

文章编号: 1674—8247(2024)03—0019—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.03.004

高速铁路对沿线建筑噪声影响及控制措施研究

刘舫泊 彭德 金旭炜 蒋尧 杨吉忠

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 针对某在建综合交通枢纽内高速铁路沿线高标准星级酒店噪声超标问题, 分别采用几何声线法和统计能量分析法, 建立铁路沿线噪声以及建筑室内噪声预测模型, 研究列车高速通过及进出站时铁路沿线噪声分布特性和酒店内部噪声情况, 讨论了声屏障对铁路沿线噪声、建筑外墙(窗)隔声以及酒店内部房间尺寸酒店内部噪声的影响规律。研究结果表明: (1) 列车通过时, 铁路沿线环境噪声水平将达到 90 dB(A) 以上, 酒店内部噪声也将超过 50 dB(A); (2) 设立声屏障可有效降低铁路沿线噪声 2~10 dB(A), 同时提高建筑外墙隔声、增大室内房间面积可有效降低室内噪声 16~18 dB(A); (3) 在铁路声屏障和建筑外墙(窗)隔声都难以进一步有效降低沿线敏感建筑室内噪声时, 可通过改变房间用途来使内部噪声满足标准要求。研究成果可为高速铁路沿线敏感建筑的噪声控制提供参考。

关键词: 综合交通枢纽; 铁路沿线噪声; 敏感建筑; 室内噪声

中图分类号: U238; X827

文献标志码: A

Study on Impact of High-speed Railway on Building Noise along the Line and Control Measures

LIU Fangbo PENG De JIN Xuwei JIANG Yao YANG Jizhong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the problem of excessive noise in high-standard starred hotels along high-speed railway in an integrated transport terminal under construction, the prediction models of noise along the railway and indoor building noise were established by the geometric ray method and statistical energy analysis respectively. The distribution characteristics of noise along the railway and the noise conditions inside the hotel when trains pass through and enter or leave the station at high speed were studied, and the law of the impact of sound barriers on noise along the railway and that of sound insulation of exterior walls (windows) of building and room sizes of hotel on noise inside the hotel was discussed. The study results show that: (1) When a train passes through, the ambient noise along the railway will reach more than 90 dB(A) and the noise inside the hotel will also exceed 50 dB(A). (2) Sound barriers can effectively reduce the noise along the railway by 2~10 dB(A), and at the same time, improving the sound insulation of exterior walls of building and increasing the areas of indoor rooms can effectively reduce indoor noise by 16~18 dB(A). (3) When it is difficult to further effectively reduce the indoor noise of sensitive buildings along the line through railway sound barriers and sound insulation of exterior walls (windows) of buildings, the internal noise can meet the standard requirements by changing the room purpose. The results can provide a reference for noise control of sensitive buildings along high-speed railway.

Key words: integrated transport terminal; noise along the railway line; sensitive building; indoor noise

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 刘舫泊(1996-), 男, 工程师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科技计划重大专项(KSNQ213009)

引文格式: 刘舫泊, 彭德, 金旭炜, 等. 高速铁路对沿线建筑噪声影响及控制措施研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 19-24.

LIU Fangbo, PENG De, JIN Xuwei, et al. Study on Impact of High-speed Railway on Building Noise along the Line and Control Measures [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 19-24.

高速铁路、地铁等轨道交通引入机场,构建零换乘立体化交通模式,在交通枢纽范围内规划高标准酒店、商业中心、办公场所等业态,形成围绕交通枢纽开发的综合会客厅,已逐渐成为大型交通枢纽与新型城市建设的主流方向。

然而,交通设施的运行会不可避免地邻近的城市区域产生影响,然而,交通设施的运行会不可避免地邻近的城市区域产生影响,高速铁路运行会对沿线环境带来显著的噪声问题^[1],对沿线居民的生活造成影响^[2]。当列车以200km/h以上的速度明线运行时,轮轨噪声、气动噪声等将会对沿线环境带来极大的噪声干扰^[3]。当列车高速运行于隧道内时,轮轨、气动等噪声源经隧道壁面反射形成混响声场,相比明线环境噪声更大;此外,列车高速进出隧道还会在隧道内形成压力波,与隧道内的混响声共同传递至隧道口,使隧道口周围环境噪声问题更加突出^[4]。因此,考虑铁路沿线噪声及其控制对大型交通枢纽与城市一体化建设尤为必要。目前广泛采用的铁路沿线噪声预测方法有模式预测法^[5]和声线法^[6],铁路沿线噪声控制以声屏障为主^[7-8]。通过设计声屏障的高度、厚度、面板样式以及吸声量等参数可获得满足不同需求的降噪效果^[9]。此外,改善建筑外墙及门窗的隔声性能,也可有效改善交通枢纽区域内敏感建筑的室内噪声情况^[10]。

