

考虑窗墙界面与气密性的外墙隔声模拟方法*

何 卫¹, 姚存勖¹, 侯 森^{2,3}, 张 宇⁴, 陈嘉梁^{2,3}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院 武汉, 430074)

(2. 北京东方雨虹防水技术股份有限公司 北京, 101111)

(3. 北交振安轨道科技(北京)有限公司 北京, 101111)

(4. 中铁建南方建设投资有限公司 深圳, 518000)

摘要 为探究窗户气密性及窗墙连接构造对建筑隔声性能的影响,首先,针对目前建筑隔声研究中鲜有考虑构造界面影响的问题,开展了城轨高架沿线建筑室内外噪声测试;其次,通过实测 6 处典型工点并获取相应隔声特性,在忽略侧向传声与结构二次噪声的影响下,建立了窗墙组合构建模型;最后,进一步设置缝隙与薄弱层,分别考虑窗户气密性与窗墙连接界面对隔声性能的影响。结果表明:窗型是影响建筑外墙隔声量的主控因素;窗户气密性与窗墙连接界面显著影响建筑外墙对中高频噪声的隔声能力,从而影响其整体隔声性能;设置缝隙后,高频段隔声量显著下降,进一步设置薄弱层后,模拟结果与实测结果更加吻合。通过引入缝隙与薄弱层参数,分析了构造界面对高频隔声的影响,提升了隔声模拟的准确性,研究结果可为城轨交通沿线建筑的隔声设计与优化提供参考。

关键词 窗墙连接界面;隔声量;窗墙组合构件;轨道交通高架线;现场实测

中图分类号 TU112.2;TH73

0 引言

随着宁静中国战略的持续推进以及《中华人民共和国噪声污染防治法》的落地实施^[1],交通噪声、施工噪声等各类噪声引起的纠纷和投诉开始有法可依,相关噪声分析与控制技术也不断发展^[2-3]。外墙可有效隔绝噪声,但由于考虑采光和通风效果,建筑外墙一般需要开窗,即典型的窗墙组合形式。与单一墙体或窗相比,窗墙组合构件的隔声行为更为复杂。为明晰组合构件的隔声规律,朱曦等^[4]利用 COMSOL 有限元软件,研究了玻璃厚度、空气层厚度对双层中空玻璃隔声性能的影响。刘昕洋^[5]通过有限元软件研究了复合板墙的隔声性能,指出窗与墙的隔声性能相匹配时可最大化发挥组合构件的隔声性能。

除墙体类型与窗型对建筑外墙隔声性能的影响以外,相关研究结果表明窗户气密性与窗墙连接界面对建筑外墙隔声性能亦有明显影响^[6]。目前,已有针对这些影响因素的有益探索。赵良省^[7]给出了窗墙组合构件隔声量的理论计算公式,通过将缝隙视为一种透射系数为 1 的构件,发现其可显著降低高频段的隔声量。Blasco 等^[8]开展了窗墙组合构件

声学实验,研究了窗与墙之间的填充材料(聚氨酯泡沫和矿棉)和垫圈性能等因素对组合构件隔声性能的影响。该研究发现矿棉的隔声效果更好,2 种填充材料的测试结果相差约 1~2 dB。窗户间垫片气密压力减小 50% 时,隔声量测试结果减小约 3 dB。

除上述研究以外,部分学者注意到建筑构件气密性以及窗墙连接界面同样对建筑隔声性能产生影响。然而,目前针对窗户气密性与窗墙连接界面隔声模拟方法的研究较少,因此极有必要开展更加符合实际情况的隔声模拟方法研究,以指导工程实践。

综上,本研究建立基于窗墙组合构件的初始模型。考虑窗户气密性与窗墙连接界面的影响,在初始模型的基础上,建立精细化隔声计算模型,并基于实测结果对模型进行检验。

1 窗户气密性与窗墙连接界面对隔声性能的影响

窗户气密性是影响外墙隔声的重要因素。现行推拉窗构造工艺中,两扇窗之间存在的缝隙将显著降低建筑外墙的隔声性能噪声,尤其是在 630 Hz 及

* 国家自然科学基金资助项目(51508431);住房和城乡建设部科学技术计划资助项目(2022-K-153)

收稿日期:2024-07-04;修回日期:2024-07-29

以上的中高频段噪声。此外,窗墙连接界面也是不可忽略的影响因素。我国相关规范^[9]通过设置特定的构造措施,消除侧向传声以及被测构件(窗或楼板等)与安装洞口连接界面对隔声测试的影响。以窗构件为例,间壁墙需采用密度大于 $1\,800\text{ kg/m}^3$ 的两层混凝土墙或抹灰砖砌墙,墙面覆以密闭的反射性材料,并以矿棉填充两墙体间的空腔。

