(a) 桥梁噪声
(a) Bridge noise



(b) 轨道噪声
(b) Rail noise



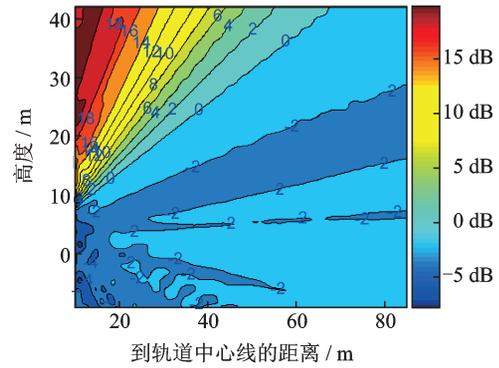
(c) 总噪声
(c) Total noise

图7 合建桥梁声场分布

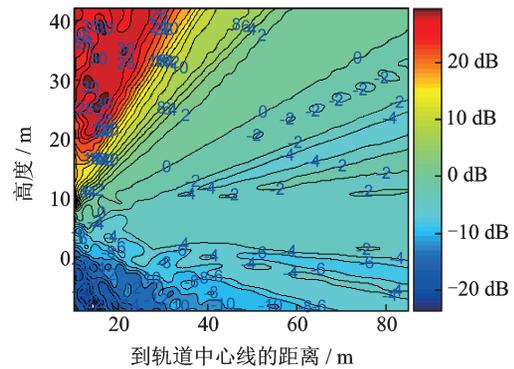
Fig. 7 Noise spatial distribution of the rail-cum-road viaduct

场降幅较大的区域少有人长期停留,降噪意义不大。声场的噪声改变程度可按图9所示分区评估(图中角度与上下桥面距离有关)。

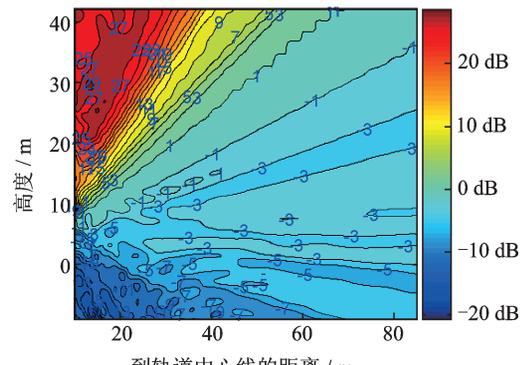
图4中显示的实测与理论计算的总声压级峰值频率约为630 Hz。由图10(a)可以看出,单层U梁在单位荷载下的轨道噪声受车辆和腹板的遮挡限制,大部向上扩散,桥上空间噪声远大于桥下。但对于双层结构,由于上层道路桥底面将单层体系原本向U梁上方扩散的声能量集中导向道路桥以下及两侧的生产生活区,相应该空间内的声能量激增,噪声显著增大,桥上相应显著减小,见图10(b)。由于没有考虑结构的吸声作用,声能量只是发生了转移,



(a) 桥梁噪声
(a) Bridge noise



(b) 轨道噪声
(b) Rail noise



(c) 总噪声
(c) Total noise

图8 合建桥梁噪声减小量

Fig. 8 Noise reduction of the rail-cum-road viaduct

使得道路桥上方附近有限空间的噪声降低的同时,道路桥面高度以下空间的噪声显著增加。因此,双层合建桥梁不利于道路桥面高度以下空间内的声环境改善。

4.3 轨道交通声屏障的效应

在合建高架的轨道交通U梁顶板安装直立声屏障,声屏障考虑3.5和4.5 m两种高度。建立模型时,仅考虑声屏障表面对声波的反射,不考虑声波透射和桥梁引起的声屏障附加振动。与不加声屏障相比,道路桥面以上的扇形区域总噪声继续减小约5-9 dB;而道路桥面高度以下的空间总噪声继续增

