



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

地铁运行引起建筑物室内振动  
与辐射噪声研究

姓 名：赵伟屹

学 号：0920020363

所在院系：土木工程学院

学科门类：土木工程

学科专业：风工程

指导教师：薛松涛 教授

副指导教师：唐和生 副教授

二〇一二年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Science

**Study on Ground-borne Vibration  
and Noise in Buildings  
Induced by Underground Railways**

Candidate: Zhao Weiyi

Student Number: 0920020363

School/Department: Civil Engineering Department

Discipline: Civil Engineering

Major: Wind Engineering

Supervisor: Prof. Xue Songtao

Associate Prof. Tang Hesheng

March, 2012

地铁运行引起建筑物室内振动与辐射噪声研究

赵伟屹

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘要

地铁已经成为全世界许多城市的一个重要的交通工具，然而地铁运行引起的建筑物振动以及由振动产生的二次辐射噪声，对地面居民的生活产生了很大的影响；同时，振动与噪声已经被列入“世界七大公害”。因此，地铁引起建筑物振动与噪声的研究受到了工程界的广泛关注。

本文针对地铁沿线建筑物室内振动与二次辐射噪声问题，采用数值方法建立了建筑物有限元模型与建筑物室内声学边界元模型，研究建筑物振动与二次辐射噪声规律；同时，结合工程实测数据，对数值模拟结果进行比较研究；最后，对地铁常用的三种轨道支承结构的减振降噪效果进行对比分析。研究主要工作包括以下几个方面：

(1) 简要回顾了地铁引起建筑物室内振动与辐射噪声的研究现状，对该领域存在的主要问题进行了总结。

(2) 介绍结构声学基本理论，并对各国地铁引起的建筑物室内噪声的评价方法与标准进行归纳比较。

(3) 应用建筑物地面振动实测加速度作为输入，建立结构三维有限元分析模型，对结构的楼面与墙面的振动特性进行时程与频谱分析，并将数值模拟得到的结构响应与实测数据进行比较。

(4) 运用声学软件 Virtual. Lab 建立建筑物室内声学边界元数值模型，以建筑物表面振动响应作为边界条件，采用间接边界元法分析了室内二次辐射噪声响应及其空间分布特性，并与实测点声压进行比较。

(5) 对地铁常用的三种轨道支承下地铁运行引起的建筑物室内振动与辐射噪声进行数值模拟分析，并对其进行减振降噪效果比较分析。

**关键词：**地铁，室内振动，二次辐射噪声，轨道支承，声场

## ABSTRACT

Metro has become one of the most important transports because of its convenience. At the same time, it has also brought some environmental problems, such as ground-borne vibration and noise. Besides, vibration and noise have been included in the ‘world seven major public pollution’. Therefore, the study of the ground-borne vibration and noise induced by metro has received extensive attention of engineers.

On the purpose of studying on ground-borne vibration and noise in buildings induced by underground railways, the FEM and BEM models are used to simulate vibration and noise of a building respectively in this paper. At the same time, the results calculated by these models are compared with the experimental data. The vibration and noise of three kinds of rail bearing systems performances are also investigated. The research work involves the following aspects:

(1) The vibration and noise induced in buildings by the metro are briefly reviewed, and the main problems of this area are summarized.

(2) The basic theory of structure-acoustic is introduced, and the noise evaluations and standards in different countries are generalized and compared.

(3) Using the ground in-situ measurement acceleration as input, a 3-D finite element model of a structure is established. The vibration of floor and wall are simulated, and calculated results are compared with the experimental data.

(4) An acoustic BEM model using the vibration response on the structure surface as boundary conditions is established by the acoustic software Virtual.Lab. The ground-borne noise in a building is simulated, and calculated results are compared with the experimental data.

(5) The ground-borne vibration and noise in buildings induced by underground railways of three kinds of rail bearing systems are simulated. A comparative analysis on the vibration and noise reduction performances of the three kinds of rail bearing systems is presented.

**Key Words:** Metro, Ground-borne vibration, Ground-borne Noise, Rail bearing system, Sound field

## 目录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 摘要 .....                           | I  |
| 第一章 绪论 .....                       | 1  |
| 1.1 引言.....                        | 1  |
| 1.2 研究现状.....                      | 3  |
| 1.2.1 地铁引起建筑物振动的研究 .....           | 3  |
| 1.2.2 地铁引起建筑物二次辐射噪声的研究 .....       | 5  |
| 1.2.3 建筑物减振降噪措施 .....              | 7  |
| 1.3 目前研究存在的问题.....                 | 8  |
| 1.4 本文的主要工作.....                   | 9  |
| 第二章 建筑物室内辐射噪声基本理论与评价标准 .....       | 11 |
| 2.1 结构声学基本量与声学 Helmholtz 波动方程..... | 11 |
| 2.1.1 声学基本物理量 .....                | 11 |
| 2.1.2 声学 Helmholtz 波动方程 .....      | 12 |
| 2.1.3 声场边界条件 .....                 | 15 |
| 2.2 结构-声学计算方法.....                 | 16 |
| 2.2.1 声学有限元法 .....                 | 16 |
| 2.2.2 声学边界元法 .....                 | 17 |
| 2.3 环境噪声控制标准.....                  | 18 |
| 2.3.1 计权声压级 .....                  | 18 |
| 2.3.2 各国噪声测试标准 .....               | 19 |
| 第三章 地铁运行引起建筑物室内振动数值分析 .....        | 22 |
| 3.1 引言.....                        | 22 |
| 3.2 地面振动实测基本条件.....                | 22 |
| 3.3 地铁引起建筑物振动的有限元模型分析.....         | 23 |
| 3.3.1 有限元模型 .....                  | 23 |
| 3.3.2 结构自振频率与模态 .....              | 24 |
| 3.3.3 地面加速度激振 .....                | 26 |
| 3.3.4 建筑物振动特性 .....                | 27 |
| 3.4 有限元模型分析与实测结果比较.....            | 36 |
| 3.4.1 时程比较 .....                   | 36 |
| 3.4.2 频谱比较 .....                   | 37 |
| 3.4.3 三分之一倍频程分析与实测结果比较 .....       | 38 |
| 3.4.4 计算结果振级比较 .....               | 40 |
| 3.5 本章小结.....                      | 41 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第四章 地铁运行引起建筑物室内辐射噪声数值分析 .....    | 42 |
| 4.1 引言.....                      | 42 |
| 4.2 室内二次辐射噪声实测基本条件.....          | 42 |
| 4.3 地铁引起室内二次辐射噪声数值模拟分析.....      | 43 |
| 4.3.1 Virtual. Lab 室内声场分析模型..... | 43 |
| 4.3.2 声场的声频率与声模态 .....           | 45 |
| 4.3.3 声场速度边界条件 .....             | 46 |
| 4.3.4 建筑物室内声学响应分析 .....          | 48 |
| 4.4 数值模拟分析与实测结果比较.....           | 52 |
| 4.4.1 三分之一倍频程比较 .....            | 52 |
| 4.4.2 等效连续声级比较 .....             | 53 |
| 4.5 本章小结.....                    | 53 |
| 第五章 不同轨道支承减振降噪性能比较分析 .....       | 54 |
| 5.1 三种轨道支承形式.....                | 54 |
| 5.1.1 DTIII-2 型扣件 .....          | 54 |
| 5.1.2 弹性支承块结构 .....              | 55 |
| 5.1.3 先锋扣件 .....                 | 55 |
| 5.2 三种轨道支承减振效果分析.....            | 56 |
| 5.2.1 三种扣件下实测地面振动比较 .....        | 56 |
| 5.2.2 三种扣件下建筑物室内振动数值模拟结果比较 ..... | 58 |
| 5.3 三种轨道支承降噪效果分析.....            | 60 |
| 5.3.1 三种扣件下各楼层三分之一倍频程比较 .....    | 60 |
| 5.3.2 三种扣件下各楼层等效声级比较 .....       | 61 |
| 5.4 数值模拟与实测结果比较.....             | 62 |
| 5.4.1 建筑物室内振动结果比较 .....          | 62 |
| 5.4.2 建筑物室内辐射噪声结果比较 .....        | 64 |
| 5.5 本章小结.....                    | 66 |
| 第六章 结论与展望 .....                  | 67 |
| 6.1 本文工作总结.....                  | 67 |
| 6.2 展望.....                      | 67 |
| 致谢 .....                         | 69 |
| 参考文献 .....                       | 70 |
| 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 .....      | 73 |

