

轨道交通环境噪声预测与控制标准探讨*

王 嘉^{1,2} 李 莉^{1,2}

(1. 同济大学交通学院, 201804, 上海;

2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 轨道交通噪声辐射问题日益严重。为了提高轨道交通环境噪声预测与控制水平, 有必要探讨我国现行轨道交通环境噪声预测与控制标准的关键内容。[方法] 系统性梳理我国现行的轨道交通环境噪声预测与控制标准, 从轨道交通噪声源强、轨道交通噪声预测和声屏障噪声控制 3 个方面进行了对比, 深入研究不同标准的车辆噪声源强的测试与预测方法、轨道交通环境噪声辐射的预测方法及基于声屏障措施的噪声控制方法。[结果及结论] 噪声源强测量建议综合考虑 HJ 453—2018 和 GB/T 5111—2024 两项标准。噪声预测建议依据 HJ 2.4—2021 标准; 声屏障声学性能和降噪效果计算建议参考 HJ/T 90—2004 标准, 并可辅以 TB/T 3122—2019、GB/T 19884—2005 标准。

关键词 轨道交通; 噪声源强; 噪声预测; 噪声控制

中图分类号 U270.1⁺6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.017

Discussion on Prediction and Control Standards for Rail Transit Environmental Noise

WANG Jia^{1,2}, LI Li^{1,2}

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The problem of rail transit noise radiation has become increasingly serious. In order to improve the level of rail transit environmental noise prediction and control, it is necessary to explore the key contents of current rail transit environmental noise prediction and control standards in China.

[Method] China's current rail transit environmental noise prediction and control standards are systematically reviewed, and a comparative study is conducted from three aspects: rail transit noise source intensity, rail transit noise prediction, and sound barrier noise control. Test and prediction methods for vehicle noise source intensity, prediction methods for rail transit environmental noise radiation, and noise control methods based on sound barrier measures in different standards are thoroughly

studied. [Result & Conclusion] For noise source intensity measurement, it is recommended to comprehensively consider the HJ 453—2018 and GB/T 5111—2024 standards. For noise prediction, it is recommended to follow the HJ 2.4—2021 standard; for the calculation of the acoustic performance and noise reduction effect of sound barriers, it is recommended to refer to the HJ/T 90—2004 standard, and supplemented by the TB/T 3122—2019 and GB/T 19884—2005 standards.

Key words rail transit; noise source intensity; noise prediction; noise control

随着我国轨道交通建设的快速发展, 轮轨系统产生的噪声辐射问题日益严重。为提高轨道交通环境噪声预测与控制水平, 本文从轨道交通噪声源强、轨道交通噪声预测和声屏障噪声控制 3 个方面对我国现行的轨道交通环境噪声相关评价标准进行对比分析, 以期对轨道交通环境噪声评价工作提供参考。

1 轨道交通噪声源强

轨道交通运营阶段噪声评价问题, 需要对车辆噪声源强进行测试或预测。

铁计[2010]44号《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年修订稿〉的通知》^[1]中指出: 铁路噪声声源强度采用列车中部(中段)驶至参考点(受声点)时频率范围 31.5~8 000.0 Hz 内的等效 A 声级或等效频带声压级。参考点置于距线路中心线水平距离 25.0 m, 距轨顶面以上 3.5 m 处。铁计[2010]44号给出了不同车辆类型下对应不同列车运行速度的噪声源强值, 以及普通货物列车及旅客列车的噪声源强频谱。

当列车运行速度与文件中给出的速度不同时,

* 同济大学教学改革项目(2860106008)

可进行修正:

$$L_{\text{pm},v} = L_{\text{pm},v_0} + C_v \quad (1)$$

式中:

$L_{\text{pm},v}$ ——列车运行速度为 v 时的等效声级;

L_{pm,v_0} ——列车运行速度为 v_0 时的等效声级;

C_v ——速度修正量, $C_v = k_v \lg\left(\frac{v}{v_0}\right)$, 其中 k_v 为速度修正系数。

GB/T 5111—2024《声学 轨道机车车辆发射噪声测量》^[2] 规定了轨道交通机车车辆发射噪声测量方式,即噪声源强测试方法,适用于机车车辆型式试验、工程动态验收、周期性监督检查、常规噪声测试和环境影响评价测量。其测量指标根据不同试验类型而确定。其中,定置试验指标为 A 计权声压级 $L_{\text{Aeq},T}$ (T 为测量时段,取 20 s); 匀速试验为通过时段内等效连续 A 计权声压级 $L_{\text{Aeq},T}$; 加速试验和制动试验为时间计权快 (F) 档确定的 A 计权声压级最大值 L_{AFmax} 。

HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》^[3] 给出了噪声源强现场实测类比方法的测量规定。测量指标为列车通过时段的等效连续 A 声级,取运营高峰期内不小于 5 次测量的算数平均值,且测量运行速度应为此断面设计速度的 75% ~ 125%。传声器布设位置如图 1 及图 2 所示:对于地面线,传声器应置于距邻近线路中心线水平距离 7.5 m、距轨顶面以上 3.5 m 处;对于高架线,若采用两侧有挡板的桥梁或有腹板的 U 型梁,则传声器应置于距邻近线路中心线水平距离 7.5 m、距轨顶面以上 5.0 m 处。若采用两侧无挡板的桥梁,则传声器应置于距邻近线路中心线水平距离 7.5 m、距轨顶面以上 3.5 m 处。

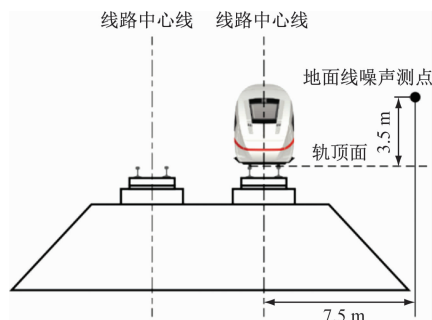


图 1 地面线噪声源强测点位置^[3]

Fig. 1 Location of ground lines noise source intensity measuring points^[3]

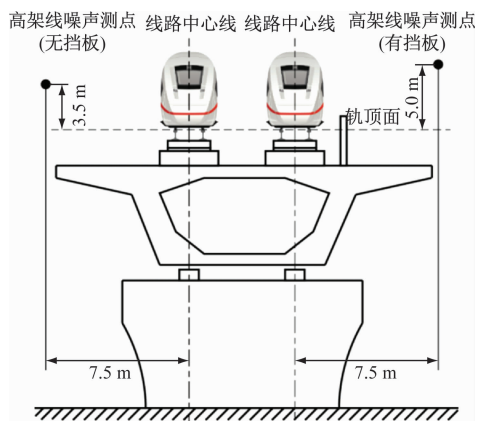


图 2 高架线噪声源强测点位置^[3]

Fig. 2 Location of elevated lines noise source intensity measuring points^[3]

2 轨道交通环境噪声预测

根据轨道交通工程项目和噪声源特点,噪声预测方法主要为模式预测法和比例预测法。

2.1 铁计[2010]44 号的规定

铁计[2010]44 号给出了列车运行速度为 200 km/h 以下的铁路噪声预测等效 A 声级 $L_{\text{Aeq},p}$ 的模式预测法公式:

$$L_{\text{Aeq},p} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{t_T} \left[\sum_i (n_i t_{\text{eq},i} \times 10^{0.1(L_{p0,t,i} + C_{t,i})}) + \sum_i (t_{f,i} \times 10^{0.1(L_{p0,f,i} + C_{f,i})}) \right] \right\} \quad (2)$$

式中:

t_T ——规定评价时间,单位 s;

n_i —— t_T 时间内通过的第 i 类列车列数,单位列;

$t_{\text{eq},i}$ ——第 i 类列车通过的等效时间,单位 s;

$L_{p0,t,i}$ ——第 i 类列车垂向上的最大噪声辐射源强,单位 dB;

$C_{t,i}$ ——第 i 类列车的噪声修正项,单位 dB;

$t_{f,i}$ ——固定声源的作用时间,单位 s;

$L_{p0,f,i}$ ——固定声源的噪声辐射源强,单位 dB;

$C_{f,i}$ ——固定声源的噪声修正项,单位 dB。

比例预测法计算公式为:

$$L_{\text{Aeq},p} = 10 \lg \left(\sum_i 10^{0.1 L_{\text{AE},p,i}} \right) - 10 \lg t_T \quad (3)$$

其中,

$$L_{\text{AE},p,i} = 10 \lg \left(\frac{n_{p,i}}{n_{n,i}} \sum_j 10^{0.1 L_{\text{AE},n,j}} \right) +$$

$$k_{v,i} \lg \left(\frac{v_{p,i}}{v_{n,i}} \right) + C_t + C_{s,i} \quad (4)$$

式中:

$L_{AE,p,i}$ ——第 i 类列车预测的总暴露声级,单位 dB;

$L_{AE,n,j}$ ——第 j 类列车预测的总暴露声级,单位 dB;

$n_{n,i}, n_{p,i}$ ——第 i 类列车在项目改扩建前、后在评价时间内通过的总节数,单位节;

$k_{v,i}$ ——第 i 类列车运行速度变化修正系数;

$v_{n,i}, v_{p,i}$ ——第 i 类列车在项目改扩建前、后的运行速度,单位 km/h;

C_t ——线路结构变化修正量,单位 dB;

$C_{s,i}$ ——第 i 类列车源强变化修正量,单位 dB。

2.2 HJ 453—2018 的规定

HJ 453—2018 基于等效连续 A 声级给出了列车运行噪声的预测方法:

$$L_{Aeq,tTR} = 10 \lg \left(\frac{1}{t_T} \sum n t_{eq} 10^{0.1 L_{Aeq,tTP}} \right) \quad (5)$$

式中:

$L_{Aeq,tTR}$ —— t_T 内预测点处的列车运行等效连续 A 声级,单位 dB(A);

n —— t_T 内通过的列车列数,单位列;

t_{eq} ——列车通过的等效时间,单位 s;

$L_{Aeq,tTP}$ ——单列车在通过时段内预测点处等效连续 A 声级,单位 dB(A)。

风亭、冷却塔噪声的等效连续 A 声级为:

$$L_{Aeq,tTR} = 10 \lg \left[\sum (t \times 10^{0.1 L_{Aeq,tTP}}) \right] \quad (6)$$

式中:

t ——风亭、冷却塔的运行时间,单位 s。

基于列车运行噪声与风亭、冷却塔噪声,叠加背景噪声影响获得环境噪声预测计算公式:

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg (10^{0.1 L_{Aeq,tTR}} + 10^{0.1 L_{Aeq,b}}) \quad (7)$$

式中:

$L_{Aeq,b}$ ——评价时间内预测点背景噪声等效连续 A 声级,单位 dB(A)。

基于楼板振动加速度与室内二次噪声声压级的关系,给出了适用于净高 2.8 m 左右、混响时间 0.8 s 左右、一般装修混凝土楼板房间的室内二次结构噪声预测公式:

$$L_{p,a} = L_{Vmid,a} - 22 \quad (8)$$

式中:

$L_{p,a}$ ——频率范围 16 ~ 200 Hz 内单列车通过时

建筑物室内第 a 个 1/3 倍频程的最大声压级, $a = 1, 2, \dots, 12$, 单位 dB;

$L_{Vmid,a}$ ——单列车通过时建筑物室内楼板中央处第 a 个 1/3 倍频程垂向振动加速度级,单位 dB。

2.3 HJ 2.4—2021 的规定

针对模式预测法, HJ 2.4—2021^[4] 修订内容完善了铁路与城市轨道交通噪声影响评价预测模型, 列车运行噪声预测模型计算公式沿用铁计[2010]44 号(见式(3)), 更新内容主要包含对于列车运行噪声修正项计算公式的补充和明确。

以列车运行噪声的几何发散衰减为例, 针对列车运行速度 < 200 km/h 的铁路列车, 对铁计[2010]44 号、HJ 453—2018、HJ 2.4—2021 三项导则及标准中的预测方法进行计算对比。计算时取列车长度为 500 m, 源强的参考距离为 50 m。自变量为预测点至线路的距离 D_1 , 因变量为列车运行噪声几何发散衰减量 L_s , 结果如图 3 所示, 其中 HJ 453—2018 和 HJ 2.4—2021 给出的计算方法一致。由图 3 可以看出: 当 $D_1 < D_0$ 时, 根据铁计[2010]44 号预测的 L_s 略大于 HJ 2.4—2021 预测的 L_s ; 当 $D_1 > D_0$ 时, 结论相反。