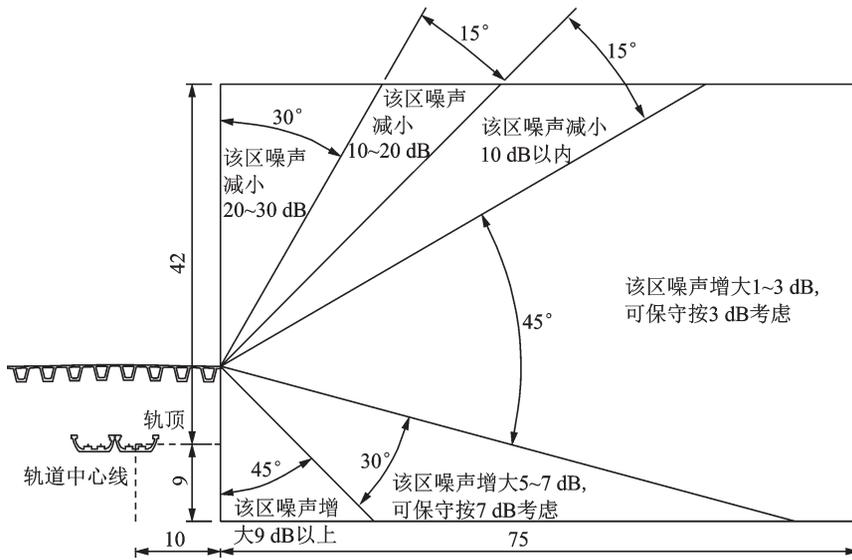
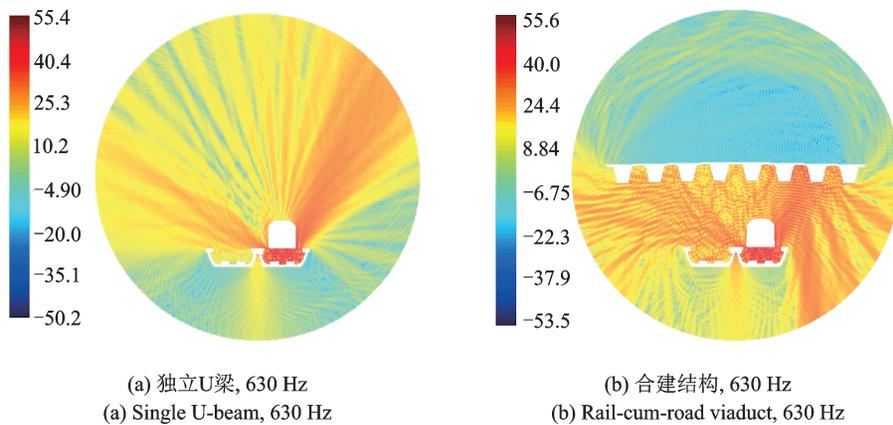


图 9 噪声变化大致分区(与独立U梁相比)(单位:m)

Fig. 9 Schematic division of noise variation (compared with single U-beam used in urban rail transit) (Unit: m)



(a) 独立U梁, 630 Hz
(a) Single U-beam, 630 Hz

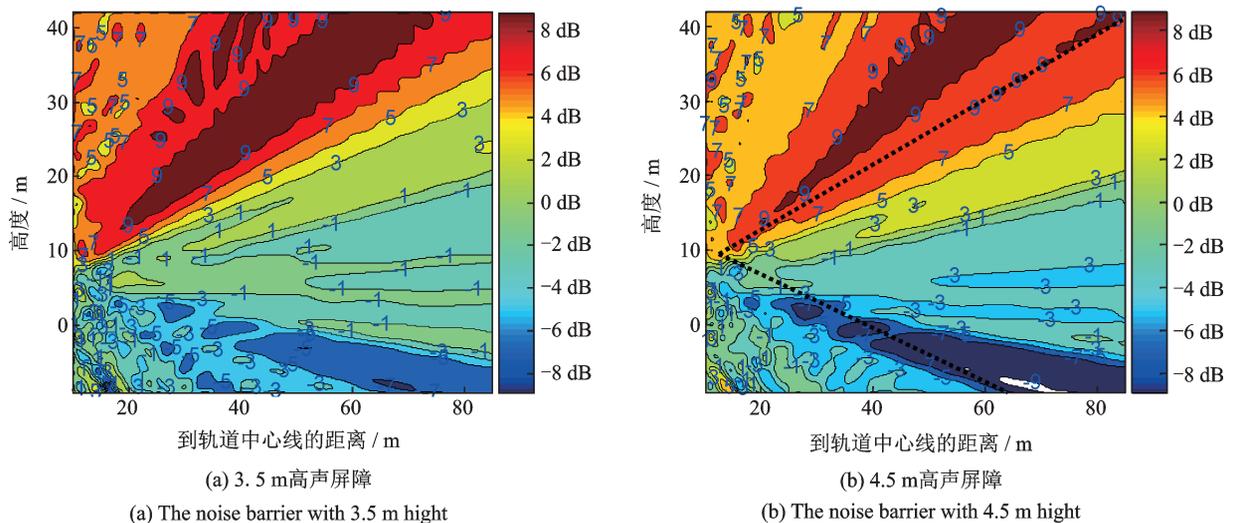
(b) 合建结构, 630 Hz
(b) Rail-cum-road viaduct, 630 Hz