在工程实践中,根据相关国家标准^[10],铝合金窗框往往通过固定片或者钢附框的方式与墙体结构层进行连接,并使用发泡胶填充窗框与墙体之间的缝隙,在内外周边均匀抹密封胶,以防止雨水从窗墙缝隙处渗入室内^[10-11]。图1为窗墙连接构造图。然而,窗墙连接界面处胶体易老化脱落,窗与墙接合面易出现裂缝,影响外窗的气密性和水密性,进而影响建筑外墙整体的隔声性能。

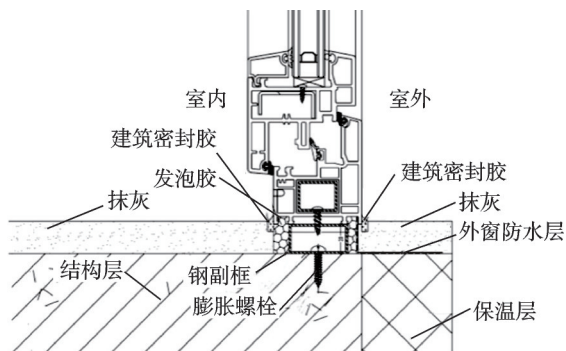


图1 窗墙连接构造图^[10]

Fig.1 Structure of window and wall connection^[10]

2 考虑窗户气密性与窗墙连接界面影响的隔声模拟方法

传统的隔声模拟大多针对窗、楼板等单一建筑构件,针对外墙组合构件隔声模拟的研究相对有限,且未考虑窗户气密性以及窗墙连接界面的影响,致使模拟结果与实际情况存在偏差。为此,本研究提出考虑窗户气密性与窗墙连接界面影响的隔声模拟方法,并与实测结果对比,以检验该方法的准确性。

2.1 隔声初始模型

城轨高架列车经过沿线建筑时,所诱发的噪声主要包括轮轨噪声、车辆设备噪声、气动噪声、桥梁以及建筑结构二次噪声等。由于结构二次噪声的频带为 $20\sim 200\text{ Hz}$ ^[12],窄于隔声分析所关注的 $50\sim 5\,000\text{ Hz}$ 。此外,与侧向传声相比,直接传声途径仍占主导地位^[13-14],即建筑整体的隔声性能主要取决于外墙的隔声性能。为此,在忽略结构二次噪声与

建筑侧向传声的前提下,构建了窗墙组合构件简化模型作为隔声初始模型。该模型由墙体和窗体2部分组成,两者网格尺寸保持一致,界面处共用节点。简化模型示意图如图2所示。

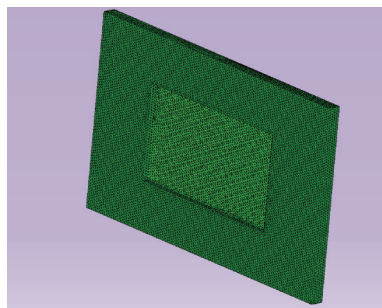


图2 简化模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of simplified model

2.2 精细化模型

外墙隔声性能受窗户自身气密性以及窗/墙界面(窗/墙连接界面施工工艺、连接方式、构造措施等)的影响较大。因此,在初始模型的基础上,进一步考虑窗户气密性与窗墙界面的影响,对2类主控因素进行量化并建立相应的隔声模拟方法。

对于窗户气密性,可在初始模型的基础上设置一定宽度的缝隙进行模拟。对于窗墙界面,由于窗墙连接界面处无明显缝隙,因此可在窗墙连接处设置薄弱层(材料密度与弹性模量远小于墙体)。隔声预测精细化模型如图3所示,该模型由墙体、窗、缝隙、窗墙组合界面层(薄弱层)等4部分组成。本研究提隔声模拟方法为隔声分析提供了基本框架,除推拉窗外,同样适用于平开窗等其他窗型。

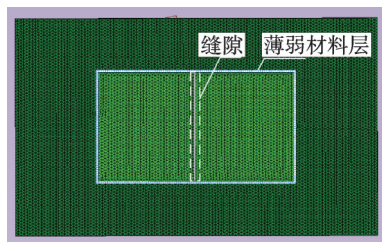


图3 隔声预测精细化模型

Fig.3 Sophisticated model for sound insulation prediction

3 现场测试

3.1 工程概况

考虑墙型和窗型对建筑隔声特性的影响,选取城市轨道交通高架沿线的典型建筑物,开展室内外噪声测试。地铁为B型车,运营速度为 $50\sim 80\text{ km/h}$;

桥梁为单箱单室混凝土箱梁。地铁线路中心线与建筑外墙的水平距离记为 D , 建筑高度为 h_1 , 桥墩高度为 h_2 。表 1 为测试工点概况, 展示了 6 处测试工点的详细信息。