本文以某在建交通枢纽内部高速铁路沿线高标准星级酒店为对象,研究列车运行对其的噪声影响,从铁路和建筑两方面开展降噪研究,讨论降噪措施对铁路沿线环境及敏感建筑内部的噪声影响规律。研究成果可为大型综合交通枢纽内的敏感环境(建筑)噪声控制提供参考。

1 项目概况

某高速铁路下穿机场综合交通枢纽,列车正线运行速度350 km/h,高标准星级酒店距高速铁路正线轨道中心线最近处仅33.3 m,距到发线轨道中心线最小距离仅11 m,且直接位于隧道口处。除列车运行本身产生的轮轨噪声、气动噪声、机电噪声外,还应考虑列车进出隧道对沿线环境的噪声影响,声学环境较为复杂。酒店与线路、隧道口位置示意如图1所示。为明确铁路通车运营后对该酒店的环境噪声影响,需对高速铁路正线通过以及停站、出站等工况下的铁路沿线噪声、酒店室内噪声进行计算分析,并根据预测结果提出合理降噪措施。

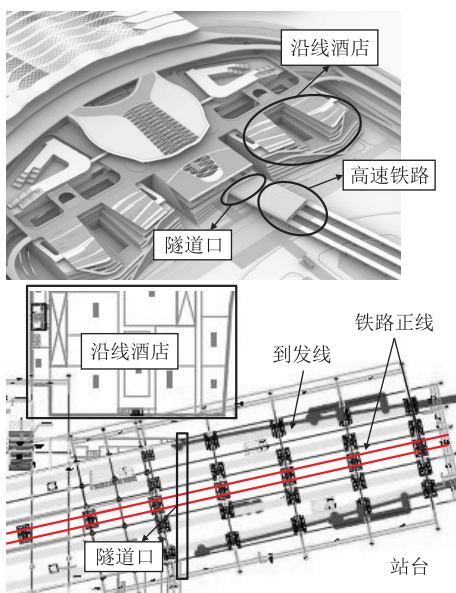


图1 酒店与高速铁路线路位置关系示意图

2 研究方法及模型建立

2.1 研究方法

铁路沿线噪声预测采用几何声线法,是一种广泛应用于车外噪声预测的成熟方法,具有分析简明、直观的优点。建筑室内噪声分析采用统计能量分析法,该方法已广泛应用于高速列车、船舶、航空领域以及枢纽车站的室内噪声预测,具有较高的准确性和计算效率^[11-12]。

铁路沿线及酒店内部噪声控制研究技术路线如图2所示。首先,基于几何声线法建立车外噪声预测模型,对列车正线通过以及到发线停靠工况下车外噪声进行预测分析,获取酒店边界噪声结果,并将其作为输入计算酒店房间内的噪声响应。根据GB 50118-2010《民用建筑隔声设计规范》^[13]中规定的室内噪声限值对计算得到的酒店房间内噪声进行评价,若超标,则从铁路和建筑两方面开展噪声控制措施研究。

2.2 控制标准

该酒店规划为五星级高标准酒店,根据GB 50118-2010《民用建筑隔声设计规范》中的规定,酒店室内噪声限值如表1所示。为方便叙述,暂将客房的噪声要求定义为1类,将办公室、会议厅、多用途厅的噪声要求定义为2类,将餐厅、宴会厅定义为3类。

