

文章编号:1671-4229(2023)03-0010-09

# 声振耦合分析方法在二次辐射噪声预测中的应用

## ——以广州市云珠酒店为例

古林强<sup>1</sup>, 李建军<sup>1</sup>, 邹君<sup>1</sup>, 徐士伟<sup>2</sup>, 张东旭<sup>1\*</sup>

(1. 广州大学 建筑与城市规划学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市交通规划研究院有限公司, 广东 广州 510180)

**摘要:**近年来,随着国内城市轨道交通的快速发展,地铁网络建设日新月异。地铁在给人们带来快捷和便利的同时,地铁列车运行引起的振动和噪声对周围环境和周边居民生活造成负面影响的问题日益凸显。为了评估地铁引起的二次辐射噪声影响并提高预测精度,文章以广州市地铁二号线列车运行产生的振动噪声对临近的云珠酒店的影响为例,采用声学-固体边界声振耦合计算的有限元方法,分析了地铁导致的周围建筑物室内二次噪声的空间分布特征。模拟结果显示,建筑物内测点实测值与仿真值比较,除了20~50 Hz的低频预测值比实测值稍小外,其他频段的一致性较好,二者的误差均在3 dB以内,说明本研究选用的声振耦合仿真方法可以减少人为设定的误差,提高了对地铁运行产生的周围建筑物二次噪声的预测精度,为将来进行相关的研究提供了一种较为可靠的预测方法。

**关键词:** 二次噪声; 声振耦合; 声学仿真

**中图分类号:** TP 332 **文献标志码:** A

## A novel method for prediction of secondary radiated noise with consideration of the coupling effect of acoustic and vibration: A case study of Guangzhou Yunzhu hotel

GU Lin-qiang<sup>1</sup>, LI Jian-jun<sup>1</sup>, ZOU Jun<sup>1</sup>, XU Shi-wei<sup>2</sup>, ZHANG Dong-xu<sup>1\*</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Transportation Planning Research Institute Corporation, Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of urban mass transit, the construction of subway networks is changing rapidly. The subway brings convenience and rapidity to people. At the same time, the vibration and noise caused by the running of the subway train have a negative effect on the surrounding environment and the lives of the residents. In order to evaluate the influence of the secondary radiation noise caused by subways and to improve prediction accuracy, this paper takes the impact of the vibration noise caused by the train running of Guangzhou Metro Line 2 on the nearby Yunzhu hotel as an example, based on the finite element method, the spatial distribution characteristics of secondary noise in surrounding buildings caused by subway were analyzed. The simulation results show that, when comparing the measured values with the simulated values, the consistency of the other frequency bands is good, except that the predicted values of 20~50 Hz are slightly smaller than the measured values, and the errors of the two bands are all within 3 dB, it shows that the simulation method of acoustic-vibration coupling can reduce the artificial and set error, and improve the predic-

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 广州大学科研基金资助项目(PT252022006)

作者简介: 古林强(1980—),男,副教授,博士. E-mail: glq@gzhu.edu.cn

\*通信作者. E-mail: dongxu75@163.com

引文格式: 古林强, 李建军, 邹君, 等. 声振耦合分析方法在二次辐射噪声预测中的应用——以广州市云珠酒店为例[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(3): 10-18, 74.

tion accuracy of secondary noise in the surrounding buildings, this provides a more reliable prediction method for the related research in the future.

**Key words:** secondary noise; acoustic vibration coupling; acoustic simulation

云珠酒店是广东省重点建设工程,总用地面积 11 万  $\text{m}^2$ ,总建筑面积 20 万  $\text{m}^2$ ,包含五星酒店 4 栋、四星酒店 1 栋、特色酒店 1 栋及大型宴会厅 1 栋。酒店整体采用行列式布局,建于地铁二号线沿线区域,与地铁轨道的最近直线距离仅为 15 m 左右,受地铁干扰较大。由于地铁线路采用了浅埋的方式,当地铁列车在隧道中运行时,剧烈的轮轨接触力引起隧道结构振动,并通过土体传递至地表,最终在土体和建筑相互作用下导致建筑结构的振动及建筑室内二次辐射噪声<sup>[1]</sup>。巨大的噪声与振动若不加以控制地传入酒店的建筑结构,会造成二次辐射噪声超标,将干扰酒店客人的睡眠和休息,严重时还会引发其他心理或生理疾病<sup>[2]</sup>。

近年来,国内外专家学者对地铁振动和噪声进行了大量的研究,在噪声特性分析、噪声控制和噪声预测方法等方面取得了较为丰硕的成果。关于地铁列车内以及站台空间的噪声特性研究,Shimokura 等<sup>[3]</sup>通过在铁路轨道和站台上放置声源和接收器来分析地下车站的声场特性;迟义浩等<sup>[4]</sup>采用现场试验方法,分析列车内及站台空间振动噪声情况;周杰等<sup>[5]</sup>采用问卷调查与现场实测相结合的方法,对下沉式地铁车辆段环境噪声的特性展开研究。关于地铁列车沿线的周边建筑物结构振动和室内二次辐射噪声等问题,陈兆玮等<sup>[6]</sup>研究了地铁列车通过时 TOD 建筑的振动及二次噪声特性及分布;申道明等<sup>[7]</sup>针对地铁列车引起的建筑物二次辐射噪声进行了现场试验研究和评价量的探讨分析;康波<sup>[8]</sup>通过建立隧道-土层-建筑物三维有限元模型,分析了地铁列车通过时建筑物结构二次辐射噪声特性。关于控制地铁噪声的研究,采用浮置板轨道可以有效地降低由地铁运行所造成的建筑物内的振动和二次辐射噪声<sup>[9]</sup>,降速和轮轨打磨是较为经济的降噪方法<sup>[10]</sup>,并且采用隔声性能更好的材料<sup>[11]</sup>和声屏障措施<sup>[12]</sup>可以达到明显的降噪效果。