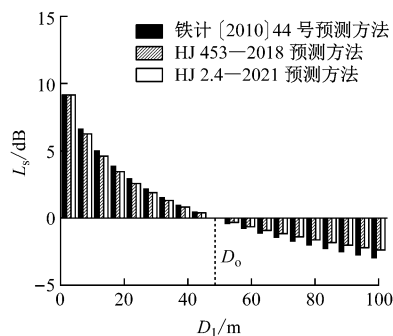
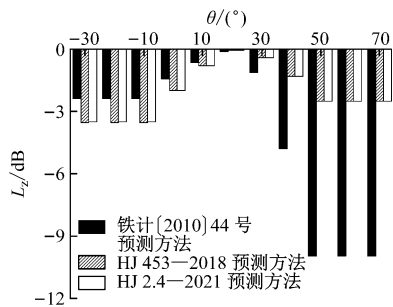


图3 D_1 与噪声几何发散衰减量的关系

Fig. 3 Relationship between D_1 and L_s

以列车运行噪声垂向指向性修正为例, 针对地面线或高架线无挡板结构, 对铁计[2010]44 号、HJ 453—2018、HJ 2.4—2021 三项导则及标准中的预测方法进行计算对比。自变量为预测点与声源水平方向夹角 θ , 因变量为列车运行噪声垂向指向性修正量 L_z , 结果如图 4 所示。图 4 中 HJ 453—2018 和 HJ 2.4—2021 的预测方法近乎一致。由图 4 可以看出: 当 $\theta < 20^\circ$ 时, 铁计[2010]44 号的 L_z 小于 HJ 2.4—2021 的 L_z ; 当 $\theta > 20^\circ$ 左右时, 结论相反。

图4 θ 与 L_z 的关系Fig. 4 Relationship between θ and L_z

3 轨道交通环境噪声控制

根据噪声辐射特性,铁路和城市轨道交通环境噪声控制对象主要包括声源、传递路径,以及受声体的吸声、隔声和消声。其中,声屏障目前已成为控制列车运行噪声辐射的重要措施。声屏障作用于声波的传递路径上,在声源和受声体之间插入一个墙式构造物,使声波发生反射、透射、绕射现象,从而达到衰减声波能量的目的,其降噪水平能达到 8~14 dB(A)。

3.1 声屏障声学性能

当噪声源向外辐射的噪声遇到声屏障时,声波会沿 3 条路径传播。

传播路径一,声波在声屏障壁面发生反射。当线路两侧都设有声屏障时,声波在声屏障内经过多次反射最终越过声屏障顶端绕射到受声点,导致声屏障插入损失降低,因此通常在声屏障靠近线路一侧设置吸声结构以减小反射声,采用降噪系数 C_{NR} 来评价声屏障吸声结构的整体吸声效果^[5]:

$$C_{NR} = \frac{1}{4}(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1\,000} + \alpha_{2\,000}) \quad (9)$$

式中:

α_{250} 、 α_{500} 、 $\alpha_{1\,000}$ 、 $\alpha_{2\,000}$ ——在 250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz 频率下的吸声系数。

传播路径二,声波在声屏障处发生透射。声波透过声屏障辐射至受声点,透射部分的声能量与声屏障面密度、入射角和声波频率有关,采用传声损失 L_T 来评价声屏障的隔声能力, L_T 越大说明透射部分的声能量越小,则声屏障的插入损失越大,即:

$$L_T = 10 \lg \frac{E_b}{E_c} \quad (10)$$

式中:

E_b ——入射声能,单位 J;

E_c ——透射声能,单位 J。

声屏障的空气声隔声量还可采用 100~3 150 Hz 内 1/3 倍频带平均隔声量或计权隔声量 R_w 进行评价,以保证声屏障的传声损失不影响透射声能量对声屏障实际降噪效果的影响。

传播路径三,声波在声屏障处发生绕射。声波越过声屏障顶端绕射至受声点。绕射部分的声能量与声波频率同声源、受声体与声屏障三者之间的几何关系有关,是决定声屏障插入损失的主要物理量,采用绕射声衰减 ΔL_d 来评价。计算公式详见 HJ/T 90—2004。

TB/T 3122—2019^[6] 修订内容中对声屏障的声学性能要求进行了补充,见表 1。HJ/T 90—2004 中还规定了透射声修正量应趋向 0。

表 1 声屏障声学构件声学性能要求修订^[6]Tab. 1 Revision of acoustic performance requirements for acoustic elements of sound barrier^[6]

频率/Hz	吸声系数		隔声量/ dB
	金属声 屏障	非金属声 屏障	
125	≥ 0.30	≥ 0.20	≥ 15
250	≥ 0.60	≥ 0.50	≥ 16
500	≥ 0.80	≥ 0.70	≥ 25
1 000	≥ 0.70	≥ 0.60	≥ 30
2 000	≥ 0.50	≥ 0.40	≥ 30
4 000	≥ 0.50	≥ 0.40	≥ 35