2.3 铁路沿线噪声模型

基于几何声线法建立的车外噪声预测模型如图3所示。铁路桥梁高8.52 m,在铁路沿线建立声场网格用于获取沿线噪声计算结果,测点位置距铁路正

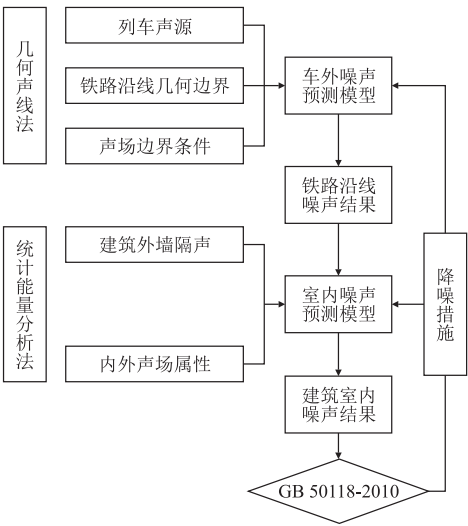


图2 研究技术路线图

表1 酒店建筑噪声限值标表(dB(A))

类别	房间名称	噪声限值	
		昼间	夜间
1类	客房	35	30
2类	办公室、会议厅、多用途厅	40	
3类	餐厅、宴会厅	45	

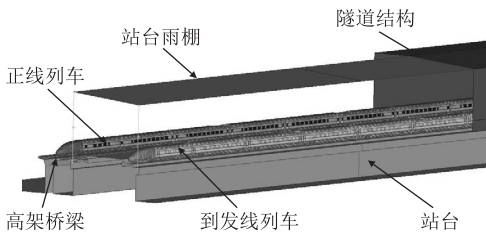


图3 车外噪声预测模型示意图

线35 m,距到发线11 m。按照实际尺寸构建高架桥梁、站台、雨棚、地面、隧道壁面等几何边界并定义其声学阻抗和吸声系数^[14-15],模拟声波在真实环境中的传播和反射。通过在模型内对应位置添加列车声源,可求得声源发出的声线经几何边界反射、吸收及衰减后传播至测点的噪声水平。该方法经实测数据验证具有较高的准确性,已广泛应用于铁路车外噪声的特性及控制研究。模型采用的声学边界参数如表2所示。

表2 车外噪声模型声学边界参数表

频率/Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
混凝土吸声系数	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09
草地吸声系数	0.34	0.55	0.60	0.42	0.55	0.56
车体铝材声阻抗/ [(10 ⁶ kg/(m ² ·s ⁻¹))]	17.1					
玻璃声阻抗[(10 ⁶ kg/(m ² ·s ⁻¹))]	13.1					

文献[16]给出了通过车外噪声声源识别试验得到的速度300 km/h列车表面声功率;通过文献[17]给出的拟合公式修正为350 km/h声源。列车声源为按其所处位置分为车体表面噪声、车厢连接处噪声、车顶受电弓噪声以及车底轮轨噪声与辅助设备噪声,在模型中将其等效为单极子声源并添加在车体表面对应位置。声线法模拟结果与文献[4]试验数据对比如图4所示。文献[4]通过分析大量试验数据发现,列车高速通过隧道口时,距轨面7.5 m远,轨面上1.5 m处噪声为98~103 dB(A)。

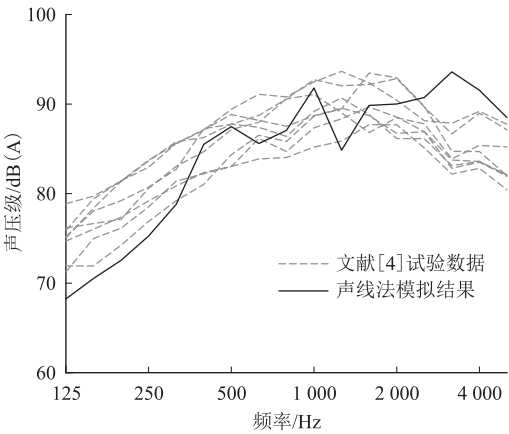


图4 声线法预测结果与试验数据对比图

由图4可知,通过声线法预测得到的该点噪声值为102.8 dB(A),且噪声显著频段为500 Hz以上的中高频段,频率分布特性与高速铁路隧道口处噪声试验数据基本一致,整体符合文献[4]中描述的高速铁路隧道口处噪声特性,故认为该模型可用于铁路沿线噪声预测研究。