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

从 1863 年伦敦为了解决交通堵塞，建设的第一条蒸汽地铁——伦敦大都会铁路开始。1890 年，第一条电气化地铁开通，地铁进入电力牵引时代。在 19 世纪相继出现了芝加哥、布达佩斯、格拉斯哥、维也纳、巴黎等城市开始修建铁路，地铁开始走入了人们的生活。1927 年日本第一条地铁线路建成通车，在修建地铁线路的同时，着重开发主要车站及其周围的公众聚集场所的措施，使地铁这一基础设施获得了新的活力，取得了良好的经济效益和社会反响。

中国从 1969 年建成第一条北京地铁之后，天津、上海以至全国各大城市都陆续开始了地铁修建的步伐。目前，中国地铁正进入成熟、繁荣的发展阶段。正在建设或已获得批复建设地铁的还有 23 个城市，分别是重庆、成都、乌鲁木齐、西安、郑州、宁波、沈阳、哈尔滨、苏州、杭州、无锡、南昌、长沙、广佛线、贵阳、昆明、泉州、东莞、澳门、南宁、合肥、青岛、福州。据给我国各城市地铁交通发展规划显示，至 2016 年我国将有 89 条新建地铁线路，总里程为 2500km，投资规模预计达 99373 亿元。

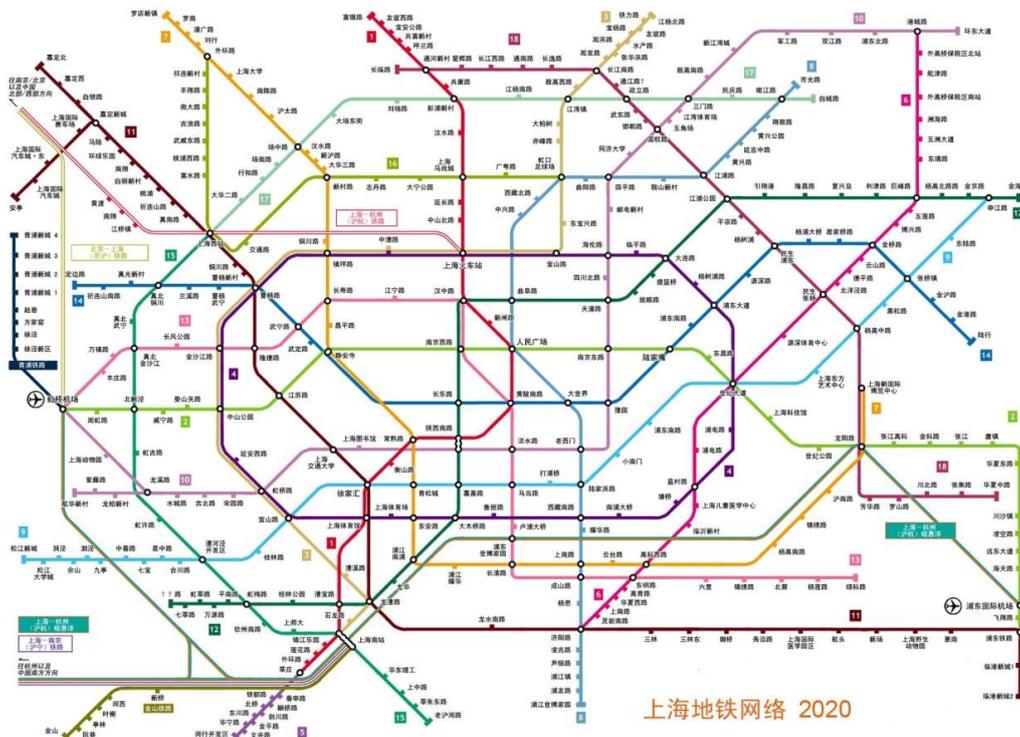


图1.1 2020年上海轨道交通规划图

由于城市地铁大多贯穿市中心，在负担城市运输的主要交通任务同时，也对沿线周围建筑物的居住环境产生影响，这是由于地铁车辆行驶会对地铁轨道和附近的道路和建筑物产生一定的振动。车辆引起的过度振动可能对沿线的建筑物造成破坏、影响沿线设置的敏感设备；当地铁在运行过程中，居民会受到地铁振动引起其上部建筑物的振动以及二次辐射噪声的影响。振动和环境噪声已被列入“世界七大公害”。

地铁运营导致建筑物的振动会对房屋结构产生一定的影响。长时间的振动会导致房屋结构产生不同程度的破坏。有些学者认为地铁运营引起的建筑物振动并不会达到结构的破坏程度；然而 Crocket<sup>[1]</sup>指出：由地铁运行产生的低频振动由于长时间对建筑物结构的影响，会导致结构的损伤。夏禾<sup>[2]</sup>通过试验指出，振动加速度级达到 65dB 时，将会轻微影响人们的睡眠；加速度级达到 79dB 时，所有睡眠的人将会被惊醒。同时，振动会影响人的视觉和精神集中度，影响人大脑的正常思维，干扰手动操作的准确性，使其操作质量、速度下降，甚至出现操作误差。

地铁引起的建筑物振动对人的影响与振动频率有关。随着振动的频率改变，所导致人的感受和病态特征发生变化。人体感知的振动频率范围为 1-1000Hz；对于环境振动，人体对频率为 1-80Hz 的振动感觉最为敏感。人体组织对于高频振动的阻尼很大，所以高频振动主要影响人体的接触部分。

地铁沿线的居民直接感受到的往往是由振动在建筑物内部产生二次辐射噪声。所谓二次辐射噪声，是指因建筑物基础振动导致地面、墙体、梁柱、门窗及室内家具等振动，使建筑物内产生辐射噪声，人们对二次辐射噪声的敏感程度远远高于空气噪声。

二次辐射噪声主要是由于房屋墙面与地面振动所产生的。地铁运营在房间内产生的辐射噪声以低频噪声为主，频率范围为 20-250Hz。研究表明<sup>[3]</sup>，人耳的听觉频率范围为 20-20kHz；人耳能感受到的最小声压幅值约为 20 $\mu$ Pa。而地铁引起的振动与噪声的幅值基本小于人耳的感知阈值 1kHz。当声音频率低于 200Hz 时，人耳能感受的最小声压幅值约为 70 $\mu$ Pa；当声音频率低于 70Hz 时，人耳能感受的最小声压幅值约为 0.5mPa。英国伦敦地铁公司在《关于噪声与振动备忘录》中指出，当  $L_{max}(A)>45dB$  时，居民对建筑物内二次结构噪声有较大的主观感觉；在我国，《城市区域环境振动标准》规定：居民、文教区铅垂向 Z 振级标准值限值昼间为 70dB、夜间为 67 dB，交通干线道路两侧铅垂向 Z 振级标准值限值昼间为 75 dB、夜间为 72 dB。