3.2 声屏障降噪效果

声屏障的降噪效果^[5]一般采用插入损失进行评价。当计算声屏障插入损失时,须注明频带宽度和计权方式,主要包括 A 计权等效声压级和最大 A 声级的插入损失。当研究声屏障降噪的频率特性时,应测量 63~5 000 Hz 下 1/3 倍频带或 80~4 000 Hz 下 1/3 倍频带的插入损失。插入损失的测量方法包括直接法和间接法两种,取决于测量对象与安装声屏障前后测量条件的等效程度。两者主要区别是安装前后的测量条件。由于间接法测量时声屏障已完成安装,不能实现移除再测量安装前受声点位置处的声压级,故选择测量条件近似的等效场所进行测量,而直接法无此限制。为确保计算插入损失的准确性,要保证声屏障安装前后受声点位置声压级比较的有效性,要在相似的地形、地貌和地面条件、气象条件(风、温度、湿度和云层)及声源条

件下进行测量。传声器布设位置同声源和受声体的水平距离有关,当声屏障与最近线路中心线距离大于15 m时,参考点设于声屏障顶端上方1.5 m处;当声屏障与最近线路中心线距离小于15 m时,参考点设于声屏障上方,且参考点、最近线路中心线、声屏障顶端三者连线夹角为 10° 。

声屏障插入损失 L_i 的计算公式为:

$$L_i = \Delta L_d - \Delta L_t - \Delta L_r - \max(\Delta L_s, \Delta L_G) \quad (11)$$

式中:

ΔL_d ——绕射声衰减;

ΔL_t ——透射声修正量;

ΔL_r ——反射声修正量;

ΔL_s ——障碍物声衰减;

ΔL_G ——地面吸收声衰减。

4 结语

为构建绿色环境友好型轨道交通,控制轨道交通噪声污染问题,本文依据我国现行轨道交通环境噪声影响评价标准,探究了有关轨道交通环境噪声预测与控制方面的内容,得出了以下结论:

1) 对于轨道交通噪声源强预测问题,应采用铁计[2010]44号中给出的参考值,并根据具体运行速度进行修正;对于轨道交通噪声源强测试问题,应结合HJ 453—2018及GB/T 5111—2024两项标准。

2) 对于轨道交通环境噪声预测问题,应采用HJ 2.4—2021标准,其针对模式预测法和比例预测法都给出了全面的计算公式和修正方法。

3) 对于声屏障声学性能计算问题,应结合HJ/T 90—2004、TB/T 3122—2019两项标准,其中规定了评价声屏障反射、透射和绕射性能的计算方法,以及各计算指标所对应的限值;对于声屏障插入损失计算问题,应结合HJ/T 90—2004及GB/T 19884—2005两项标准对声屏障降噪效果进行评价。

参考文献

- [1] 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.

Ministry of Railways of the People's Republic of China. Notice on issuing the guiding opinions on the selection of noise and vibration source strength values and control principles for environmental impact assessment of railway construction projects (2010 revised draft): Railway Planning [2010] No. 44 [A]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2010.

- [2] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 声学 轨道机车车辆发射噪声测量:GB/T 5111—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustics—measurement of noise emitted by railbound vehicles: GB/T 5111—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

- [3] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通:HJ 453—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for environmental impact assessment—urban rail transit: HJ 453—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.

- [4] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 声环境:HJ 2.4—2021[S]. 北京:中国环境科学出版社,2022.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for noise impact assessment: HJ 2.4—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2022.

- [5] 国家环境保护总局. 声屏障声学设计和测量规范:HJ/T 90—2004[S]. 北京:中国环境科学出版社,2004.

State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Norm on acoustical design and measurement of noise barriers: HJ/T 90—2004[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.

- [6] 国家铁路局. 铁路声屏障声学构件:TB/T 3122—2019[S]. 北京:中国铁道出版社,2019.

National Railway Administration of the People's Republic of China. Acoustic elements of railway sound barrier: TB/T 3122—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

· 收稿日期:2023-01-11 修回日期:2023-03-20 出版日期:2025-04-10

Received:2023-01-11 Revised:2023-03-20 Published:2025-04-10

· 第一作者:王嘉,博士研究生,jiawang@tongji.edu.cn

通信作者:李莉,副研究员,lilee@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821