关于噪声预测的方法,目前国内外学者主要采用解析法、数值法、实测法和经验预测法,解析法中,Currey 等<sup>[13]</sup>和 Cunefare<sup>[14]</sup>用声辐射模态的思想求解了薄板与梁结构的声辐射模态与效率;李全峰等<sup>[15]</sup>使用解析法对轴向磁通盘式永磁同步电动机工作时产生的噪声声强级进行预测计算,结合实测结果表明该解析法的可行性。数值法中,肖永武等<sup>[16]</sup>利用数值模型研究发现,对于多层建筑而言,建筑二层室内的二次辐射噪声声压级最大,声压级随着楼层的增高而逐渐降低;刘林芽等<sup>[17]</sup>

利用有限元法和声传递能量法研究列车动荷载作用下的槽型梁二次辐射噪声特性,并用响应面法对槽型梁进行了声学结构优化。实测法中,邢梦婷<sup>[18]</sup>以成都某地铁车辆上盖为研究对象,通过现场实测对建筑物内的二次辐射噪声响应水平进行了评价;王祥秋等<sup>[19]</sup>通过对某高铁线周边建筑进行现场实测,对高铁列车运行引起的室内二次辐射噪声进行了分析与评估,并提出了相应的减振降噪措施。经验预测法中,Kurzweil<sup>[20]</sup>基于地铁沿线建筑室内振动和二次辐射噪声水平实测数据,提出了一个基于振动加速度级的二次辐射噪声声压级预测公式。Billeter 等<sup>[21]</sup>通过大量的实测数据和对半经验公式的推导,给出了 80 ~ 150 Hz 范围内传递函数  $H^*(f)$  的简化系数。

目前,国内外对于建筑室内二次辐射噪声的预测精度仍旧较低,尚未形成稳定可供参考的工程数据加以应用,即无法在建筑建成之前通过简单的图表预测到建成环境的振动与噪声水平<sup>[22]</sup>。解析法只能对几何关系极为简单的简支梁、板、壳等建立辐射声场方程,用相应的特殊函数获得解释,云珠酒店项目属于大型复杂结构,不能直接使用该方法。至于实测法,是通过试验并在大量实测数据基础上建立的经验、半经验公式来预估二次辐射噪声。只有当被分析的对象与取得数据的问题类似时,这些经验、半经验公式的结果才可能准确,当前很难在国内外找到与本项目相类似的案例,因此,实测法也不适用。经验预测法本身缺乏明确的物理含义,主要根据国内外学者通过长期的测量与统计分析得到的数据拟合关系,目前,以 Kurzweil<sup>[20]</sup>及 Billeter 等<sup>[21]</sup>分别提出的二次辐射噪声预测公式为主流,但由于影响二次辐射噪声的因素较多,在实际中预测应用准确度欠佳,利用该公式进行的相关预测效果不一,应用面较窄,所以在本项目中仅作为参考。经过对各类方法的综合考虑,本文使用数值法,并发展了基于实测结果修正的耦合仿真分析方法,且实施了具体的减振降噪工程措施。

## 1 声振耦合分析方法

随着计算机技术的发展,通过数值法求解复杂振动与二次辐射噪声的问题,可以极大地弥补解析法的不足,更加贴近真实的场景。在这些数值法中应用最广泛和最成熟的是有限元法,它仿真的成果已经得到很多项

目的验证,表明该预测方法比较可靠。对于振动与声学系统,捕捉波在流体-固体分界面处的行为很重要。从数学上看,声振耦合分析的控制方程(耦合条件)如下:

$$-n \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = -n \cdot u_u,$$

$$F_A = p_t n,$$

其中,  $u_u$  是结构加速度,  $n$  是表面法线方向,  $p_t$  是总声压,  $q_d$  是声偶极子域,  $F_A$  是作用在结构上的载荷(每单位面积的力)。如果能实现声学-结构边界耦合计算,可以有效地避免采用不同软件的配合(例如 Ansys 软件与 LMS Virtual. Lab 软件的配合)在分界面处产生的人为误差,本项目采用了 COMSOL Multiphysics 作为仿真平台,主要就是考虑了该平台可以自动满足流体-固体分界面处的流体载荷和流体所经历的结构加速度耦合,在声与振动耦合的相关项目中仿真结果比较准确。

## 2 研究过程

### 2.1 仿真类型确定

选择固体力学和压力声学中“频域”作为研究过程,可以计算给定模型受到一个或多个频率的谐波激励时的响应。本项目中的激励信号有实际测量结果可供进行推测,因此,选择频域研究是最合适的。考虑到计算规模的问题,在研究各个酒店梁柱框架受振动影响最大的区域时使用了“梁模块”进行近似分析,即仅考虑框架结构中弹性波的传播,楼板作为梁的附加质量考虑;在确定二次辐射噪声的超标数值时仅考虑离地铁线最近的最不利跨度,直接采用“固体力学(弹性波)”模块与“压力声学(频域)”进行细致建模,此时楼板、墙体和幕墙按照结构设计图的厚度输入;在研究各建筑构件的二次辐射噪声贡献值时,同样直接采用“固体力学(弹性波)”模块与“压力声学(频域)”进行细致建模,此时楼板、墙体和幕墙玻璃按照刚性连接的方式与梁柱连接,各构件的厚度和阻尼采用参数化扫描的方式,例如,楼板的厚度从 0.1 m 变化到 0.2 m,步长为 0.05 N·s/m,阻尼从 0.02 N·s/m 变化到 0.12 N·s/m,步长为 0.02 N·s/m,通过不同的组合可以看到室内声场的变化情况。