由于二次噪声频率、低持续时间长，会使居民感到烦躁。已有学者以烦恼度来区分这种影响的大小；同时，对于音乐厅、剧院以及学校等对噪声要求较高的

场所，二次辐射噪声的影响尤为严重。因此，地铁对环境的影响越来越受各国政府、铁路运输部门、科研机构、高校的关注和重视。

国内的一些科研机构对地铁引起建筑物振动与二次辐射噪声理论分析还处于起步阶段。对于环境噪声的测试已经得到了一些成果，而这也是主要集中在地铁引起的地面振动研究或房屋辐射噪声测试，并没有直接以建筑物为研究对象进行辐射噪声研究，并与城市的交通轨道的环境评价进行比较研究。

关于地铁振动引起建筑物辐射噪声的研究方法主要可以概括为如下三方面：

(1) 理论分析方面。理论方面主要集中在房屋墙面与地面板的结构振动。通过声场有限元或边界元模型，根据墙面与屋面板节点处的激振，输入速度边界条件，进而分析室内声场分布，求得空间内分析点处的声场信息。

(2) 计算机数值模拟方面。计算机模拟研究一般做法是建立研究体系的声学模型，推导该室内声场的 Helmholtz 方程，采用数值方法，同时借用 SYSNOISE、Virtual Lab 等软件，求解模型的声场分布。其优点在于计算简化、分析效率高、较为通用和适于推广；缺点是精度不高，计算量大，计算时间长，所以，需要加以改进。

(3) 现场实测方面。即采用声压传感器等仪器对地铁引起的建筑物室内噪声进行现场实测，对此方面的研究有重大的理论和现实意义。但目前此研究较少，其成果主要为相应的理论分析提供根据、印证理论模型的正确性、为评估地铁诱发的建筑物辐射噪声提供依据。

总而言之，地铁引起建筑物结构振动是本文研究的起点；结构-声学理论是振动引起二次噪声研究的途径；结构的室内噪声声场分布是研究目标。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 地铁引起建筑物振动的研究

地铁引起建筑物振动是地铁对建筑物振动与噪声研究的前提和基础，具有重要意义。目前，地铁引起的建筑物振动的主要研究对象有建筑物地下土体与建筑物上部结构。

目前，对专门的评估振动对建筑物影响的标准研究较少，因此仅能根据已有的少量测试数据及相关标准较粗略地分析建筑物所受的影响，而且建筑物的振动与其自身基础、结构形式、质量等多方面因素有关，较为复杂。同时，轨道车辆振动的传播与土层介质有着密切关系，振动波的传播特性在不同地质条件的地区不尽相同。由于地基土有区域特殊性，在其他地区测试、分析的结果并不一

定符合实际情况,特别是该地区地质条件复杂,具有很强的多样性。关于这些问题,国内外学者进行了一定的现场实测与理论研究。

20世纪70年代,Kurzweil<sup>[4]</sup>和Nelson<sup>[5]</sup>提出用二维有限元对地铁隧道结构进行动力分析,进而研究地面振动。Dawn等<sup>[6]</sup>通过实测分析了建筑物振动与地下土壤条件的关系。刚性土壤下,地铁引起的建筑物振动较低,软性土壤下建筑物振动较高。土壤刚度增加,振动峰值对应的频率值增大。Jonsson<sup>[7]</sup>提出了列车运营引起轨道附近建筑物和地面振动的测试方法以及数值预测模型。

Ungar等<sup>[8]</sup>通过给定不同列车、轨道、隧道、建筑物类型的修正系数,来预测地铁引起的振动响应。G. Bornitz<sup>[9]</sup>提出了考虑几何阻尼和材料阻尼效应并结合土体实测参数(土的能量吸收系数或衰减系数)的地面振动衰减公式;1988年,Melke<sup>[10]</sup>将振源—传播途径—接收者这一系统参照电路阻抗模型来模拟,以代数的形式取代复杂的运动方程,建立了振动衰减公式。日本的Fujikake<sup>[11]</sup>和Hayakawa<sup>[12]</sup>等提出了分析轨道交通地面振动的预测方法,并采用弹性支撑块结构对轨道进行减振处理,到达控制地铁振动的目的。

此外,西班牙、捷克等国在这些方面也做了大量的测试、调查和研究工作,通过对振动测试结果统计,分析了列车引起的地面振动的传播特性,并从降低行车速度、减轻荷载重量、提高路面平整度等方面提出了减少振害的措施。

对于地下土体振动的研究,我国已经进行取得了一定成果。1969年,北京建成了中国第一条地铁路线后,北京市环境保护监测中心的王毅<sup>[13][14]</sup>调查研究了北京地下铁道振动对环境的影响,并专门分析了地铁车辆段平台居住小区的振动影响。广州地铁建成后,徐忠根等<sup>[15]</sup>也对广州市地铁一号线振动传播对环境的影响做了测定与分析,得出了振动传播公式。关于地铁运行引起房屋的振动,曹国辉,方志<sup>[16]</sup>等布置了测点进行测试,查明地铁与噪声对住户健康舒适度的影响程度,并分析了地铁振动对房屋结构安全的影响。茅玉泉<sup>[17]</sup>通过大量的实验,研究了交通荷载在运行过程中引起的地面振动特性和衰减,采用数理统计的复合回归方法,探讨了振动的衰减规律,获得地面垂直和水平振动衰减的经验公式。通过对地铁振动机理的分析可知,建筑物对地铁振动的响应与车辆特性,轨道条件,隧道结构,地基特性,建筑物结构等因素有关。田春芝<sup>[18]</sup>、彭胜群<sup>[19]</sup>以及夏禾等<sup>[20]</sup>通过对实测数据进行对比分析和工作总结,得到了各因素对振动的影响规律,进而得到了一整套的减振隔振措施。现场测试的方法简单实用,针对性很强,但是通用性较差。

在我国,王逢朝等<sup>[21]</sup>分析了不同高度的框架结构受地铁振动的影响,地铁振动对建筑物影响跟楼层有关,底层建筑影响较大,高层建筑影响较小。洪俊青等<sup>[22]</sup>建立了土层系统-建筑物二维共同作用有限元模型,从地铁列车荷载频谱特征

和场地土层类型角度分析地铁对建筑物振动影响,并对土与结构两方面的振动特性进行比较分析:在同一频率地铁振动荷载影响下,同一建筑物各楼层振动响应水平基本相同,上部楼层的振动仅比下部楼层振动有小幅上升;地铁低频段荷载对建筑物振动的影响大于高频段荷载的影响;不同类型土层上建筑物的振动响应规律基本相同。

周裕德等<sup>[23]</sup>结合上海音乐厅移位的实际工程,采用类比调查法在地铁线路附近测试了有无地铁通过时的振级和相似建筑物的响应,并对迁址后音乐厅的振动和二次噪声进行了预测

冯青松,雷晓燕等<sup>[24]</sup>建立了隧道—土层—建筑物有限元模型分析了低频范围内不同车速下建筑物不同楼层的振动规律。分析结果表明:随着车速提高,建筑物各楼层振动水平呈线性增长,速度每增加20km/h,振动加速度级增加2-4dB;建筑物各楼层的振动水平相差较小。

楼梦麟,李守继<sup>[25]</sup>通过建立上部结构刚性模型,利用现场实测地面振动加速度激励,对建筑物振动进行评价研究。研究表明:7层框架结构,地铁引起房屋振动在40-80Hz频率范围内振动响应较大,已超过国家标准限值;降低振源40-80Hz范围内能量可以有效控制建筑物振动。

## 1.2.2 地铁引起建筑物二次辐射噪声的研究

目前,国内外的研究主要集中在对地铁环境振动传播、预测和减振的研究,对于轨道交通诱发建筑物的二次振动噪声的研究相对较少,没有得到更多的重视。随着城市地铁网的不断扩展,地铁列车速度的不断提升,而人们对生活质量的要求越来越高,现在对于同样的振动和噪声,越来越多地引起公众的强烈反映和抱怨。