表 1 测试工点概况
Tab.1 Summary of all test points

工点	车辆编组	结构形式	外墙类型	宽×高/mm		窗型	D/m	h_2/m
				墙体	窗			
1	4	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	5 000×3 000	2 700×1 500	推拉窗 单层玻璃	25	12
2	4	砖混结构	砖砌体	3 600×3 000	1 500×1 500	推拉窗 单层玻璃	25	12
3	6	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	3 600×3 600	1 500×1 800	推拉窗 双层玻璃	25	10
4	6	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	3 600×3 600	1 500×1 800	平开窗 夹层玻璃	20	10
5	6	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	3 600×3 600	1 500×1 800	平开窗 双层玻璃	25	10
6	6	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	3 600×3 600	1 500×1 800	平开窗 夹层玻璃	15	5

3.2 测点布置

在建筑物室内外均布置声测点, 根据相关规范^[12], 室外传声器布置在距离外墙 2.0±0.2 m 处, 室内传声器分别布置在距离房间界面 0.5 m、距离待测外墙 1.0 m、离地高度 1.5 m 处。测试中传声器主轴与被测外墙构件表面垂直。测点示意图如图 4 所示。

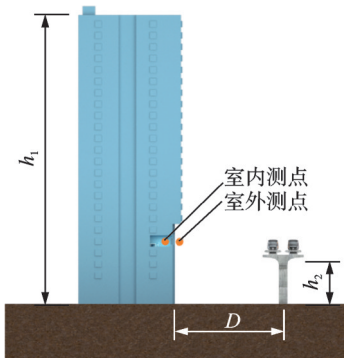


图 4 测点示意图
Fig.4 Schematic diagram of test points

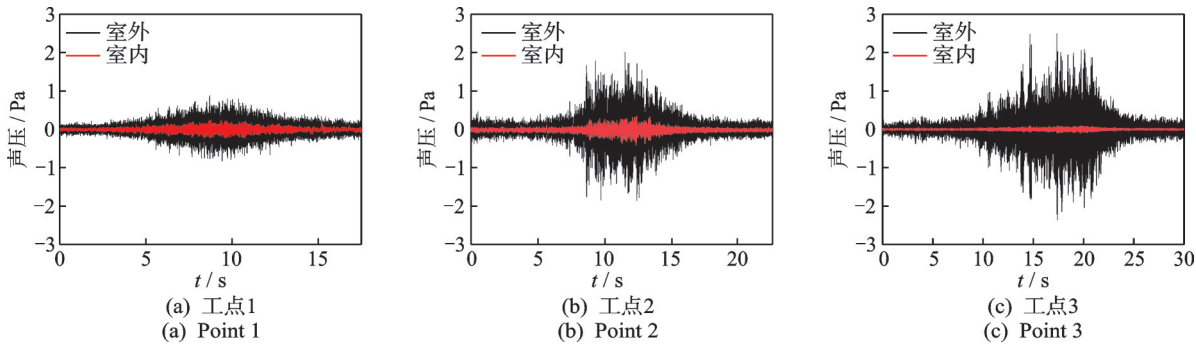
3.3 测试仪器

采用丹麦 Brüel & Kjær 公司声传声器, 动态测量范围为 16~143 dB, 频响范围为 3~20 000 Hz, 灵敏度为 50 mV/Pa; 采集仪为 DH9581 型动态数据采集仪, 传声器采样频率为 25 600 Hz, 可满足 5 000 Hz 的分析频率要求。测试前对所有传声器的灵敏度进行校准。

4 测试结果与分析

4.1 时域分析

过车段室内外声压时程曲线如图 5 所示。列车通过时, 由时程曲线可观察到明显的过车波形, 且室外声压显著大于室内。实测 6 处工点的室外声压峰值分别为 0.9、2.0、2.5、3.0、1.1 和 10.9 Pa。由于工点 6 距线路水平距离最近, 因此该点室外声压峰值最大。此外, 随着列车编组数量的增加, 过车时段的持续时间随之增加。



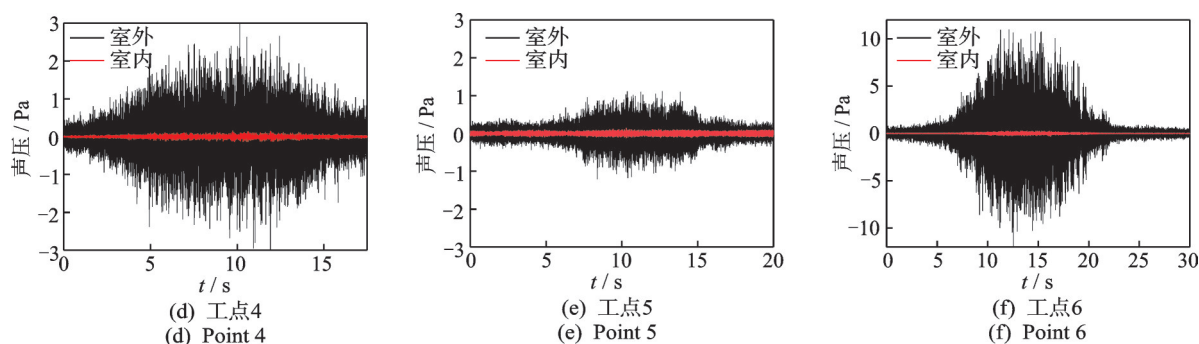


图5 过车段室内外声压时程曲线

Fig.5 Indoor and outdoor sound pressure time series curves under train pass-by events