### 2.2 材料属性与网格剖分设置

在建立声学仿真模型时,按照酒店建设单位提供的结构设计图,指定梁、柱、楼板等构件的截面尺寸及相应材料的密度、弹性模量及泊松比。参照《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》<sup>[23]</sup>,混凝土的泊松比  $\nu_c$  可按 0.2 采用,弹性模量  $E_c$  取值如表 1 所示,其余参数选择如表 2 所示。

表 1 混凝土弹性模量的取值

Table 1 The selected value of the elastic modulus of the concrete

混凝土 强度等级	$E_c$ /( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	混凝土 强度等级	$E_c$ /( $10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )
C15	2.20	C50	3.45
C20	2.55	C55	3.55
C25	2.80	C60	3.60
C30	3.00	C65	3.65
C35	3.15	C70	3.70
C40	3.25	C75	3.75
C45	3.35	C80	3.80

表 2 材料物理参数确定

Table 2 Physical parameters of the material are determined

名称	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 /Pa	泊松比	声速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
墙体	2 000	17.0e9	0.20	1 800
幕墙	2 203	73.1e9	0.17	5 000
空气	1.205	1.43e5	0	344

在进行有限元仿真时,按照 COMSOL 的技术手册,计算单元最小尺寸的设置原则为每个波长至少有 6 个单元。因为考虑的频率范围为 20 ~ 200 Hz,在混凝土中最小的剪切波的波速为 264 m/s,因此,固体中的最小单元尺寸为

$$\frac{c_s}{6f_{\max}} = \frac{264}{1\,200} = 0.22 \text{ m}。$$

而在空气中,胀缩波的波速为 344 m/s,因此,空气中的最小单元尺寸为

$$\frac{c_b}{6f_{\max}} = \frac{344}{1\,200} \approx 0.28 \text{ m}。$$

### 2.3 边界与阻尼条件设置

当弹性波传播到模型的边界时会被边界阻挡并反射,对整个框架结构进行计算时没有人工截断的边界,仅需要在与地面连接的柱子底部设置为固定约束边界即可。在单跨模型和标准间模型的情况下,存在人工截断,因此,在单跨和标准间模型中设置了完美匹配层(PML)以及低反射边界层,以减少人工截断带来的反射波,尽量贴近实际的情况。

按照 COMSOL 的技术手册,在没有明确的材料阻尼输入的情况下,对所有构件采用系统指定的瑞利阻尼,假设系统的阻尼矩阵、质量矩阵和刚度矩阵为线性关系。当在标准间模型仿真时,切换为人工施加参数化阻尼,如表 3 所示。

表 3 模型中的阻尼设置

Table 3 Damping settings in the model  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

名称	阻尼初值	步长	阻尼终值
楼板	0.020	0.020	0.12
墙体	0.020	0.020	0.08
幕墙	0.001	0.005	0.01

### 3 结果与讨论

#### 3.1 有效性校验

在仿真计算中,考虑到计算的频率较高,楼板的振动样式非常复杂,不可能把激励动荷载均匀加载到楼板上,只能在柱子底端施加动荷载,这样更加接近实际情况。根据实测的振动加速度值反推激励信号的特征,即通过“试错-修正”(try-error)的过程不断修正输入信号,分别调整各频段来逼近真实的激励。对结构的振动状态进行比较详细的测量,可以获得不同位置和不同时刻的振动加速度数据。选取其中的特色酒店作为测量对象,现场布置的测点如图1所示,测点R1、R2、R3和R4是每个跨度的中心位置,其中,测点R1和R2处于同一跨度并相隔10 m,测点R3和R4处于另一跨度,测点R1和R3相隔24 m。

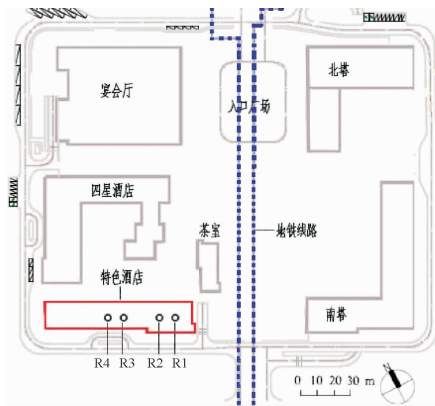


图1 云珠酒店测点布置

Fig.1 Survey point layout of Yunzhu hotel

单点(测点R2)对比的结果如图2所示,预测值与7趟列车经过时引致的振级平均实测值仅仅相差3 dB左右,预测值的频带能量分布同样与实测值很接近。

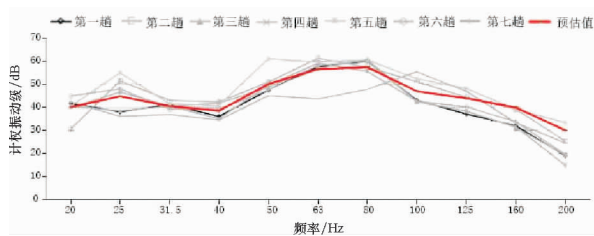


图2 单点R2仿真值和预测值的对比结果

Fig.2 Comparison results of single-point R2 simulation values and predicted values

同时,对比2~4层选定测点的仿真值与实测值,如图3所示。由于实地测量时周围环境中较多的低频干扰,导致20~50 Hz低频预测值比实测值稍小,其他频段的一致性较好,整体上的拟合程度较高。