由于建筑物内二次噪声与地铁列车振动传播的诸多影响因素有关,而地铁环境振动又是横波、纵波、表面波合成的复杂波动现象,其振动机理、传播形态受各种复杂因素影响。研究结果表明<sup>[26][27]</sup>:影响地铁列车振动传播的影响因素包括地铁车辆条件、轨道线路状况、地基地质条件、建筑物距地铁线路距离、建筑物特性等,其中影响建筑物内的二次结构噪声的建筑物特性与建筑物整体质量刚度、地板质量刚度、质量分布、材料阻尼、地板和墙壁尺寸、建筑物内表面吸声条件、二次辐射噪声效率等参数有关,使二次噪声的预测比空气噪声复杂的多。

地铁运行产生的振动会通过空气和土体传播到邻近的建筑物,使建筑物楼板和墙体发生振动,室内的空气受周围结构的振动激励,会在建筑物内产生二次辐射噪声。

地铁产生的噪声主要分为两类：空气噪声与结构噪声。空气噪声包括轮轨系统噪声、动力系统噪声与空气动力噪声。我国地铁列车运行速度一般在60-80km/h，试验表明<sup>[28]</sup>：车速位于60-200km/h轮轨噪声在空气噪声中起控制作用，故空气噪声主要声源为车轮与轨道撞击摩擦产生的轮轨噪声。结构噪声是指地铁产生的振动通过轨下基础向周围传播，引发地铁周边环境和建筑的振动，进而导致周围地下结构及地面建筑物结构的二次辐射噪声。

对于这两种噪声，空气声是比较容易控制的。这是因为空气声主要集中在地铁车辆与轨道等位置，声源相对集中，可以控制声源或者在噪声传播路径上设置声屏障，以达到降噪的目的。但是，结构噪声的控制比较困难，因为结构噪声产生的声源分散，而且结构声通过建筑物主体结构以及装饰材料在室内传播，加上结构声在室内的混响效应。同时，结构噪声主要属于低频噪声，严重干扰居民的工作与生活。对结构噪声进行有效的理论和数值分析是控制地铁噪声的理论基础。

目前，国内外对轨道交通运行引起二次辐射噪声问题主要采用理论分析与现场实测相结合的方法。Edwards<sup>[29]</sup>对伦敦56000户地铁附近的居民进行测试研究表明：地铁经过时，绝大多数居民房间的二次辐射噪声超过40dB（A），少数居民房间的二次噪声超过60dB（A）。Walker<sup>[30]</sup>指出，地铁引起结构二次辐射噪声主要集中在2-200Hz的低频段；最大噪声A计权声级位于42-69dB范围内，分析的噪声持续时间为10s，其中噪声的增长率为4-15dB/s，衰减率为1-15dB/s之间。

Fiala等<sup>[31]</sup>利用有限元与边界元混合法分析地铁引起建筑物的二次噪声。通过建立轨道-隧道-土体的三维模型分析结构振动，进而使用声场有限元分析二次噪声，分析表明，房间尺寸对二次噪声的影响很大；二次噪声的频谱峰值对应的频率主要取决于房间的第一阶固有频率；对于三层混凝土框架结构峰值点对应的频率在60-80Hz范围内。

A.B. Nagy等<sup>[32]</sup>使用有限元结合瑞雷积分方法，瑞雷积分法基于瑞雷积分结合空间声学模型，使用空间的振动和几何数据，很容易与有限元模性结合，这里不需要散射效率。与边界元模型相比较，描述声场的矩阵比较小，数值计算相对简便，不需要对声场矩阵求逆。

Kurzweil<sup>[4]</sup>对地铁沿线建筑物室内振动与噪声的实测数据加以分析，得出了建筑物室内二次噪声的预测公式：

$$L_{pr} = L_{ar} - 20 \lg f + 37 \quad (1.1)$$

式中， $L_{pr}$ 为地铁隧道上部建筑物室内声压级（dB）； $L_{ar}$ 为地铁列车通过时地铁隧道上部建筑物地板的垂向加速度级； $f$ 为倍频程或1/3倍频程的中心频率。

马筠<sup>[33]</sup>采用式噪声预测公式式(1.1)对地铁运行引起的临近建筑物内结构噪

声的影响进行分析,并与现场实测结果进行比较。结果表明:地铁隧道上部建筑物内的结构噪声,与地铁列车通过时地铁隧道上部建筑物地板的振动加速度级、地铁隧道壁面产生的对应不同频带下的加速度级、大地传播振动时的振动衰减以及隧道外墙壁到敏感建筑的最近距离、倍频程中心频率和建筑物内的振动衰减程度等因素有关;根据北京、上海等城市地铁上方建筑物内结构噪声实测结果和预测计算结果比较,二者之间的误差不大于2dB。

辜小安,刘扬<sup>[34]</sup>通过噪声实测,比较车辆类型、车速与轨道条件等不同因素,提出了适合我国城市轨道交通列车运行的噪声预测模式。采用该模式计算得到的与测试,经北京、广州地铁地面实测结构验证,误差在1.6dB范围内。

统计能量法(SEA)是分析二次辐射噪声的方法之一,其基本原理是能量守恒。它是基于很粗糙的墙体振动数据,如均方振级,SEA方法简单的分析公式源于使用墙体的散射效率作为输入,但散射效率在低频范围内变化很快,很难决定其值的大小,使得这种方法的使用限于中高频振动。刘枫<sup>[35]</sup>使用该方法并结合机械工程中的辐射比概念估算高架车站的二次辐射噪声,建立了结构振动与噪声之间的关系,提出一种快速估算结构声的方法,并以此作为结构设计和选材的参考;同时,对不同结构形式、不同材料、是否采用用橡胶支座等条件,比较分析了高架车站结构的振动与二次辐射噪声的情况。

### 1.2.3 建筑物减振降噪措施

因为建筑物结构噪声主要是由结构振动控制,故对建筑物减振降噪主要是减小地铁对建筑物的振动影响。地铁的振动传播过程分为振源、传播路径和振动接受三个部分。地铁减振降噪措施,主要从以上三个方面控制:降低振源的激振强度、切断或削弱传播途径上的振动以及对减振降噪对象经行隔振等方面。

#### (1) 振源

振源最大振动强度由车辆—轨道系统共振频率比值决定,该比值取决于列车速度。地铁隧道振动的峰值一般出现在40-80Hz,传播至建筑物内的振动主要以低频为主。当 $f \leq 20\text{Hz}$ 时振动衰减较低,导致地铁列车振动峰值频率集中在低频区。

振源主要从机车与轨道等方面控制。对机车车辆可以采取的减振措施有:车辆轻型化、径向转向架、合理的车轴配置、车辆弹性悬挂系统、弹性车轮、阻尼车轮、车轮踏面打磨以及新型机车车辆的研制等。在轨道方面采取的减振措施通常有:钢轨打磨和涂油、钢轨粘贴阻尼材料、无缝钢轨、各种类型的弹性扣件、弹性轨枕、弹性支承块轨道、钢弹簧浮置板轨道、橡胶浮置板轨道、梯形轨道、

CDM预制轨道、Hlso轨道等。不同的轨道减振措施，其工作频率和减振量的大小是不同的。高飞，夏禾等<sup>[36]</sup>对北京地铁5号线高架结构的辐射噪声进行现场实测并建立噪声预测模型；分析表明：梯形轨枕轨道具有良好的减振降噪作用，低频处的振动加速度最大值可降低70%，二次辐射噪声可降低2.4dB。