2.4 建筑室内噪声模型

基于统计能量分析方法建立室内噪声预测模型如图5所示。

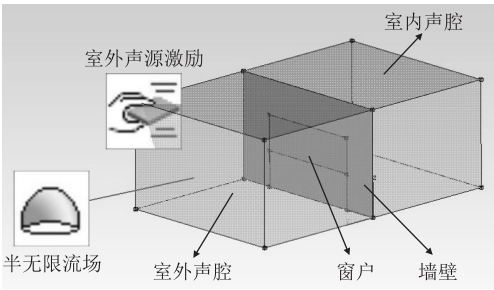


图5 室内噪声预测模型示意图

墙壁两侧声腔分别用来模拟室内和室外声场环境。室内空间尺寸定义为5 m×4 m×3 m(长×宽×高)。为模拟室外声环境的无反射边界条件,赋予外

声腔半自由流场性质,空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$,空气中声速 $c = 340 \text{ m/s}$,大气温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 38% 。根据 GB 50118 - 2010《民用建筑隔声设计规范》对旅馆建筑(特级)外墙隔声的限值标准,酒店外墙和窗的隔声量分别定义为 40 dB 和 35 dB 。酒店外侧声源激励即为通过车外噪声模型计算得到的墙外 1 m 处场点声压级。

3 结果讨论

3.1 无降噪措施

未采取降噪措施工况下,高速列车以 350 km/h 速度通过该区段时到发线进出站的车外噪声云图分布如图 6 所示。

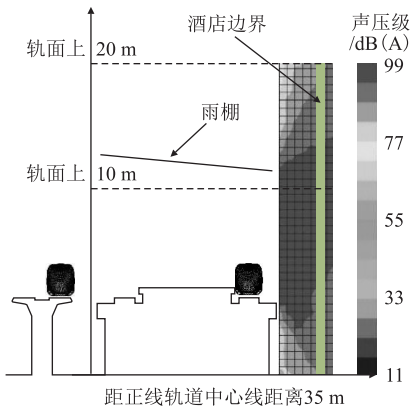


图6 无降噪措施铁路沿线噪声图

由图 6 可知,雨棚的存在使列车噪声难以向上传播发散,将本应向上传播发散的声能反射至站台外侧,致使站台外侧声压级达到 90 dB(A) 以上。为明确该条件下酒店房间内噪声水平,将酒店边界处不同高度位置处场点声压级作为声源输入对酒店房间室内噪声进行预测。酒店不同高度位置室内外噪声如表 3 所示。

表3 不同高度位置声压级表

序号	距轨面高度/m	沿线声压级/dB(A)	室内声压级/dB(A)
测点1	3.5	95.3	54.6
测点2	5	96.4	55.7
测点3	10	97.8	57.1
测点4	20	90.3	49.6

由图 6、表 3 可知,在不采取任何降噪措施条件下,轨面上 10 m 高度处噪声最大,这是由于列车辐射出的声波经雨棚的反射到此处,使此处噪声高于其他位置。轨面上 20 m 处距声源最远,噪声随传播距离的增加逐渐衰减;位于雨棚的声影区,雨棚的隔声作用阻隔了部分噪声的传播,故此处噪声最小,沿线噪声

为 90.3 dB(A) ,对应高度处室内噪声为 49.6 dB(A) 。轨面上 $3.5 \sim 10 \text{ m}$ 范围内的沿线环境直接暴露于噪声影响区域,建筑内外侧噪声相比轨面上 20 m 处高 $5 \sim 7 \text{ dB(A)}$ 。酒店各高度位置的室内噪声均超过 GB 50118 - 2010《民用建筑隔声设计规范》标准要求,需采取必要的降噪措施。

3.2 铁路声屏障

铁路声屏障是控制铁路沿线噪声的有效手段,通过在到发线外侧设置直立式声屏障,降低沿线酒店所受的噪声影响。声屏障隔声量来自文献[18],声屏障内侧附加吸声材料。隔声量及吸声系数以及声屏障安装位置示意如图 7 所示。