4.2 频域分析

对6处工点实测声压时程在1/3倍频带内进行频谱分析,并采用A计权网络进行处理。工点1~6室内外A计权声压级曲线如图6所示。测试结果以包络线形式给出,同时给出了均值。

由图6可知,6处工点过车时段的室外声压级曲线具有相似的频谱特征,且均在40~70 dB(A)左右。具体来说,声压级在50~800 Hz呈上升趋势,

峰值出现在800 Hz左右,随后呈下降趋势。实测列车的营运速度为50~80 km/h,在该运营速度下,列车噪声的主要来源为轮轨噪声^[15],因此实测结果中出现400~800 Hz的典型峰值。此外,过车时室内6处工点声压级水平呈现明显的差异性,表现为工点1、2的室内声压级曲线在1 000 Hz以上的中高频段明显大于工点3~6的相应数据。室外噪声具有相似的声压级水平,这说明不同工点的隔声特性有明显差异,从而导致过车时室内噪声水平有所区别。

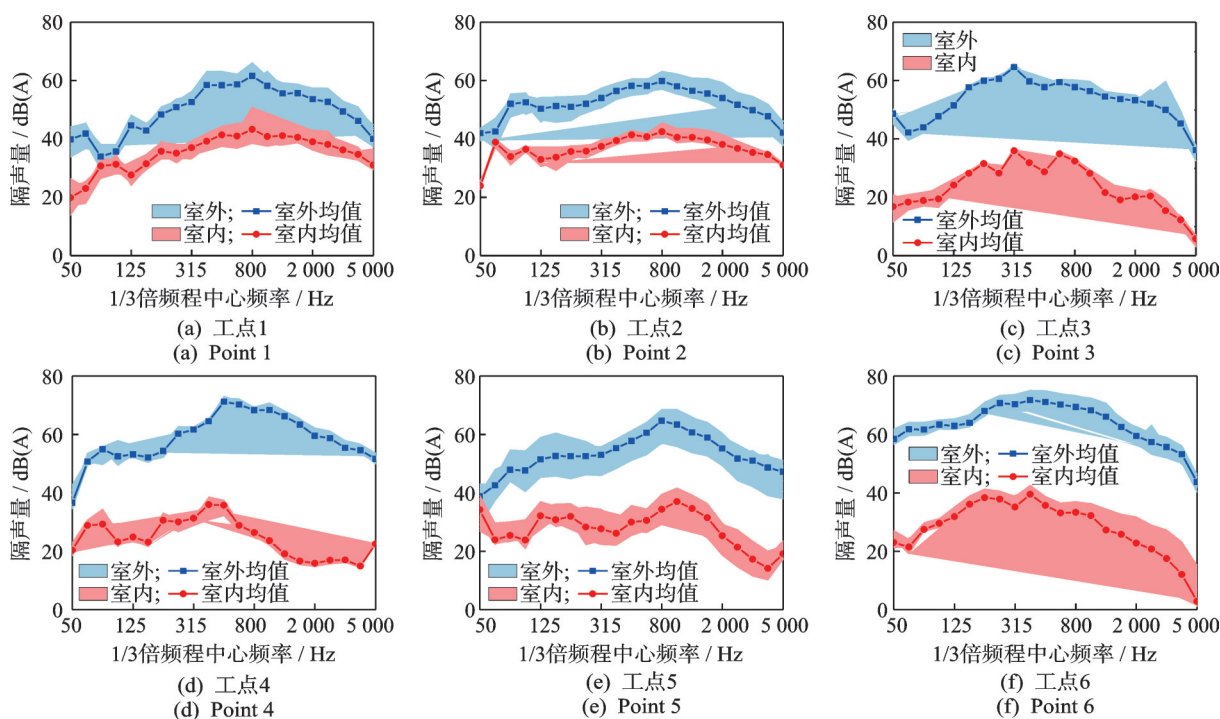


图6 工点1~6室内外A计权声压级曲线

Fig.6 Indoor and outdoor A-weighted sound pressure levels under train pass-by events for point 1 to 6

4.3 隔声量分析

对所测室内外噪声声压级曲线作差,可得到6处工点建筑的分频隔声曲线。对室内外噪声的等效连续A声级作差,得到的各工点隔声量如表2所示。

对比工点1~6的隔声量结果,可以得出以下结果。

1) 工点1、2所测隔声量均约为16 dB,外墙墙型分别为加气混凝土砌块与砖墙,窗型均为单层玻璃推拉窗,但实测建筑隔声量差异不大;工点3~6外墙均为加气混凝土砌块,窗型为夹层玻璃与双层玻璃,