(2) 传播路径

在地基中，振动传播的路径上设置屏障。屏障可分两种连续屏障（如空沟、填充沟、混凝土连续墙、组合隔振屏障等）与非连续屏障（如排桩、孔列等）。此外，Takemiya<sup>[37]</sup>提出：可以设置波阻块(Wave Impeding Block, WIB)，进行地铁减振。通过设置声屏障，也可以有效的控制地铁空气噪声的传播。

(3) 振动接收

地铁引起房屋振动与房屋结构类型、质量与基础刚度等因素有关。目前，对房屋减振的有效手段一般是改善建筑物的地基基础。试验研究：地基刚度越大，建筑物内振动与噪声越小。对于不同结构类型，彭胜群<sup>[38]</sup>提出对各类建筑物的振动响应修正：

表1.1 建筑物类型振动修正

| 建筑物分类 | 建筑物结构类型及特性                  | 振动修正值 (dB) |
|-------|-----------------------------|------------|
| I     | 基础良好框架结构建筑（高层建筑）            | -3-0       |
| II    | 基础一般砖混、砖木结构建筑（中层或质量较好的底层建筑） | 0-6        |
| III   | 基础较差轻质、老旧房屋（质量较差的底层或简易临时建筑） | 6-12       |

### 1.3 目前研究存在的问题

关于地铁运行引起建筑物振动与二次噪声问题，国内外许多学者做了很多工作，但由于问题的复杂性，仍然有许多问题值得探讨：

(1) 地铁引起振动在建筑物中的传播规律问题。目前，对地铁振动问题的研究主要集中在环境振动预测方法。由于现场实测的振动数据较少、有限元分析模型还不够完善等问题，对建筑物在地铁振动激励下，结构体系的振动规律亟待系统研究。

(2) 建筑物二次辐射噪声问题。一方面，国内对地铁引起的二次噪声研究相对较少，主要着重于高架轨道噪声的研究<sup>[39][40]</sup>，一般室内二次辐射噪声预测

普遍采用经验预测计算公式<sup>[4]</sup>。目前为止，我国还没有城市轨道交通工程的噪声环境影响评价标准，对照城市区域声环境功能区标准来评价城市轨道交通工程的噪声影响，科学性及其可操作性均不强。另一方面，少数仅有的建筑物二次辐射噪声问题的研究多是以实测为主，缺乏有效的数值模拟模型分析。同时，由于影响二次辐射噪声的声场分布因素较多，所以需要实测与理论模型对建筑物二次辐射噪声进行评价与分析。

## 1.4 本文的主要工作

针对目前研究存在的问题，本文主要以有限元软件和声学边界元软件为研究平台，建立数值模型，分析地铁运行引起的建筑物振动与二次辐射噪声问题。本文分析流程图如图1.2。

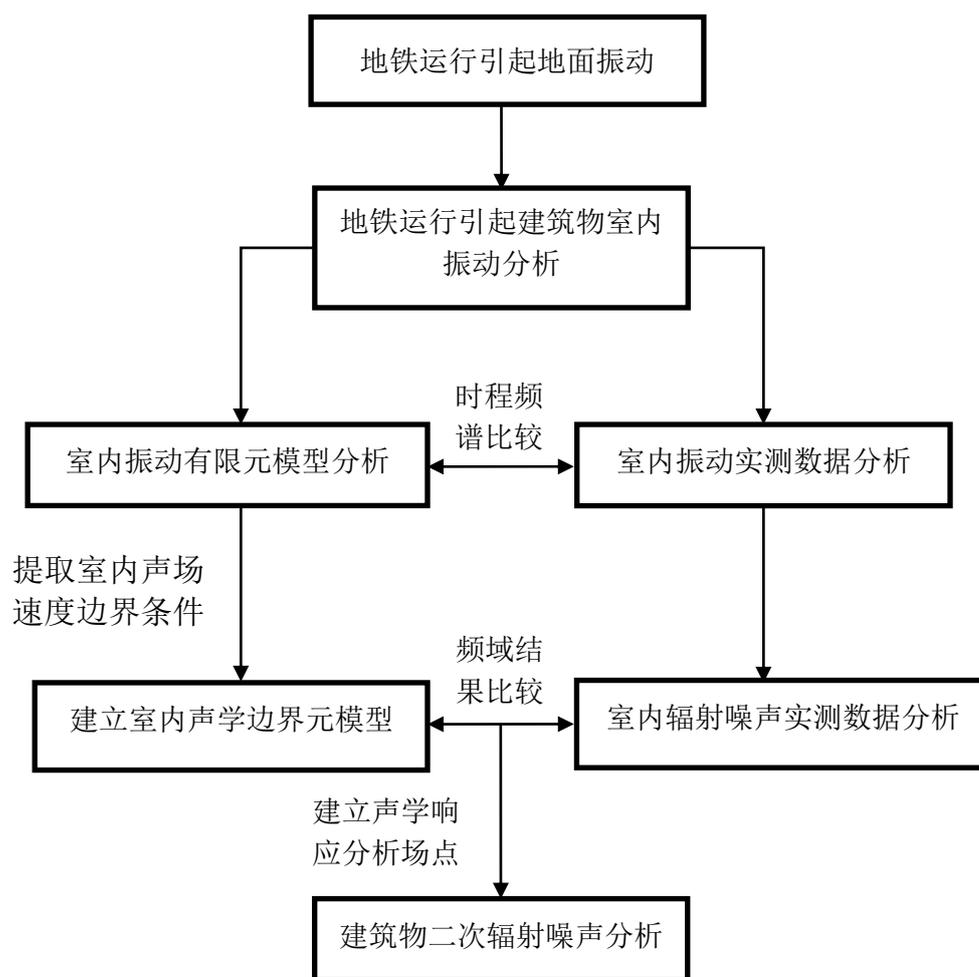


图1.2 分析流程图

具体研究内容如下：

- (1) 建立建筑物结构有限元模型，输入建筑物的实测地面振动加速度时程作为激振，比较建筑物同一楼面上不同位置点以及不同楼层楼面与墙面的振动响应，进而分析建筑物的振动特性。
- (2) 应用Virtual. Lab软件建立建筑物室内声场边界元模型，利用有限元模型分析得到的结构振动响应，对建筑物二次辐射噪声进行分析。
- (3) 对数值模拟结果与实测结果进行时程与频谱比较，分析建筑物振动与二次辐射噪声的响应规律。
- (4) 比较不同轨道支承方式下，地铁运行对建筑物振动与二次辐射噪声的影响，进而分析各种轨道支承的减振降噪性能。

## 第二章 建筑物室内辐射噪声基本理论与评价标准

### 2.1 结构声学基本量与声学 Helmholtz 波动方程

#### 2.1.1 声学基本物理量

##### (1) 声压

流体中的某点处，若初始时没有声振动扰动，此时静止状态时的声压为 $P_0$ ，当收到扰动后，介质压强由 $P_0$ 变化为 $P$ ，则有扰动引起的逾量压强为：

$$p = P - P_0 \quad (2.1)$$

产生的逾量压强成为声压。

由于声压是关于时间和空间的函数，所以声压可以表示为：

$$p = p(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

同样，由声扰动引起的流体密度的变化量也可以表示为：

$$\rho' = \rho'(x, y, z, t) = \rho - \rho_0 \quad (2.3)$$

##### (2) 声波的能量

在声场中取微元体，若声速为 $v$ ，初始体积为 $V_0$ ，初始压强为 $P_0$ ，初始密度为 $\rho_0$ ，则该微元体由于声扰动得到的动能：

$$E_k = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0)v^2 \quad (2.4)$$

同时，该微元体的压强由 $P_0$ 增加为 $P_0 + P$ ，同时体积变化为 $V_0 + \Delta V$ ，则该微元体具有的势能：

$$E_p = -\int_0^{\Delta V} p dV \quad (2.5)$$

由 $m = \rho V$  可得 $\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V}$ ，同时考虑到小振幅声波前提下， $dP \approx p$ ， $d\rho \approx \rho$ ，因