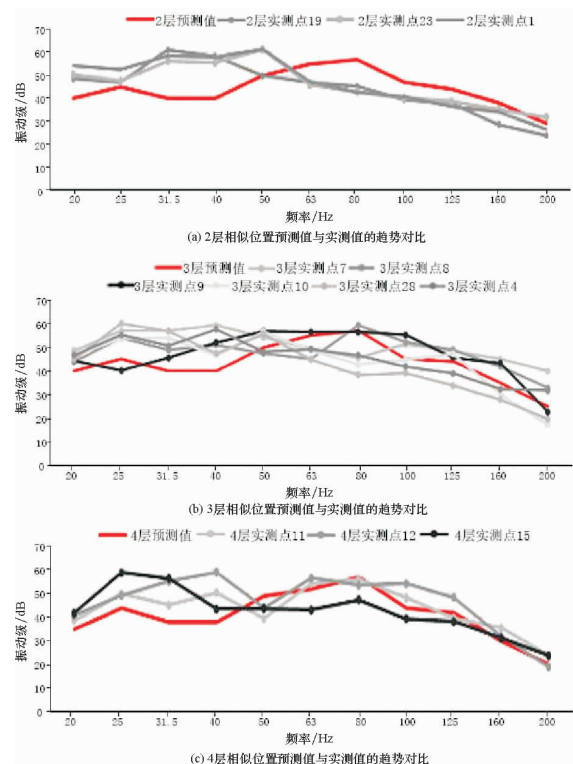


图3 不同层相似位置预测值与实测值的趋势对比

Fig.3 Trend comparison of predicted and measured values of similar positions in different layers

研究中还比较了经典 Kurzweil 预测法和 Billeter 预测法与真实测量值的差异,结果如图4所示,采用 Kurzweil 公式的预测值在63 Hz以上与真实值相差越来越大,误差在8 dB以上,而采用 Billeter 预测法的误差更大,最大可达20 dB,已经没有了预测的价值,而采用声振耦合模拟仿真的预测值与实测值相符程度最高,整体的趋势也更协调。尽管由于实际使用时房间的家具对低频有一定的吸声作用,这一方面使得实际上的驻波效应没有那么严重;另一方面整体上也降低了室内声能密度,导致仿真值可能会比实测值要高,但是总的来说,采用声振耦合模拟仿真的预测结果是比较可靠的。

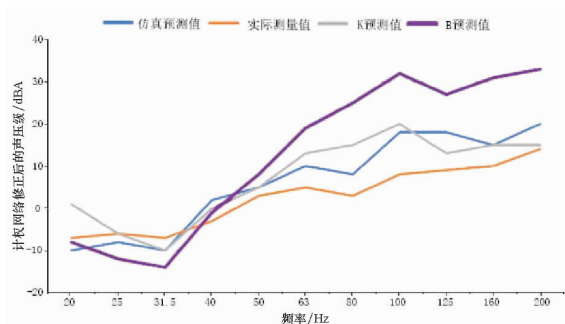


图4 不同预测方法的结果与实测结果对比分析

Fig.4 Comparative analysis of the results of different prediction methods and the measured results

3.2 二次噪声预测

从振动测量的结果来看,离地铁线路越近,楼层越低的测点振动级越大,对应最大的二次噪声级也会相应位于低楼层,现对最靠近地铁线的特色酒店端部跨度框架进行二次辐射噪声分布的仿真预测,结果如图 5 所示。

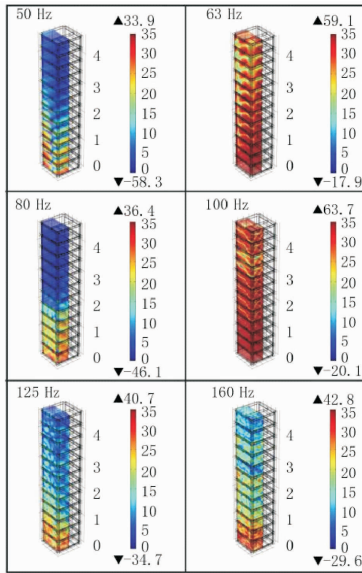


图 5 最不利跨度的二次辐射噪声分布

Fig. 5 Secondary radiated noise distribution of the most adverse span

仿真预测结果表明,A 计权声压级随楼层的变化和频率的不同而变化,没有明显的一致性。当 50 Hz 时,5 层及 5 层以下的声压明显出现了波峰和波节,局部有超过 30 dBA 的可能,而到了 5 层以上,A 计权声压级可以忽略不计。80 Hz 的情况与 50 Hz 相差不大,也是 5

层以上的 A 计权声压级很小。125 Hz 及 160 Hz 的情况主要影响在 3 层以下,可以认为是由于随着频率的升高,沿着高度的方向衰减较快造成的。从模拟仿真中发现,63 Hz 及 100 Hz 的垂直影响范围非常大,几乎所有楼层都一样,显然在合成二次噪声总声压级时,这两个频率分量的声压级是主要成分,可以认为其他频率的分布都不太重要。进一步分析 63 Hz 及 100 Hz 的声压级如此大的原因,从振动理论和声学理论可知,应该是这两个频率的振动与楼板、墙体、幕墙或者空气中的某些构件产生了很强的耦合,产生共振的效应,从而辐射过量的可听声。但是究竟是哪个构件产生的共振需要建立更精确的模型才能解释。为此,可以着重分析在 63 Hz 和 100 Hz 的激励下,分户墙、楼板和幕墙 3 种基本构件的振级分别是多少,只要找到这两个频段的主要振动源,就能有效地减低 A 计权总声压级。

为了找到这个振动源,本研究对二次辐射噪声的贡献量进行分析。已知建筑构件的共振频率与密度、刚度、尺寸以及边界条件都有关系,一般说来,轻质构件共振频率较高,重型构件共振频率较低。酒店客房中主要的建筑构件为分户墙、楼板和幕墙 3 种,因此,在声学仿真过程中对 3 种构件进行参数化扫描,扫描的参数分别为厚度和阻尼,见表 3。