分频及合成隔声量差异较大,而工点 3、5(均采用双层玻璃平开窗)以及工点 4、6(均采用夹层玻璃平开窗)均表现出相似的隔声特征。由此说明,窗型是影响建筑物隔声特性的主控因素,而墙的影响相对较小。

2) 工点 1、2 的隔声量明显小于工点 3~6,特别是

在中高频段;工点 1、2 中高频段隔声量均在 20 dB(A) 以下,工点 3~6 中高频段的隔声量在 25~47 dB(A)。由于工点 1、2 均为推拉窗,在气密性上明显劣于工点 3~6 的平开窗,这说明气密性对外墙隔声量有显著影响,尤其是在 630 Hz 及以上的中高频段。

表 2 各工点隔声量
Tab.2 Sound insulation for all test points

工点编号	结构类型	墙型	窗型	室外噪声/dB(A)	室内噪声/dB(A)	隔声量/dB(A)
1	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	推拉窗(单层玻璃)	67.8	51.2	16.6
2	砖混结构	砖墙	推拉窗(单层玻璃)	67.7	51.3	16.4
3	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	平开窗(双层玻璃)	70.2	41.9	28.3
4	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	平开窗(夹层玻璃)	77.2	41.9	35.3
5	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	平开窗(双层玻璃)	70.4	43.9	26.5
6	框架-剪力墙结构	加气混凝土砌块	平开窗(夹层玻璃)	80.0	46.4	33.6

5 参数分析

本节开展参数分析,量化窗户气密性及窗墙连接界面对隔声量的影响,为具体参数的取值提供依据。

5.1 缝隙对组合构件隔声量的影响

以工点 1 为例,建立隔声预测基准模型,模型参数如表 3 所示。

表 3 模型参数
Tab.3 Parameters of model

材料	构件尺寸/mm	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松 比
单层玻璃	1 500×1 250×3	2 500	72	0.2
加气混凝土	5 000×5 000×200	1 600	4.5	0.2

声学计算频率上限 $f_{\max}$ 与网格尺寸 L 的关系式为

$$f_{\max} \leq \frac{c}{6L} \tag{1}$$

其中: c 为流体中声传播的速度,对于空气介质, $c=340$ m/s。

计算上限频率为 5 000 Hz。由此,为满足最大分析频率,网格尺寸设置为 10 mm。建立墙窗组合构件模型后,由于厚度方向的尺寸不一致,墙体表面会出现凹陷,建立空气层时需将空气层凸出,以保证声振耦合计算时的准确性。

城轨噪声是一类典型的移动声源问题。为简化计算,在隔声分析时采用室外测点列车过车时段的稳态声压(将实测声压时程“掐头去尾”),并将其转化至频域作为输入,近似于考虑长编组列车稳态通过的情形。这种处理方式可基本反映列车噪声的典型声源特性。

在基准模型上,设置 10~50 mm 的缝隙(以 10 mm 为梯度)。不同缝隙宽度下计算结果如图 7 所示。由图可知,随着缝隙宽度的增加,隔声量逐渐下降。从无缝隙到 10 mm 缝隙的隔声量降幅最大,达 4 dB;随着裂缝宽度增加,隔声量降幅逐渐变缓。与无缝隙工况相比,缝隙的存在将显著降低 1 000~5 000 Hz 中高频带的隔声量。缝隙宽度在分频隔声量上并未表现出明显的规律性,不同缝隙宽度下的计算隔声量仍大于实测值。

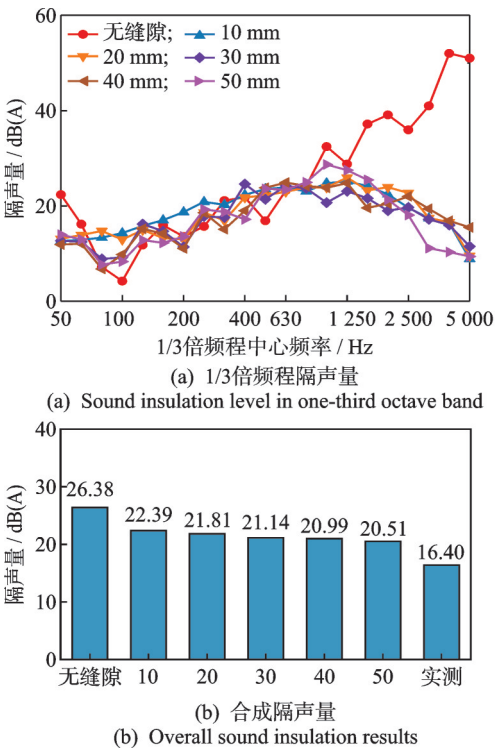


图 7 不同缝隙宽度下计算结果

Fig.7 Sound insulation results for different widths of air gaps

5.2 薄弱层对隔声量的影响

薄弱层的厚度、密度、弹性模型等参数对隔声量均有不同程度的影响,而材料面密度是影响隔声量的主控因素^[6]。为此,本节重点讨论薄弱层的厚度和密度对隔声量的影响。

首先,讨论薄弱层厚度的影响。以工点1的隔声预测基准模型为例,设置5~25 mm(以5 mm为梯度)的薄弱层。根据常规的施工工法,薄弱层的密度近似为墙体材料密度的10%。薄弱层厚度对隔声量的影响如图8所示。由图可知,薄弱层的存在显著降低了窗墙组合构件的隔声量,特别是在200 Hz以上的中高频带。然而,对于不同厚度的薄弱层,其隔声量差异不大(在1 dB以内),即对于本研究所考虑的小尺寸范围,建筑外墙隔声量对薄弱层厚度的敏感性不高。