此有 $\frac{d\rho}{\rho_0} = -\frac{dV}{V_0}$ ，则声波过程中的物态方程可转化为：

$$dV = -\frac{V_0}{\rho_0 c_0^2} d\rho \quad (2.6)$$

式(2.6)代入式(2.5)可得:

$$E_p = -\int_0^{\Delta V} p dV = \frac{V_0}{\rho_0 c_0^2} \int_0^p p dV = \frac{V_0}{2\rho_0 c_0^2} p^2 \quad (2.7)$$

微元体的总能量  $E$  和声能密度  $\varepsilon$  :

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho_0 V^2}{2} \left( v^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c_0^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \frac{E}{V_0} = \frac{\rho_0}{2} \left( v^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c_0^2} \right) \quad (2.9)$$

### (3) 声级

声压级定义为待测声压有效值与基准声压有效值之比取常用对数, 再乘以 20, 即

$$L_p = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}} \quad (2.10)$$

其中,  $p_{ref}$  取  $2 \times 10^{-5} Pa$ 。

声强级定义为将待测声强  $I$  与基准声强  $I_{ref}$  的比值取常用对数, 再乘以 10, 即

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_{ref}} \quad (2.11)$$

其中,  $I_{ref}$  取  $10^{-12} W / m^2$ 。

声功率级定义为将辐射声功率  $W$  与基准声功率  $W_{ref}$  的比值取常用对数, 再乘以 10, 即

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_{ref}} \quad (2.12)$$

其中,  $W_{ref}$  取  $10^{-12} W$ 。

## 2.1.2 声学 Helmholtz 波动方程

推导声学 Helmholtz 波动方程时, 应满足以下基本假设:

- (1) 介质为理想流体，忽略介质的粘滞性，声波在传播中无能量损耗；
- (2) 没有声扰动时，介质在宏观上是静止的，即初速度为零。介质是均匀的，因此静态压强和静态密度都是常数；
- (3) 声波传播时，空气与外界不存在热交换，空气压缩或膨胀的过程是绝热过程；
- (4) 质点速度远小于声速，质点位移远小于声波波长，介质密度远小于固态密度。

### 2.1.2.1 声波连续方程

根据质量守恒定律：单位时间内，流入与流出介质体积单元的质量差等于体积单元内质量的增量。

若流场中没有声源，声波连续性方程为：

$$\frac{\partial(\rho_0 + \rho')}{\partial t} = -(\rho_0 + \rho')\bar{\nabla}\vec{v} \quad (2.13)$$

若在微元体内有单位体积的速度 $q'$ 引起的附加质量，声波连续方程为：

$$\frac{\partial(\rho_0 + \rho')}{\partial t} = (\rho_0 + \rho')q' - (\rho_0 + \rho')\bar{\nabla}\vec{v} \quad (2.14)$$

式中， $\vec{v}$ 为质点振动速度， $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}$ ， $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 为三个坐标轴上的分量， $\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$ 为Laplace微分算子。

### 2.1.2.2 声波运动方程

根据牛顿第二定律，声波的运动方程为：

$$(\rho_0 + \rho')\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{\nabla}\cdot\vec{v}\right)\vec{v} = -\bar{\nabla}(p_0 + p') \quad (2.15)$$

### 2.1.2.3 声波的物态方程

物态方程即声波在介质中传播时，介质压缩及膨胀过程中描述其状态变化的物理方程。若介质为空气，在常温常压下可将其看成理想气体，且由于声传播速度比热传播速度快得多，在状态变换过程中介质来不及与临近部分进行热交换，因此，声波在空气中的传播过程相应于理想气体的绝热过程，其过程方程为：

$$(\rho_0 + \rho')^k (p_0 + p') = C \quad (2.16)$$

即

$$p_0 + p' = f(\rho_0 + \rho') = (\rho_0 + \rho')^k / C \quad (2.17)$$

式中,  $p_0$ 为空气静态压强,  $k$ 为绝热指数,  $C$ 为常数。

将式(2.17)进行泰勒级数展开, 得声波的物态方程:

$$p' = \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \cdot \rho' + \frac{\gamma(\gamma-1)}{2\rho_0^2} \cdot (\rho')^2 + \dots \quad (2.18)$$

#### 2.1.2.4 声波的波动方程

在小振幅声波的空间中, 可以将声波的三个基本方程的高阶量去掉, 只保留线性部分:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \rho_0 q' - \rho \vec{\nabla} \vec{v} \quad (2.19)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p' \quad (2.20)$$

$$p' = \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \cdot \rho' \quad (2.21)$$

将式(2.19)对时间求偏导得

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial q'}{\partial t} - \rho \vec{\nabla} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (2.22)$$

将式(2.20)代入式(2.22)得

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial q'}{\partial t} + \nabla^2 p' \quad (2.23)$$

式(2.21)对时间求二阶偏导得:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

代入式(2.23)中得到

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial q'}{\partial t} \quad (2.25)$$

上式为在均匀介质、非粘性和绝热状态下流体内的纵向波的线性声波方程, 式中

$\vec{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \vec{i} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \vec{j} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{k}$  为Lagrange微分算子,  $c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}$  为声速。

对于简谐激振产生的稳态声场，可设：

$$p' = pe^{i\omega t} \quad (2.26)$$

$$q' = qe^{i\omega t} \quad (2.27)$$

进而得到声波的Helmholtz方程为

$$\nabla^2 p - k^2 p = -j\rho_0\omega q \quad (2.28)$$

式中  $\omega$  为声源振动的圆频率， $k = \omega/c$  波数， $p$  为声域内域点声压幅值， $q$  为声域简谐激振。

### 2.1.3 声场边界条件

一般声场的边界条件有以下几种：

(1) 在介质分界面上，声学边界条件应满足：

$$p_1 = p_2, \dot{u}_{1n} = \dot{u}_{2n} \quad (2.29)$$

式中  $p_1$ 、 $p_2$  分别为边界两侧的声压， $\dot{u}_{1n}$ 、 $\dot{u}_{2n}$  分别为两侧质点的法向速度。其物理意义是在分界面上，声波的声压和法向速度必须保持连续。

(2) 无吸声材料的刚性壁面上，声学边界条件应满足：

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.30)$$

(3) 在无声材料且小幅振动的弹性壁面上，声学边界条件应满足：

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho\ddot{u}_n = -j\omega\rho v_n \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho\omega^2 U_n = -\omega\rho V_n \quad (2.32)$$

(4) 在有吸声材料的壁面上，声学边界条件应满足：

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\rho}{z_a} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.33)$$

以上式中， $\mathbf{n}$  为壁面外法线方向， $z_a$  为声阻抗率， $\mathbf{u}_n$  为弹性壁面法向位移， $\ddot{u}_n$  为弹性壁面法向加速度， $U_n$  为结构表面法向振动位移幅值， $V_n$  为结构表面法向振动加速度幅值， $v_n$  为结构表面法向振动速度。

## 2.2 结构-声学计算方法

比较简单的求解这类问题的方法是声学有限元法。应用声学有限元的最大优点在于可以模拟任意几何形状的封闭空间内的声场；同时有限元法还可以处理不均匀介质，但是很少使用这种模拟声场的情况。声学有限元法的缺点是单元的尺寸要远小于声波的波长，在高频段，三维区域划分需要大量的单元；有限元的另一个不足是波数的不吻合：数值解在波数的数值离散与精确解的波数不同。

求解声场的另一种方法是声学边界元法，由于边界元求解比有限元要降一维，因此划分的网格数目较少。然而，传统的边界元公式是基于声场全空间的格林函数，导致类一个完全组装、依赖频率的控制方程，使求解的计算过程代价非常大。通过使用房间的格林函数及推到的关于房间墙壁的振动速度的内部声压的直接积分法可以避开这些难题。