参数化扫描的结果如图 6 所示,无论在任何厚度和阻尼的影响下,在 63 Hz 的时候,分户墙和幕墙的平均振级比楼板的小 10 dB 以上,而 100 Hz 的时候,幕墙的平均振级比其他二者高 10 dB 以上,所以判断是 63 Hz 的激励引起了楼板的共振,100 Hz 的激励引起了幕墙的共振(楼板的质量相比幕墙更重,因此共振频率更低)。

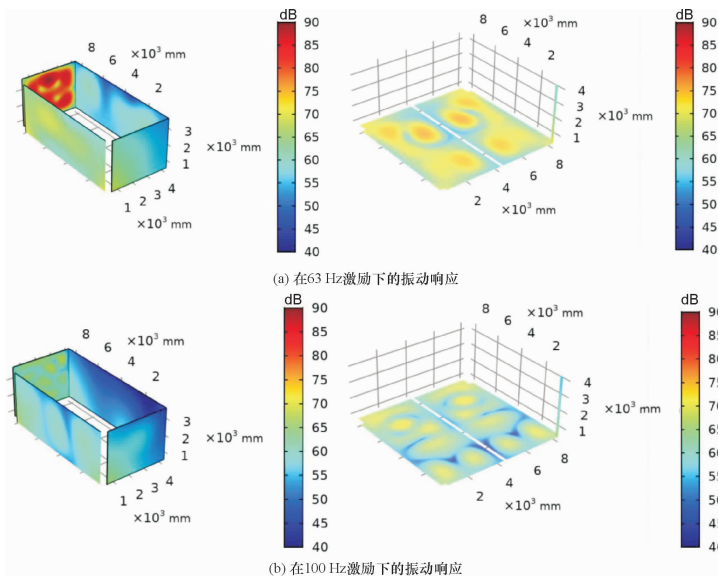


图 6 分户墙、楼板和幕墙在不同激励下的振动响应

Fig. 6 Vibration response of household wall, floor slab and curtain wall under stimulation of 63 Hz and 100 Hz

具体分析声场分布时,可以看到 63 Hz 及 100 Hz 的声压级分布呈现典型的驻波特性,从 1.5 m 截面的分布数据发现波峰和波节的明显分界线,如图 7 和图 8 所

示,这说明构件的振动与房间的声振动共振,也就是说产生了房间声共振的情况。

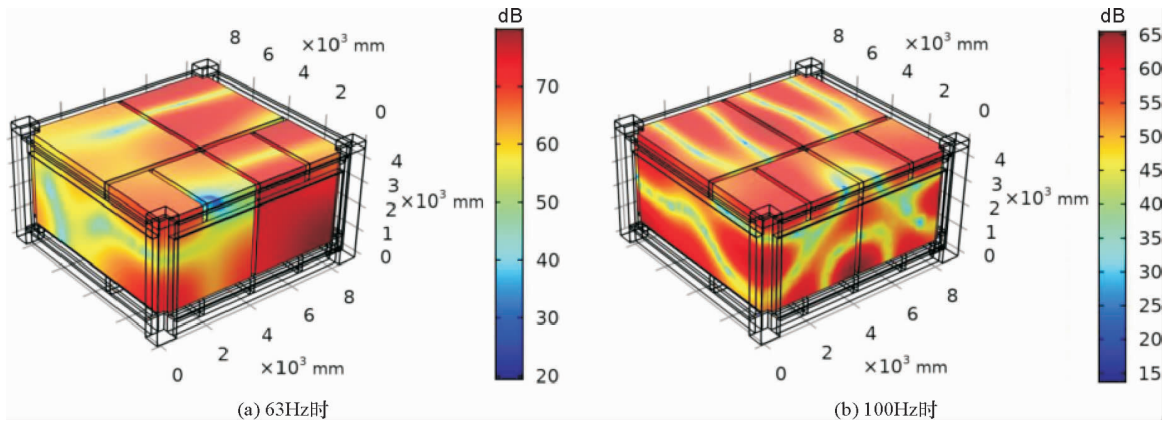


图 7 63 Hz 和 100 Hz 在室内二次噪声分布

Fig. 7 Distribution of indoor secondary noise at 63 Hz and 100 Hz

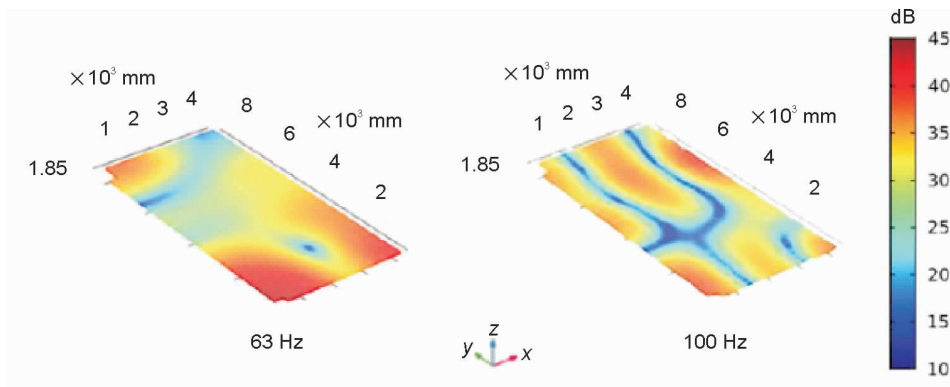


图 8 63 Hz 和 100 Hz 在 1.5 m 截面的二次噪声分布

Fig. 8 Secondary noise distribution of 1.5 m cross section at 63 Hz and 100 Hz

## 4 噪声控制措施

### 4.1 可行性分析

本研究实施的声学仿真表明,噪声超标主要由楼板在 63 Hz 共振和幕墙玻璃在 100 Hz 共振造成,其他频率噪声分量的贡献量并不大,而且在针对性地处理这两个频率的噪声级时,其他频率的噪声也有一定的衰减,因此判断只要把 63 Hz 和 100 Hz 的噪声降下来,总体也会相应达标。