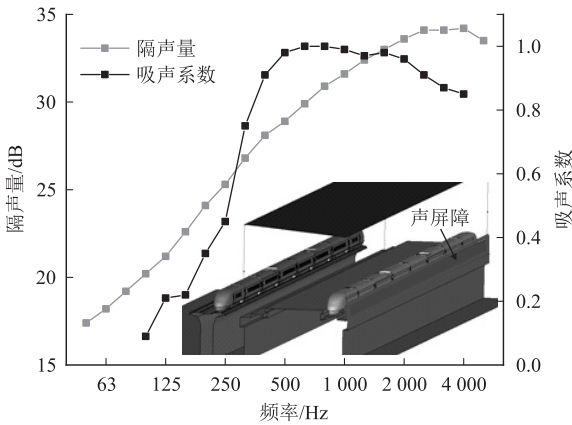


图7 声屏障隔声量及内附吸声材料吸声系数图

到发线外侧设置不同高度声屏障工况下,列车通过时车外噪声云图分布如图 8 所示。声屏障高度从 3 m 逐步增加到 12 m 。安装不同高度声屏障后,轨面上不同高度处酒店内外噪声水平值如表 4 所示。

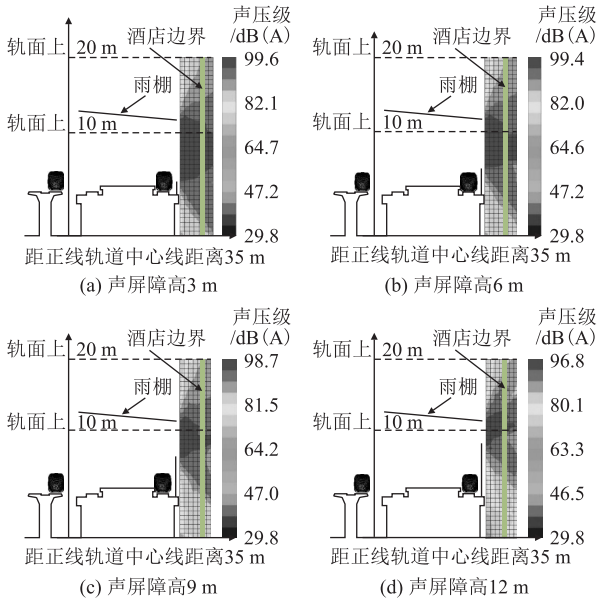


图8 安装不同高度声屏障后车外噪声云图

由图 8、表 4 可知,声波在雨棚和声屏障对其的反射和绕射作用下传播到站台外侧区域,在线路截面所在平面上呈“梯形”分布的声暴露区,声屏障的隔音吸声作用对其声影区降噪效果明显。声屏障高度越高,对沿线环境的噪声控制效果越明显。将不同高度声屏障在轨面上不同高度位置处的降噪效果做算术平均得到其平均降噪量,如图 9 所示。

表 4 安装不同高度声屏障方案后噪声结果表(dB(A))					
声屏障高度	测点位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
3 m	铁路沿线	93.1	94.5	95.6	87.7
	酒店室内	52.4	53.8	54.7	47.0
6 m	铁路沿线	91.5	92.6	94.2	86.3
	酒店室内	50.8	51.9	53.3	45.6
9 m	铁路沿线	89.7	91.3	93.4	86.1
	酒店室内	48.9	50.6	53.9	46.8
12 m	铁路沿线	84.3	86.5	89.2	79.8
	酒店室内	43.6	45.8	50.5	40.7

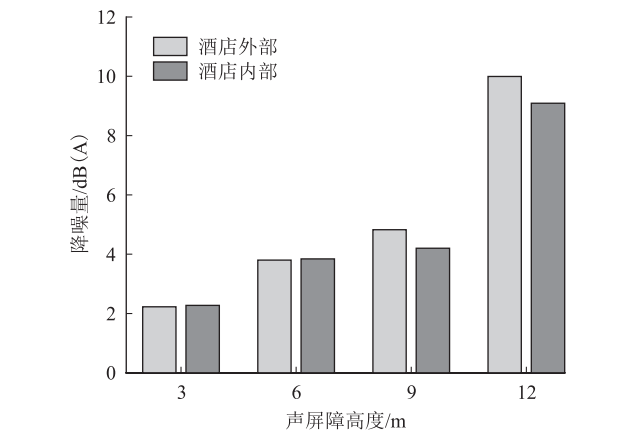


图 9 不同高度声屏障对建筑内外降噪效果图

由图 9 可知,3 m 高声屏障在不同高度处对铁路沿线环境及酒店内部的平均降噪量约为 2.3 dB(A);6 m 高声屏障的平均降噪量约为 3.8 dB(A);9 m 的平均降噪量约为 4.8 dB(A);12 m 的平均降噪量约为 10 dB(A)。声屏障高度从 3 m 增至 9 m,对沿线环境降噪效果仅提升 1~2 dB(A),声屏障高度从 9 m 增至 12 m,对沿线环境降噪效果可提升 5 dB(A)。此外,当声屏障高度达到 12 m 时,才能使位于声影区的酒店室内噪声部分达到 3 类要求,因此需从建筑外墙隔声入手进一步控制室内噪声。