### 2.2.1 声学有限元法

根据Helmholtz方程以声场边界条件，若把计算的声场离散成一定数量的小声场单元，每个单元内的声场通过形函数由单元节点的声压确定，由单元形函数集成声场全局形函数，则Helmholtz方程可表示为：

$$(-\omega^2 M + j\omega C + K) \cdot \{p_i\} = \{F_i\} \quad (2.34)$$

式中，

$$M_{ij} = \int_V \left( \frac{1}{c^2} N_i N_j \right) dV \quad (2.35)$$

$$C_{ij} = \int_{\Omega_z} (\rho_0 A N_i N_j) d\Omega \quad (2.36)$$

$$K_{ij} = \int_V \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \quad (2.37)$$

$$\{F_i\} = \{Q_i\} + \{V_{ni}\} + \{P_i\} \quad (2.38)$$

其中，

$$\{Q_i\} = \int_V (j\rho_0 \omega N^T q) dV \quad (2.39)$$

$$\{V_{ni}\} = \int_V (j\rho_0 \omega N^T \vec{v} \cdot \vec{n}) dV \quad (2.40)$$

$$\{P_i\} = - \int_{\Omega_p} (j\rho_0\omega N^T \vec{v} \cdot \vec{n}) d\Omega \quad (2.41)$$

以上式中,  $N_i$ 、 $N_j$  为  $i$  和  $j$  节点的形函数;  $\Omega$  为声场积分边界, 分为速度边界  $\Omega_v$ 、声抗边界  $\Omega_a$  及声压边界  $\Omega_p$

### 2.2.2 声学边界元法

与声学有限元类似, 边界元需要把边界  $\Omega$  离散成单元与节点, 每个单元内的声场通过形函数由单元节点的声压确定。由于室内声场属于封闭声场, 所以可以采用直接边界元方法。

首先, 把声场积分边界  $\Omega$  离散成许多单元  $\Omega_{ae}$  及节点, 每个单元内部任意点的声压  $p$  和法向速度  $v_n$  可以由属于这个单元的节点上的声压  $a_{pi}$  和法向速度  $a_{vi}$  与单元的形函数  $N_i^e$  表示:

$$p(r_a) = \sum_{i=1}^{n_e} N_i^e(r_a) \cdot a_{pi}, r_a \in \Omega_{ae} \quad (2.42)$$

$$v_n(r_a) = \sum_{i=1}^{n_e} N_i^e \cdot a_{vi}, r_a \in \Omega_{ae} \quad (2.43)$$

式中:  $n_e$  是某个单元  $\Omega_{ae}$  上的节点数量。

单元形函数  $N_i^e$  在节点  $i$  上为 1, 在单元的其他节点上为 0, 有单元形函数  $N_i^e$  可以组成全局的形函数  $N_i$ , 那么, 在整个边界元网格  $\Omega$  上有:

$$p(r_a) = \sum_{i=1}^{n_a} N_i \cdot p_i = N_i \{p_i\}, r_a \in \Omega_a \quad (2.44)$$

$$v_n(r_a) = \sum_{i=1}^{n_a} N_i \cdot p_i = N_i \{v_{ni}\}, r_a \in \Omega \quad (2.45)$$

式中:  $n_a$  为所有边界元网格的节点数量。

待求节点的声压与振动速度可由已知节点的声压和振动速度求解:

$$A_b \{p_i\} = j\rho_0\omega B_b \{v_{ni}\}, b=1, 2, \dots, n_a \quad (2.46)$$

式中:  $A_b$  和  $B_b$  均为  $1 \times n_a$  矩阵, 矩阵各元素为:

$$A_{bi} = \delta_{bi} \left( 1 + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_a} \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{|r_b - r_a|} \right) \cdot d\Omega(r_a) \right) - \int_{\Omega_a} N_i(r_a) \frac{\partial G(r_b, r_a)}{\partial n} \cdot d\Omega(r_a) \quad (2.48)$$

$$B_{bi} = \int_{\Omega_a} N_i(r_a)G(r_b, r_a) \cdot d\Omega(r_a) \quad (2.49)$$

## 2.3 环境噪声控制标准

### 2.3.1 计权声压级

相同声压级的声音，因频率的不同，人们在主观听觉上会感到不同的响度。为了使声音度量与人耳的听觉感受一致，通常对声学量的分贝数值进行过滤，对声音按频带设定一定的衰减加权或补偿来模拟人耳的听觉特性。常用的加权声压级有四种。在结构—声领域中，一般采用A计权声压级。其中各种计权网络对应于三分之一倍频程中心频率的声压修正值如表2.1：

表2.1 各种计权网络的声压修正值

| 频率(Hz) | A(dB) | B(dB) | C(dB) | D(dB) |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 20     | -50.5 | -24.2 | -6.2  | -20.6 |
| 25     | -44.7 | -20.4 | -4.4  | -18.7 |
| 31.5   | -39.4 | -17.1 | -3    | -16.7 |
| 40     | -34.6 | -14.2 | -2    | -14.7 |
| 50     | -30.2 | -11.6 | -1.3  | -12.8 |
| 63     | -26.2 | -9.3  | -0.8  | -10.9 |
| 80     | -22.5 | -7.4  | -0.5  | -9    |
| 100    | -19.1 | -5.6  | -0.3  | -7.2  |
| 125    | -16.1 | -4.2  | -0.2  | -5.5  |
| 160    | -13.4 | -3    | -0.1  | -4    |
| 200    | -10.9 | -2    | 0     | -2.6  |

A计权声级是模拟人耳对55dB以下低强度噪声的频率特性，比较接近人耳的感觉，是目前噪声评价中主流的计权方式。在一般情况下，对人的主观感受有较好的拟合，是令人满意的评价指标。因此可以看到，几乎所有的环境噪声标准都是以A声级为基本评价量或者结合A声级的评价方法而制定的，它由声级计上的A计权网络直接读出。国内的情况也是如此。

以A声级作为噪声评价量具有简便实用的优点。但因A声级是对低频率信号有较大衰减的频率计权，测量值测量结果中不提供频率成分的信息。因此有两个缺点：

(1) 对相同A声级的噪声而言，其频谱相差可能很大。更重要的是如果要进行噪声治理，则控制措施与各频率所需的分贝数有关，缺少了频率信息就不能做出经济合理的噪声控制设计。

(2) 对于低频成分占优势的强噪声环境，A声级数值大小与人们的主观感受有较大差距。

目前，国内声环境质量标准及其监测方式主要是针对高、中频噪声（A计权网络，由于A计权的频率特性曲线是对噪声的低频段和高频段大幅度衰减，对中频段没有衰减）的检测。GB/T 14623-93《城市区域环境噪声标准的测量方法》、GB/T12349-90《工业企业厂界噪声测量方法》等测量方法都是用声级计的A声级来测量和评价环境噪声。一般情况下，高频噪音达到60分贝以上就被认为高噪音。低频噪声因分贝数并不高，在检测过程中，往往忽略了低频噪音的存在，而且在处理低频噪音时缺乏必要的政策依据。

现在测量噪声一般都采用A声级测量。但世界卫生组织的《社区噪声指南》(Guidelines for Community Noise)认为：当出现大量的低频噪声时，A声级测量是不确切的，C声级与A声级的差位大于10指明了低频噪声的出现，建议进行频谱分析。

尽管A计权方式在低频噪声评价方面存在这些问题，但是由于A计权方式在目前的噪声评价中占据主流地位，所以大多数国家的低频噪声评价指标建议值还是要么单独采用A计权方式，或者要么采用包括A计权方式在内的多种评价指标。而且很多噪声评价方法(如累计分布声级LN)中噪声的采样也是采用A计权声级。