对于减振降噪控制,不管声源或振源如何,对于其导致的室内噪声控制已有成熟的理论体系和应用体系,常用的方案包括构筑隔振沟、增大楼板阻尼和刚度、设置楼板隔振系统和增加室内吸声量等,各类措施的减振效果如表 4 所示。

表 4 声振控制方案对比

Table 4 Comparison of the acoustic vibration control schemes

方案	减振效果/dB	施工难度
轨道减振	6~8	需要与地铁公司协调施工,必要时可能影响地铁运营
浮置道床	12~15	需要与地铁公司协调施工,必要时可能影响地铁运营
减振		
隔振沟(墙)	3~5	沟槽已存在,只是回填时使用轻质的 XPS 填充
结构柱减振支座	2~5	梁柱已经建好,要切断结构柱加减振支座,相当困难
增大楼板刚度	1~2	所有楼板已经建好,额外增加刚度会影响承重,无法进行
增大楼板阻尼	1~2	原来的室内声学处理措施已经包含了阻尼层
设置浮筑楼板	1~2	原来的室内声学处理措施已经包含了阻尼层
增加室内吸声量	1~2	原来的室内装饰已经包含了厚重的窗帘,具有良好的吸声作用

本项目在建设前期主动采取了重型筏板地基、地下隔振墙和浮筑楼板等一系列处理措施,为当前的减振降噪工作争取到一定的主动权。从降低源强的角度看,63 Hz 及 100 Hz 的振动属于高频振动,而且临近的地铁线路采用了浅埋的方式,采用隔振沟是一个因地制宜的方法,这是因为浅埋地铁产生的环境振动中,表面波占主要地位,其中,瑞利波占比近 67%、S 波占比 26%、P 波占比 7%,而隔振沟的深度直接影响瑞利波的传播效率<sup>[24]</sup>。而且在进行本研究时,刚好处于基础泥土回填的阶段,也就不必深挖一条明沟,在施工难度和施工成本方面均有优势。根据世界各国的研究,采用足够深度的隔振沟,可以获得 2~3 dB 的隔振量。因此,本项目应优先采用隔振沟的方式,如果需要进一步降噪,还可以采用增加室内吸声等办法。

#### 4.2 隔振沟方案模拟

对本项目拟采用的隔振沟的多种组合进行隔振效果仿真分析,建模如图 9 所示。

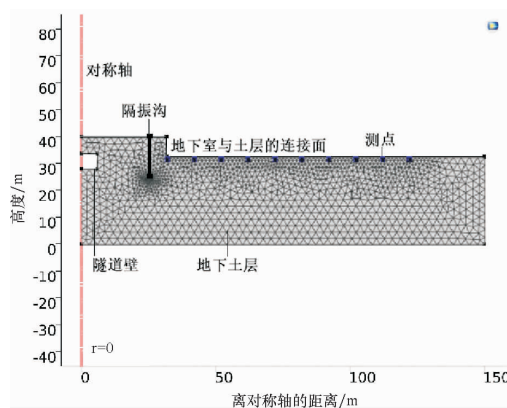


图 9 各测点与主要连接面的位置关系及网格剖分示意  
Fig. 9 The position relation and mesh division between each measuring point and the main connecting surface

根据前期的仿真和测量结果,63 Hz 和 100 Hz 时地铁引致的振动加速度级最大,因此,加速度频率可以取 63 Hz 也可以取 100 Hz,在本文中模拟的边界加速度频率设为 100 Hz,仿真时加速度的幅值设为 1 m/s,仿真得到结果的绝对值是无意义的,不能反映真实的情况,需要参考的是相对结果,即各个测点在无隔振沟的加速度值与存在不同隔振沟情况下的加速度值之差。这个相对值反映的是隔振沟的隔振性能,是隔振沟固有的物理特性,不会随着初始条件的改变而改变。

研究中设置 10 个测点,每个测点距离地下室的侧壁距离为 10 m 的整数倍,首先,选择 15 m 深度的隔振沟,模拟隔振沟离地下室侧壁 1 m、6 m 和 11 m 时的隔振情况,见图 10。

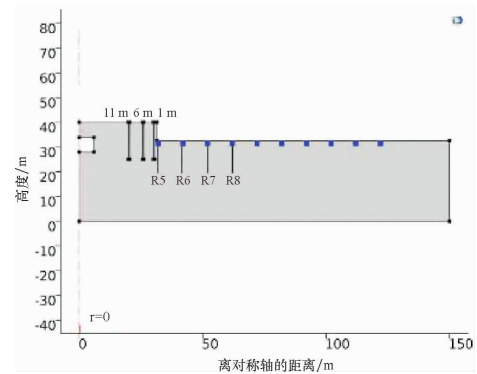


图 10 隔振沟离地下室 1 m、6 m 和 11 m 示意图  
Fig. 10 The vibration isolation ditch is 1 m, 6 m and 11 m respectively away from the basement

另外,本文还模拟了隔振沟距离地下室外墙 1 m 时,15 m、12 m、9 m 和 6 m 4 种不同深度变化对隔振能力的影响,4 种隔振沟的宽度均为 0.6 m,并与无隔振沟的情况做对比,此相对比较值即为隔振沟的隔声能力,仿真数据结果如图 11 所示。