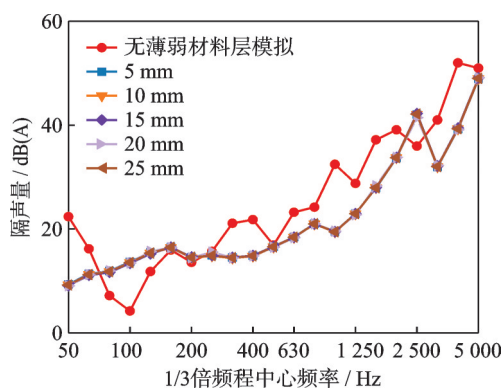


图8 薄弱层厚度对隔声量的影响

Fig.8 Effect of weak layer thickness on the sound insulation

其次,考虑薄弱层密度对隔声量的影响。薄弱层密度分别设置为外墙材料的10%、1%、0.1%、0.01%共4种工况。薄弱层厚度均取为5 mm。薄弱层密度对隔声量的影响如图9所示。结果表明,薄弱层的密度越小,组合构件的隔声量越小。此外,随着薄弱层的密度降低,高频段隔声量的增长趋势

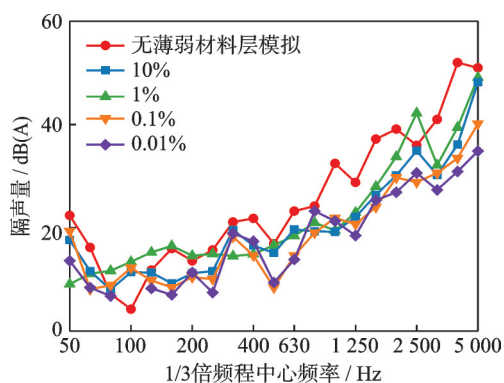


图9 薄弱层密度对隔声量的影响

Fig.9 Effect of weak layer density on the sound insulation

变缓,这与漏声对构件隔声量的影响规律一致。

分析图7~9可知,窗户气密性和窗墙界面两类因素对建筑隔声量均有影响,且窗户气密性(漏声)对隔声量的影响大于窗墙界面(薄弱层)的影响。

6 方法验证

基于实测结果对本研究所提隔声模拟方法进行检验。结合工点1的外墙与窗户尺寸,建立其窗墙组合构件的隔声初始模型。在进行隔声分析时,采用室外实测列车过车时段的声压级作为声源,并将其转化至频域作为输入,这种处理方式可近似反映列车噪声的典型声源特性。对工点1窗墙组合模型进行声振耦合计算,并将计算结果与实测值进行对比。隔声模拟与实测对比如图10所示。

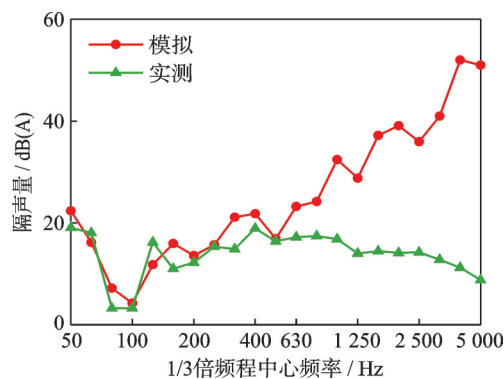


图10 隔声模拟与实测对比

Fig.10 Comparison of simulated and measured sound insulation

由图10可知,在500 Hz以下的中低频段,计算隔声量曲线与实测值的变化趋势较为吻合;在1 000~5 000 Hz中高频带,计算值显著高于实测值,即理论隔声量显著高于实测隔声量。显然,传统的隔声分析模型(初始模型)不能反映外墙真实的隔声性能,特别是在500 Hz以上的中高频段。

为此,考虑窗户漏声对构件隔声模拟的影响,根据现场测试情况,将窗缝隙设置在窗构件中央,缝隙宽度为10 mm。带缝隙构件隔声计算结果如图11所示。由图可得,相较于无缝隙工况,630 Hz以上频带隔声量显著下降,且与实测结果更为吻合;80~100 Hz的隔声低谷消失,且曲线的整体趋势更加平缓,但整体计算隔声量仍大于实测值。