3.3 建筑外墙(窗)隔声

在铁路沿线设置 12 m 高声屏障的条件下,将外墙及窗户的隔声量在 40 dB 和 35 dB 的基础上提高 4~20 dB,调查提升隔声量对室内噪声的影响。轨面上不同高度位置处室内噪声随外墙(窗)隔声量的变

化规律如图 10 所示。

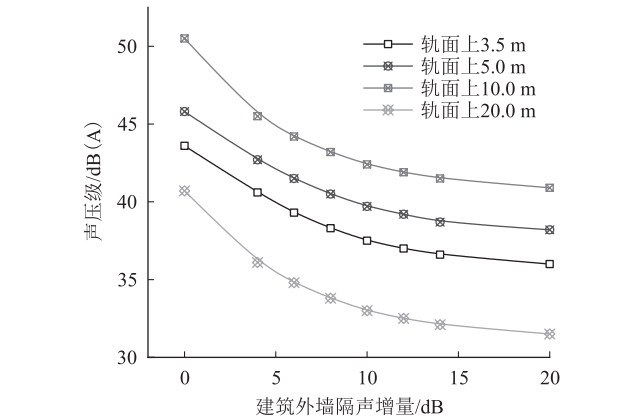


图 10 隔声量对室内噪声影响规律图

由图 10 可知,提高外墙(窗)的隔声量可一定程度上降低室内噪声,轨面上不同高度位置处的室内噪声均随建筑外墙(窗)隔声量的增加而降低。随着外墙(窗)隔声量逐渐增加,噪声降幅却逐渐减小,隔声增量达到 8 dB 后轨面上不同高度处室内噪声降噪量将小于 1 dB(A),且随着隔声量增加,噪声降幅进一步降低。

当外墙(窗)隔声量提高 6 dB 时,轨面上不同高度处室内噪声均能满足 3 类标准要求;当隔声量提高 10 dB 时,除轨面上 10 m 高度外,其他高度位置处室内噪声均能满足 2 类标准要求。此外,受安装声屏障后铁路沿线声场分布影响,位于声暴露区的轨面上 10 m 处室内噪声难以满足 2 类标准要求;同时,也仅有轨面上 20 m 处的室内噪声能够在外墙(窗)隔声量提高 6 dB 以上能够达到 1 类标准的昼间要求。综合考虑外墙(窗)隔声量提升的成本及其降噪效果,外墙(窗)隔声量提升 6 dB 便足以使轨面上各高度位置的室内噪声满足 45 dB(A)的限值。

3.4 房间尺寸

为进一步研究室内噪声控制措施,掌握室内空间尺寸对噪声的影响,在建筑外墙(窗)隔声增量 6 dB 基础上,房间高度保持不变,面积逐渐增加,研究房间尺寸对室内噪声的影响规律,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,室内面积由 20 m² 增加到 50 m²,室内噪声可降低 3.5 dB(A);当室内面积进一步增加到 80 m² 乃至 100 m² 后,室内噪声并未明显降低。在外部环境噪声、建筑外墙(窗)隔声保持不变的条件下,室内面积越大,噪声越低。而随着面积的增加,噪声降幅也逐渐减小。