图 10 单位荷载下主频处轨道噪声分布(单位: dB)

Fig. 10 Rail noise distribution near to peak frequency under unit load (Unit: dB)

大约 1~5 dB,即延续了道路桥面对原单层U梁声场的改变趋势。声屏障高度增大,图 11(b)的中部喇叭形区域(图中虚线所夹角示意的区域)比上下侧的

扇形区域噪声级增减变化明显,增减幅度不超过 2 dB,但上下侧的扇形区域距轨道中心线越近噪声级变化越不明显,声屏障的影响在减弱。



(a) 3.5 m高声屏障
(a) The noise barrier with 3.5 m high

(b) 4.5 m高声屏障
(b) The noise barrier with 4.5 m high

图 11 声屏障总噪声降噪效果

Fig. 11 Total noise reduction effect of the noise barrier

5 结 论

运用车-轨-桥耦合振动功率流方法和二维声场模型,对独立轨道交通和合建高架的钢轨噪声、桥梁噪声进行了数值预测,得到如下结论:

(1)由于双层高架上层道路桥的屏障作用,轨道交通辐射的声能量转移至道路桥下及侧面区域,使得上层道路以上中高空场点总噪声和桥梁噪声有明显减小,越靠近轨道中心线降幅越大。

(2)上层道路桥的屏障作用使得道路桥面高度以下空间内的噪声增大,到下层轨道交通U梁的水平距离越近,噪声增量越大,大部分区域噪声增加值可达3 dB以上,近场局部区域增幅10 dB以上。由于噪声增幅范围较宽,不设轨道交通声屏障时,可按文中分区进行噪声影响评估。

(3)在双层高架的轨道交通桥梁上加装声屏障后,道路桥面以上区域噪声继续减小,桥面以下扇形区域继续增大,声屏障的影响与道路桥面类似,可以通过牺牲一部分区域的声环境以改善另外区域的声环境。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Harrison M F, Thompson D J, Jones C J C. The calculation of noise from railway viaducts and bridges[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, 214(3): 125-134.
- [3] Bewes O G, Thompson D J, Jones C J C, et al. Calculation of noise from railway bridges and viaducts: experimental validation of a rapid calculation model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3-5): 933-943.
- [4] 王重实,王凤勤,高淑英.高速铁路桥梁噪声预测方法的探讨[J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(2): 166-168. Wang Zhongshi, Wang Fengqin, Gao Shuying. Research on prediction of noise of high speed railway bridge [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2001, 36(2): 166-168.
- [5] 徐良.高速铁路简支箱梁结构噪声的SEA方法[D].成都:西南交通大学, 2011. Xu Liang. Vibration noise predicting simply-supported box girder of high-speed railway using SEA method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [6] 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 Xiaozhen, Liu Quanmin, Song Lizhong, 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.
- [7] Li Xiaozhen, Liu Quanmin, Pei Shiling, et al. Structure-borne noise of railway composite bridge: numerical simulation and experimental validation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 353: 378-394.
- [8] Liu Quanmin, Thompson David J, Xu Peipei, 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.
- [9] 李小珍,梁林,赵秋晨,等.不同轨道结构形式对高架箱梁结构噪声的影响[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(10): 78-87, 106. Li Xiaozhen, Liang Lin, Zhao Qiuchen, et al. Influence of track structure type on noise radiated from an elevated box-girder [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(10): 78-87, 106.
- [10] Liang Lin, Li Xiaozhen, Zheng Jing, 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: 106988s.
- [11] 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, 84. Zhang Xu, Song Leiming. Pass-by noise of train running on viaduct based on SEA [J]. *Journal of Noise and Vibration Control*, 2008, 28(2): 77-78, 84.
- [12] Li Qi, Song Xiaodong, Wu Dingjun. A 2.5-dimensional method for the prediction of structure-borne low-frequency noise from concrete rail transit bridges [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(5): 2718-2726.
- [13] LI Q, LI W Q, WU D J, et al. A combined power flow and infinite element approach to the simulation of medium-frequency noise radiated from bridges and rails [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 365: 134-156.
- [14] 顾民杰,励吾千,李奇.桥梁截面形式对轨道交通高架噪声的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(4): 715-723. GU Minjie, LI Wuqian, LI Qi. Influence of section types on noise from elevated rail transit lines [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(4): 715-723.
- [15] 罗文俊,杨鹏奇,张子正.基于FE-SEA混合箱形梁结构噪声预测分析[J]. *铁道学报*, 2019, 41(8): 100-107. Luo Wenjun, Yang Pengqi, Zhang Zizheng. 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.
- [16] 罗文俊,唐康文,程龙,等.列车荷载作用下U型梁振动与结构噪声分析[J]. *振动工程学报*, 2018, 31(6): 1031-1040. Luo Wenjun, Tang Kangwen, Cheng Long, et al. Analysis of vibration and structural noise of U-beam under train load [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2018, 31(6): 1031-1040.