进一步考虑窗墙连接界面对建筑隔声的影响。设置如图3所示的薄弱层,厚度为5 mm,其质量密度设置为墙体材料的1%。工点1精细化建模计算结果如图12所示。由图可知,设置薄弱层后,800 Hz以下中低频段的隔声曲线与实测值的吻合度更高,

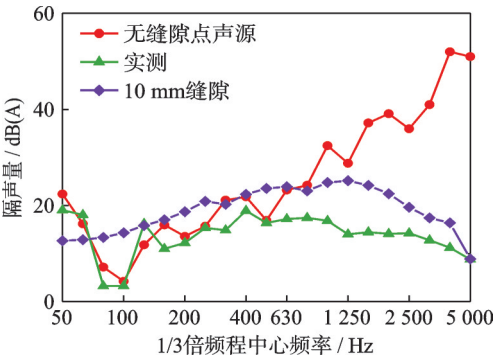


图 11 带缝隙构件隔声计算结果

Fig.11 Sound insulation results for model with air gap

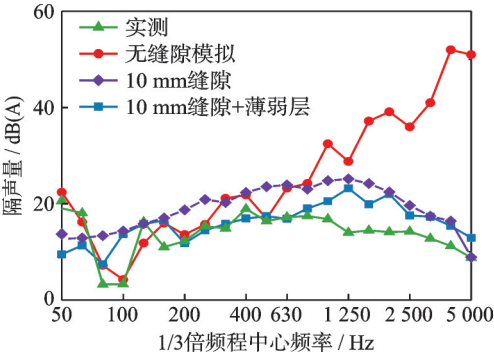


图 12 工点 1 精细化建模计算结果

Fig.12 Sound insulation results for point 1 using sophisticated model

1 000~5 000 Hz 的中高频段与实测值之间仍有差距,但相较于仅设置缝隙工况,中高频段的隔声量得以改善,且更接近实测值。总体而言,考虑漏声与窗墙连接界面的模拟方法更加符合工程实际,对实际情况建筑隔声性能的预测更加精准。

进一步以工点 4 为例开展隔声模拟,并与实测结果进行对比,以检验该精细化模型的隔声模拟效果。工点 4 模型参数如表 4 所示。工点 4 采用含夹层玻璃的平开窗。夹层玻璃构造为 2 块厚度为 5 mm 的玻璃与聚乙烯醇缩丁醛夹层,夹层材料的性质与频率相关,定义夹层材料的弹性模量时需将频率与对应的模量数值一一对应。

表 4 工点 4 模型参数				
Tab.4 Model parameters of point 4				
材料类型	构件尺寸/mm	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比
夹层玻璃	1 500×1 800	2 500	72	0.2
加气混凝土	3 600×3 600× 200	1 300	4.5	0.2

基于传统模型(初始模型)进行隔声分析,工点 4 初始模型的模拟结果与实测对比如图 13 所示。由图可知,仅 125~1 000 Hz 的中频段隔声量结果吻合

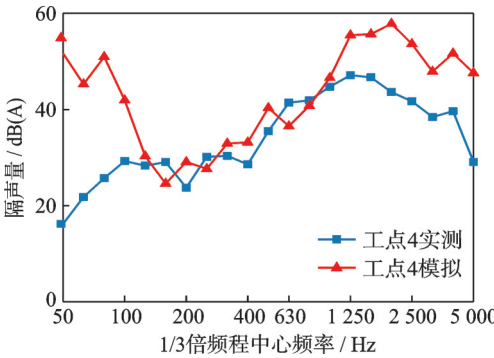


图 13 工点 4 初始模型的模拟结果与实测对比

Fig.13 Comparison of simulated and measured sound insulation using primary model for point 4

较好。在 100 Hz 以下的低频段,以及 1 250~5 000 Hz 中高频段的实测隔声量均显著低于模拟值,表明传统的隔声分析模型(初始模型)已不能反映外墙真实的隔声性能,无法满足隔声分析需求。

基于前文所述精细化模拟方法,在初始模型的基础上设置 10 mm 宽的缝隙与 5 mm 厚的薄弱材料层,以进行隔声分析,得到的工点 4 精细化建模计算结果如图 14 所示。由图可知,缝隙与薄弱层对高频段隔声效果影响显著,考虑缝隙与薄弱层后计算结果与实测值更加吻合。模型对低频段的隔声预测存在出入(大于实测值),这主要是由于忽略了结构二次噪声的影响。