因此,在铁路声屏障和建筑外墙(窗)隔声都难以

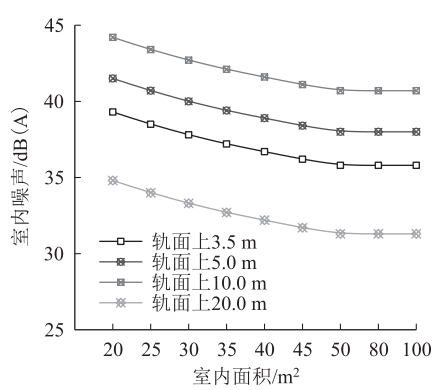


图 11 室内面积对室内噪声影响规律图

进一步有效降低铁路沿线建筑室内噪声时,可通过改变建筑内房间尺寸及用途来使内部噪声满足标准要求。例如,可将轨面上 3 ~ 5 m 高度的房间作为办公室、多功能厅,将轨面上 5 ~ 10 m 高度的房间作为宴会餐厅,同时增大大厅堂面积,进一步减小噪声;将更高层的房间作为客房,尽量使对噪声要求高的房间在空间上远离噪声源。

4 结论

本文以某在建交通枢纽内部高速铁路沿线高标准星级酒店为对象,研究了列车高速过站及进出站工况下对沿线环境及敏感建筑的噪声影响,从线路与沿线建筑两方面入手设计了降噪方案,讨论了降噪方案对铁路沿线及敏感建筑内部的噪声影响规律,得到主要结论如下:

(1) 列车高速通过且到发线有车进出站时,沿线环境噪声可达 90 dB(A) 以上,距轨道中心线 35 m 高标准星级酒店内部最小噪声超过 50 dB(A)。列车运行产生的噪声将严重影响沿线敏感建筑的使用功能。

(2) 声屏障可有效控制铁路沿线噪声,降低对沿线敏感建筑的影响。声屏障高度越高,降噪效果越好,12 m 高声屏障对沿线环境及敏感建筑内部的降噪效果可达 10 dB(A)。

(3) 提高建筑外墙(窗)的隔声以及增大室内面积也可有效控制敏感建筑内部噪声,隔声量越高、室内面积越大,室内噪声越低。隔声量提高 6 dB,室内噪声可降低 4 ~ 6 dB(A);室内面积增加 30 m²,室内噪声可降低 3 ~ 4 dB(A);随着隔声量与面积进一步增加,室内噪声降幅逐渐减小。

(4) 在铁路声屏障和建筑外墙(窗)隔声都难以进一步有效降低沿线敏感建筑室内噪声时,可通过改变房间尺寸及用途来使内部噪声满足标准要求。

另外,对于铁路沿线的敏感建筑还应考虑车致振动辐射二次结构噪声的影响。目前该铁路沿线酒店仍处于初步设计阶段,结构设计方案尚不明确。后续将结合酒店的建筑结构具体细节,对其开展车致振动及二次结构噪声特性与控制研究。将对此类复杂环境下的敏感建筑开展振动噪声测试,掌握其振动噪声特性,对现有预测方法进行验证和完善。

参考文献:

[1] 邓跃,施洲. 高速铁路噪声特性及其限值研究[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(3): 27-32.
DENG Luo, SHI Zhou, Analysis on Noise Character and Noise Limit Value of High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(3): 27-32.

[2] 袁月生,吕平,李向东,等. 轨道交通减振降噪措施概述[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 80-82.
YUAN Yuesheng, LV Ping, LI Xiangdong, et al. Overview of Vibration and Noise Control Measures for Rail Transit [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 80-82.

[3] HE Bin, XIAO Xinbiao, ZHOU Qiang, et al. Investigation into External Noise of a High-speed Train at Different Speeds [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2014, 15(12): 1019-1033.

[4] 褚华峰. 高速铁路隧道噪声特性试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
CHU Huafeng. Testing Study on Noise of High-speed Railway Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[5] HJ 2.4-2021 环境影响评价技术导则——声环境[S].
HJ 2.4-2021 Technical Guidelines for Noise Impact Assessment—Sound Environment [S].

[6] 王德威,李帅,张捷,等. 高速列车车外噪声预测建模与声源贡献量分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3113-3120.
WANG Dewei, LI Shuai, ZHANG Jie, et al. Prediction of External Noise of High-speed Train and Analysis of Noise Source Contribution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 3113-3120.

[7] 陈锋,廖建州. 成灌铁路降噪工程设计研究[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(6): 66-69.
CHEN Feng, LIAO Jianzhou. Research on Noise Reduction Plan on Chengdu-Duijiangyan Line [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(6): 66-69.