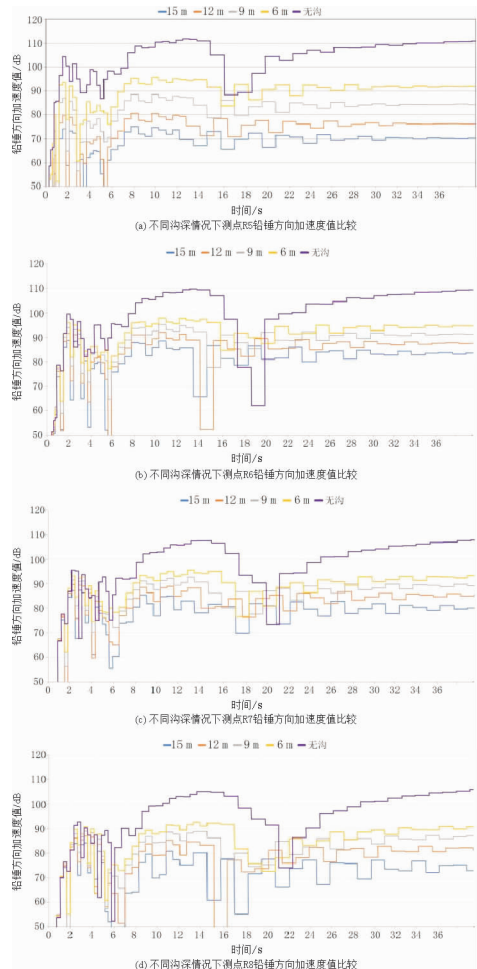


图 11 测点 R5 ~ R8 在不同深度的情况下的加速度级  
Fig. 11 Acceleration levels of measurement points R5 ~ R8 at different depths

模拟结果表明:①深度越深,隔振效果越好,大约是3 m的增量可以提高2~3 dB的隔声能力;②与无隔振沟的情况相比,即使是6 m的隔振沟的隔声能力也高达5~8 dB;③9 m深度的隔振沟隔声能力可达8~11 dB。值得注意的是,目前模拟的情况与真实情况还是有所区别,例如隔振沟不太可能是完全空洞的,里面总有横向支撑的构件,这些都是削弱隔振能力,同时本次仿真也没有考虑剪切波及体波在不同土层之间的反射,因此算出来的隔振能力可能偏高。

如果遇到地下土层较硬,难以挖掘较深的沟槽,可以利用双重隔振沟来弥补单个隔振沟深度不够的问题。图12仿真了双重沟的隔振效果,结果表明:①相距10 m的双隔振沟比相距5 m的双隔振沟效果更好,大约提升了3~5 dB;②当两个深度为9 m的隔振沟相距10 m时,它的隔振效果与12 m深的单沟隔振效果相当,大约有12~13 dB的隔振能力。

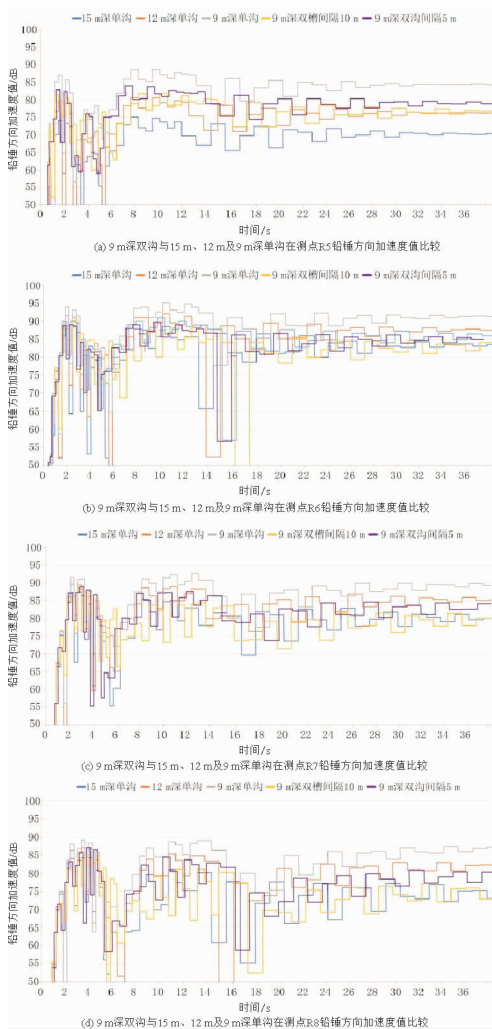


图12 测点 R5 ~ R8 双重隔振沟情况下的加速度级  
 Fig. 12 Acceleration levels of measurement points R5 ~ R8 under the condition of double vibration isolation ditch

### 4.3 实施过程与降噪效果

通过对云珠酒店声场的声振耦合仿真分析,采用的减振降噪方法最终确定如下:①为整个酒店群的建筑设置6 m深度的减振沟;②每个房间的玻璃幕墙必须通过在幕墙与墙体的连接螺栓处施加减振措施来实现减振效果,采用了具有弹性的一平垫一弹垫的挂载方法,如图13所示;③在地板的减振方面,采用了在原有楼板的基础上增加约束阻尼层的做法,其中,阻尼层由5 mm的复合隔振垫提供,约束层由40 mm的加筋水泥砂浆提供,尽管此构造最初是用来解决楼板撞击噪声的,但从降低楼板二次辐射噪声的效率来说同样有效;④6层以下的低楼层还考虑了室内吸声降噪的方法,增加了63 Hz和100 Hz的吸声构造,用于控制混响声,主要的方法是通过打褶程度超过200%的厚重棉布作为窗帘,提供低频的吸声。