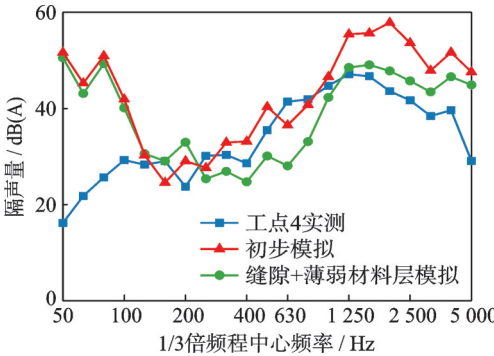


图 14 工点 4 精细化建模计算结果

Fig.14 Sound insulation results for point 4 using sophisticated model

综上,考虑窗户气密性和窗墙连接界面的精细化隔声模型可较好地反映实测隔声结果,表明本研究所提方法的准确性和可靠性较好。

7 结 论

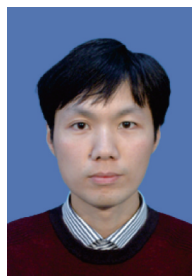
1) 窗型是影响建筑外墙隔声量的主控因素;窗户气密性与窗墙连接界面显著影响建筑外墙对高频噪声的隔声能力,进而影响其整体隔声性能。

2) 提出了考虑窗户气密性和窗墙连接界面影响的精细化隔声模型,该模型可较好地反映建筑真实的隔声性能。

3) 初步确立了考虑窗户气密性与窗墙连接界面的隔声模拟方法,并验证了其在复杂环境下的适用性。受限于现场测试环境的干扰因素,模拟精度仍有提升空间。后续研究将开展受控条件下的室内声学实验,通过控制变量法量化分析窗户缝隙尺寸及不同连接构造措施对隔声性能的影响规律,以进一步修正和完善精细化模拟模型,为建筑隔声设计提供更准确的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国噪声污染防治报告[R/OL]. (2024-08-30) [2024-11-16]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/hjzywr/202408/t20240829_1084711.shtml.
- [2] 甄冬,王梓宇,刘晓昂,等. 汽车空调管路气动噪声分析与控制研究[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(6): 1234-1241.
ZHEN Dong, WANG Ziyu, LIU Xiaolang, et al. Analysis and control of aerodynamic noise of automobile air-conditioning ducts[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(6): 1234-1241. (in Chinese)
- [3] 马凯,汤晏宁,贺义,等. 高速列车包间噪声特性及降噪方案设计验证[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(4): 778-784.
MA Kai, TANG Yanning, HE Yi, et al. Noise characteristics in the compartment and design and verification of noise reduction scheme of high-speed train[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(4): 778-784. (in Chinese)
- [4] 朱曦,王丽娟,王晓理,等. 双层中空玻璃隔声性能仿真研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 256-262.
ZHU Xi, WANG Lijuan, WANG Xiaoli, et al. Simulation study of sound insulation performance of the double-glazed window[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 256-262. (in Chinese)
- [5] 刘昕洋. 基于LMS Virtual.Lab的窗体及墙体声学特性分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [6] 刘魁刚,姚存勋,陈嘉梁,等. 城轨高架噪声下建筑外墙隔声特性实测与分析[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(5): 209-214.
LIU Kuigang, YAO Cunxu, CHEN Jialiang, et al. Measurement and analysis of sound insulation characteristics of building exterior walls under urban rail viaduct-borne noise[J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(5): 209-214. (in Chinese)
- [7] 赵良省. 噪声与振动控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 205.
- [8] BLASCO M, BELIS J, BLEECKER H D. Acoustic failure analysis of windows in buildings[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(7): 1761-1774.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19889.1—2005 声学 建筑和建筑构件隔声测量 第1部分: 侧向传声受抑制的实验室测试设施要求[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [10] 中国建筑标准设计研究院. 22J603-1 铝合金门窗[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [11] 金虹,冉光焱,康健. 严寒地区建筑外窗与墙的连接构造研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(8): 6-12.
JIN Hong, RAN Guangyan, KANG Jian. Connection structure between the exterior window and wall in severe cold area[J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2018, 46(8): 6-12. (in Chinese)
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 19889.5—2006 声学 建筑和建筑构件隔声测量 第5部分: 外墙构件和外墙空气声隔声的现场测量[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [13] 黄险峰,杨宗筱. 住宅建筑中相邻房间的侧向传声预测[J]. 声学学报, 2018, 43(2): 253-262.
HUANG Xianfeng, YANG Zongxiao. Prediction of sound flanking transmission through two adjacent rooms within a residence building[J]. Acta Acustica, 2018, 43(2): 253-262. (in Chinese)
- [14] 李洪强,吴小萍. 城市轨道交通噪声及其控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(5): 78-82.
LI Hongqiang, WU Xiaoping. Study on noise and control measures caused by urban rail transit[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(5): 78-82. (in Chinese)
- [15] 宋立忠,冯青松,孙坤,等. 城市轨道交通高架钢轨波磨地段振动噪声试验[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 159-168.
SONG Lizhong, FENG Qingsong, SUN Kun, et al. Test on vibration noise of rail corrugation section on urban rail transit viaduct[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 159-168. (in Chinese)



第一作者简介:何卫,男,1987年8月生,博士、副教授。主要研究方向为轨道交通环境振动与噪声。曾发表《Estimation of structural dynamic response induced by individual sit-to-stand loading using acceleration response spectrum approach》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2024, Vol. 211)等论文。
E-mail: hewei2018@cug.edu.cn