[8] 周信,肖新标,何宾,等. 高速铁路声屏障降噪效果预测及其验证[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 14-19.
ZHOU Xin, XIAO Xinbiao, HE Bin, et al. Numerical Model for Predicting the Noise Reduction of Noise Barrier of High Speed Railway and Its Test Validation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 14-19.

(下转第 33 页)

对编制铁路国土空间专项规划起到一定借鉴作用,同时对铁路线路选线能起到一定的指导、参考作用。

参考文献:

- [1] 交规函[2018]423号,关于做好交通基础设施国土空间控制规划有关工作的通知[S].
- Jiao Gui Hua Han[2018]No. 423, Notice on Doing a Good Job in the Planning of Territorial Spatial Control of Transportation Infrastructure[S].
- [2] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建铁路A线可行性研究总说明书[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2020.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Specification for the Feasibility Study of New Railway Line A[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2020.
- [3] 建标 232-2008, 新建铁路工程项目建设用地指标[S].
- Jian Biao 232-2008, Indicators of Land for Construction of New Railway Projects[S].
- [4] 龙宗明. 贵阳至南宁高速铁路环保选线设计探讨[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 91-95.
- LONG Zongming, Discussion on Environment-friendly Railway Location Design of Guiyang-Nanning High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 91-95.
- [5] 林晓龙, 张可军, 蒋登伟. 云桂铁路总体设计及技术创新[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(1): 93-97.
- LIN Xiaolong, ZHANG Kejun, JIANG Dengwei. Overall Design and Technological Innovation of Nanning-Kunming High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1): 93-97.
- [6] 乐重. 铁路综合选线原则思考[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 54-58.
- YUE Zhong. Thoughts about Principle for Integrated Railway Route Selection[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 54-58.
- ~~~~~
- (上接第24页)
- [9] 何宾, 肖新标, 周信, 等. 声屏障插入损失影响因素及降噪机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(4): 761-770, 783.
- HE Bin, XIAO Xinbiao, ZHOU Xin, et al. Influence Factors of Insertion Loss and Their Noise Reduction Mechanism for Noise Barrier[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(4): 761-770, 783.
- [10] 张青, 闫国华, 方括. 机场附近的噪声环境和住宅的隔声改造[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(2): 75-79.
- ZHANG Qing, YAN Guohua, FANG Kuo. Noise Environment and Sound Insulation of Residential Building in the Vicinity of Capital International Airport[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(2): 75-79.
- [11] 汤旭, 焦映厚, 于东. 高铁高架车站候车环境噪声的数值预测[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 129-133.
- TANG Xu, JIAO Yinghou, YU Dong. Numerical Prediction of Interior Noise of Waiting Hall of High-speed Railway Station[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 129-133.
- [12] 刘家海, 胡永利, 刘舫泊, 等. 线下式桥建合一车站振动噪声特性及控制研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(7): 102-108.
- LIU Jiahai, HU Yongli, LIU Fangbo, et al. Research on the Vibration and Noise Characteristics and Control of the Under-line Bridge-construction Integration Station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(7): 102-108.
- [13] GB 50118-2010 民用建筑隔声设计规范[S].
- GB 50118-2010 Code for Design of Sound Insulation of Civil Buildings[S].
- [14] 马大猷. 声学手册[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2004: 173, 611-612.
- MA Dayou. Handbook of Acoustics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004: 173, 611-612.
- [15] 顾汉星, 张捷, 张开林, 等. 裙板结构对市域列车车外噪声的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 162-167.
- GU Hanxing, ZHANG Jie, ZHANG Kailin, et al. Analysis of the Influence of Skirt Board on Exterior Noise of Regional Trains[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(1): 162-167.
- [16] 王德威. 高速列车车外噪声源贡献量分析及影响因素研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Dewei. An Analysis of External Noise Source Contribution and Influence Factors for a High-speed Train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [17] 杨妍, 张捷, 何宾, 等. 基于试验测试的桥梁与路堤区段高速列车车外噪声特性分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 188-197.
- YANG Yan, ZHANG Jie, HE Bin, et al. Analysis on Exterior Noise Characteristics of High-speed Trains in Bridges and Embankments Section Based on Experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 188-197.
- [18] 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 Dewang. Study on Noise Reduction Effect of Fully-enclosed Noise Barrier on High-speed Railway Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.