图13 幕墙减振措施示意图  
 Fig. 13 Curtain wall vibration reduction measures

在云珠酒店的室内装修工程完工后,笔者依照《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准 (GB50355 - 2018)》<sup>[25]</sup>在列车经过时进行了振动测量(在云珠酒店的北塔、南塔、四星酒店和特色酒店各选择两个房间进行实测,所选房间均为靠近地铁线路的不利位置),结果如表5所示,二次辐射结构噪声测量结果如表6所示,测量结果均与卧室一级限值进行对比。因为测量时22:00之后地铁的列车趟数较少,不满足夜间测量的条件,研究中采用了昼间时段的数据进行了对比。

表5 室内Z振级测量结果与限值比较(昼间)  
 Table 5 Comparison of indoor Z-vibration level measurement results and limit value (daytime)

测点位置	Z 振级/dB	测点位置	Z 振级/dB
北塔实测点 1	49	四星实测点 1	58
北塔实测点 2	48	四星实测点 2	61
南塔实测点 1	48	特色实测点 1	48
南塔实测点 2	49	特色实测点 2	49
限值	73	限值	73
备注	达标	备注	达标

表 6 室内二次辐射噪声与限值比较(昼间)  
Table 6 Comparison of indoor secondary radiated noise and limit value (daytime)

测点位置	二次辐射噪声/dB			
	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz
北塔实测点 1	40.8	33.3	29.1	20.6
北塔实测点 2	51.9	32.5	26.3	19.8
南塔实测点 1	41.1	34.6	26.6	20.7
南塔实测点 2	36.1	39.2	26.5	17.5
四星实测点 1	41.7	40.0	33.8	24.4
四星实测点 2	44.0	44.4	37.5	31.0
特色实测点 1	37.9	34.2	24.8	19.3
特色实测点 2	39.1	37.0	29.1	18.3
GB50355 限值	76.0	59.0	48.0	39.0
备注	达标	达标	达标	达标

从测量结果来看,本项目采用的模拟方法和工程措施均有效,降噪质量较高,前期预设标准是酒店房间满足卧室二级标准,最终的工程效果是优于卧室一级标准,基本达到了高级酒店对安静声环境的要求。

## 5 结 论

由于地铁运行引起的建筑物振动和二次辐射噪声

的影响因素较多,且过程比较复杂,如何选择最合适的减振降噪方法必须基于准确的预判及具有针对性的措施。尽管在模型的建立过程中不可避免地要做一些近似和简化,但除了数值法外,目前还没有别的办法可以全面而准确地模拟地铁周围大型项目的振动与二次辐射噪声。在使用数值法时,模型的物理场选择、物理边界设置、内部连接条件设置和初始值设置都至关重要。在模型确定后,预测的结果应该在某些特定点与实测值相吻合,并在大的趋势上与实测值保持一致。本文采用声学-固体边界声振耦合计算的有限元方法预测了广州市云珠酒店室内二次辐射噪声值,结果表明,典型的测点实测值与仿真值结果比较接近,除了 20~50 Hz 低频预测值比实测值稍小外,其他频段的一致性都比较好,误差在 3 dB 以内。本项目模拟得出的预测值与实测值的拟合程度要远优于传统模拟方法得出的预测值,因此,可以认为这种声振耦合分析的模拟仿真方法能够在类似的大型项目上推广使用。

本文的不足之处在于没有全面地考虑和分析由地铁运行引起的二次辐射噪声的影响因素,包括多种建筑结构的振动分布、建筑材料吸声属性、模型的精确度和房间长宽比等,在后续的研究中可以加入其他影响因素,进一步提高对二次辐射噪声预测的准确度。

## 参考文献:

- [1] Yang J J, Zhu S Y, Zhai W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 485-499.
- [2] Yu B Y, Wen L J, Bai J, et al. Effect of road and railway sound on psychological and physiological responses in an office environment[J]. Buildings, 2022, 12(6): 1-19.
- [3] Shimokura R, Soeta Y. Sound field characteristics of underground railway stations—Effect of interior materials and noise source positions[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(11): 1150-1158.
- [4] 迟义浩,张智海,王宏阁,等. 地铁车内及站台振动噪声测试分析[J]. 铁道建筑技术, 2021(10): 91-95.
- [5] 周杰,陈皓粤,汪益敏,等. 下沉式地铁车辆段环境噪声特性试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(7): 178-184.
- [6] 陈兆玮,徐鸿,尹镗,等. 地铁诱发 TOD 建筑群振动及二次噪声控制[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版)(2022-08-31)[2023-06-13]. <https://doi.org/10.13245/j.hust.239404>.
- [7] 申道明,张来栋,薛松涛. 地铁引起二次噪声特性及评价量实测与探讨[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 133-138.
- [8] 康波. 地铁上方建筑物振动及二次辐射噪声辐射分析[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [9] Konstantinos V. Ground borne noise and vibration assessment from metro operation in the new athens metro extension to piraus[J]. Recent Research in Applied Mechanics, 2010, 78(7): 75-83.
- [10] 郝影,李宪同,张朋. 城市轨道交通地下线运行对沿线建筑物室内振动与噪声的影响分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(11): 1429-1433.
- [11] Augusztinovicz F, Fürjes A T, Márki F. Prediction of noise of the stations of the new Budapest metro line M4[C]//Proceedings of ISMA 2014 Including USD 2014, Katholieke Univ Leuven, Dept Werktuigkunde: HEVERLEE, 2014: 3413-3428.
- [12] Shahidan S, Hannan N, Maarof M Z M, et al. A comprehensive review on the effectiveness of existing noise barriers commonly used in the railway industry[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 87: 01007.
- [13] Currey M N, Cunefare K A. The radiation modes of baffled finite plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 98(3): 1570-1580.