- [17] 雷晓燕, 欧开宽, 罗锴, 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 Xiaoyan, KaikuanOu, Luo Kun, et al. Comparative analysis on structural noise of similarity model of concrete box girder [J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(3): 384-391.
- [18] 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.
Zhang Xun, Li Xiaozhen, Liu Quanmin, et al. Structure-borne noise of concrete box-girder and its influence factors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 409-414.
- [19] 张迅, 阮灵辉, 曹智扬. 轨道交通U形梁对轮轨噪声的遮蔽效应研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 147-154.
Zhang Xun, Ruan Linghui, Cao Zhiyang, et al. Shadowing effect of rail transit U-shaped girders on wheel-rail noise [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 147-154.
- [20] 刘林芽, 许代言. 腹板开孔的箱型梁结构噪声辐射特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 204-210.
Liu Linya, Xu Daiyan. Structural noise radiation characteristics of box beams with web holes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 204-210.
- [21] 张天琦, 罗雁云, 周力. 腹板开孔对轨道交通箱梁振动噪声的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 35-46.
Zhang Tianqi, Luo Yanyun, Zhou Li. Effect of web hole on vibration and noise of rail transit box girder [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 35-46.
- [22] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 城市轨道交通槽型梁和箱梁低频声学性能比较与机理分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(4): 636-643.
Han Jianglong, Wu Dingjun, LI Qi. Low-frequency acoustic performance comparison and mechanism analysis between trough girders and box girders used in urban rail transit [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(4): 636-643.
- [23] Thompson D J. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control [M]. Elsevier, 2009.
- [24] 刘海平. 高速铁路轮轨滚动噪声建模、预测与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Liu Haiping. A study on modelling, prediction and its control of wheel/rail rolling noises in high speed railway [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [25] Li Q, Thompson D J. Prediction of rail and bridge noise arising from concrete railway viaducts by using a multi-layer rail fastener model and a wave number domain method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(5), 1326-1346.
- [26] 刘冬娅, 王刘翀, 李祥, 等. 某高架城际铁路近场环境噪声的心理声学评价指标研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3): 169-174.
LIU Dongya, WANG Liuchong, LI Xiang, et al. Psychoacoustic evaluation index of near-field environmental noise in an intercity railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(3): 169-174.

Influence investigation of the rail-cum-road viaduct on noise spatial distribution from rail transit traffic

HAN Jiang-long¹, LI Qi², GU Min-jie³

(1. Department of Road and Bridge Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design and Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A power flow method is adopted to calculate the vibration velocity of track and bridge induced by wheel-rail combined roughness. A 2D acoustical model including track, bridge and sound field is used to obtain the mean square velocity and radiated sound pressure of the track and bridge produced by unit forces on the rail and bridge. According to the principle of vibration power equivalence, the actual sound pressure radiated from rail and bridge is determined by combining the two mentioned steps. The accuracy of the noise prediction method is validated by the measured results in field from a pure urban rail transit U-bridge. It is then used to compare the noise distribution characteristics from the pure rail transit bridge and double-deck viaduct composed of the upper urban road and the lower railway. The results show that: (1) the noise at the scalloped region above the upper bridge deck is obviously reduced by the upper road bridge, and the horizontal distance closer to the track centre, the greater the noise reduction; (2) the noise in the areas below the upper road bridge deck is increased by 3~10 dB without the noise barriers on the rail bridge, and the horizontal distance closer to the track centre, the greater the noise increment; (3) the noise barriers continue to reduce the noise in the scalloped region above the upper bridge deck and to increase the noise at the rest areas. These findings provide a beneficial reference to control the rail transit noise through the combination of noise barrier and the double-deck viaduct.

Key words: urban rail transit; noise control; rail-cum-road viaduct; power flow method

作者简介: 韩江龙(1979—),男,讲师。电话:15536555857; E-mail: weixiaoyao_79@163.com。

通讯作者: 李奇(1980—),男,副教授。电话:13764416395; E-mail: liqi_bridge@tongji.edu.cn。