### 2.3.2 各国噪声测试标准

各国虽然评价指标不同，但是在低频噪声建议标准上实际的限定值差距不大，这可以从三分之一倍频程的比较图 2.1 中看出。

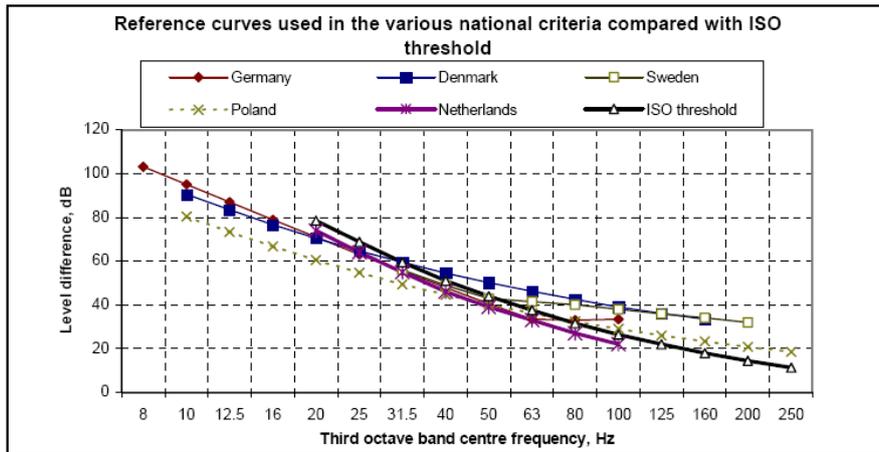


图2.1 各国标准与ISO226 的比较

很多国家如德国（非纯音）、丹麦、荷兰（G.P. van den Berg 建议标准）、美国和台湾，在低频噪声限制指标的选用上，还是趋向于 A 计权的方式，同时根据噪声变化的特性选择 LA 或者 LA<sub>eq</sub> 的评价指标。

A 声级是单一的数值，是噪声的所有成分的综合反映。如果我们要比较细致地评价各频程的噪声，就应该采用噪声评价曲线（NR 曲线）或者在 1/3 倍频程上进行分析。NR 曲线是国际标准化组织(ISO)提出和推荐的，它也是各国最常用的标准曲线，特别是在欧洲广泛采用。

NR 数较适用于相对稳定的背景噪声的测量与评价，也可作为确定背景噪声的设计目标。然而，NR 数对于峰值的持续时间以及起伏特性还不能足够地反映。

由于低频噪声不易被人听觉所感知的特性，很多国家如德国（纯音）、日本、瑞典（时间平均）、荷兰（NSG 建议标准）和波兰，都将人耳对低频噪声的最小听力阈值作为评价的依据。各国在制定其低频最小听力阈值时，均以人的主观评价为基础，不过各国主观评价的方法并不相同，比如荷兰选择的年龄在 50 至 60 岁之间，听力阈值在 50% 灵敏度以上的人作为主观评价实验的对象。

以上欧美等国的标准并没有充分考虑到声音波动问题。尽管丹麦标准规定在波动音的情况下需要考虑阈值，但是对波动的声源考虑的还是不太充分。台湾标准考虑到波动的问题，即在噪声呈周期性或间歇性的规则变动的情况下，而最大值大致一定时，则以五次变动的最大值(L<sub>max</sub>)进行平均。

我们将以上各国低频噪声标准加以比较，列于表 2.2 中：

表2.2 各国噪声标准比较(dB)

| 中心频率<br>(Hz) | 德国     | 瑞典   |      | 波兰   |    | 日本 | ISO226 |
|--------------|--------|------|------|------|----|----|--------|
|              |        | 室内   | 工作环境 | 工作环境 | 室内 |    |        |
| 2            |        |      | 130  |      |    |    |        |
| 2.5          |        |      | 126  |      |    |    |        |
| 3.15         |        |      | 122  |      |    |    |        |
| 4            |        |      | 118  | 90   | 85 |    |        |
| 5            |        |      | 114  |      |    |    |        |
| 6.3          |        |      | 110  |      |    |    |        |
| 8            | (103)  |      | 106  | 90   | 85 |    |        |
| 10           | 95     |      | 102  |      |    | 92 |        |
| 12.5         | 87     |      | 98   |      |    | 88 |        |
| 16           | 79     |      | 94   | 90   | 85 | 83 |        |
| 20           | 71     |      | 90   |      |    | 76 | 78.5   |
| 25           | 63     |      |      |      |    | 70 | 68.7   |
| 31.5         | 55.5   | 56   |      | 85   | 80 | 64 | 59.5   |
| 40           | 48     | 49   |      |      |    | 57 | 51.1   |
| 50           | 40.5   | 43   |      |      |    | 52 | 44.0   |
| 63           | 33.5   | 41.5 |      |      |    | 47 | 37.5   |
| 80           | 28     | 40   |      |      |    | 41 | 31.5   |
| 100          | (23.5) | 38   |      |      |    |    | 26.5   |
| 125          |        | 36   |      |      |    |    | 22.1   |
| 160          |        | 34   |      |      |    |    | 17.9   |
| 200          |        | 32   |      |      |    |    | 14.4   |

## 第三章 地铁运行引起建筑物室内振动数值分析

### 3.1 引言

地铁引起房屋楼板和墙面的振动是研究二次辐射噪声问题的前提。目前，研究地铁运行引起地面建筑物振动主要有两种途径，即现场实测和理论计算分析。

现场实测分析主要是选取地铁沿线的建筑物，对不同楼层的楼面与墙面进行加速度时程测试，通过计算分析得到建筑物各层结构的振动响应，进而利用国际或国家标准进行比较分析，最后得出环境振动评价结论。

理论计算分析地铁引起房屋振动，由计算模型输入的激励不同，可以分为两种方法：一种是将地基与房屋结构分开，以地铁引起房屋地面的实测振动作为分析的输入激励，利用有限元等方法分析结构的振动响应；另一种是将房屋地基基础和结构物作为整体考虑，考虑土—结构相互作用，分析结构的振动响应。

目前研究表明，由于列车、路基及地基土等特性的复杂性，真实模拟实际情况是非常困难的。这是因为列车—轨道—地基系统有限元分析一般采用二维模型，而模型的单元划分数受到现有计算能力的限制，导致建筑物的有限单元数较少，很难求结构的高频振动；但建筑物的室内声场主要是由于结构的高频振动响应产生的，因此该分析模型存在一定的缺陷。

本章利用现场实测地铁引起的地面振动加速度时程数据，建立刚性地基结构模型，采用有限单元法对分析地铁引起建筑物结构的振动响应。为了研究房屋室内声场的边界条件，主要对房屋各层的楼面与墙面的振动响应进行时程与频谱分析。

### 3.2 地面振动实测基本条件

测试选取上海某条地铁线路沿线的房屋，该建筑物位于轨道弯道附近，弯道半径为400m，测点处地铁隧道埋深距离为11.65m。测试的建筑物类型为6层砌体结构，该建筑物共有4个单元，长43.95m，宽13.088m。

为了测试不同楼层的地面振动，在1-4层测点选取相同的位置布置测点，均为地面中央。传感器安置于建筑物主体结构上，为了避免传感器安置位置方向

与测量方向不一致而可能引起的误差，传感器灵敏度主轴方向与铅垂方向一致。

测量持续时间至少一个小时或每个测点连续测量不少于20列距测点较近的轨道上通过的列车（城市区域环境振动测量方法，读数取算术平均值作为评价量）。测量时间的长短取决于单位时间列车通过的次数与测量期间背景振动的大小。对于地铁来说，评价时段包括昼间和夜间，因此测量时段应至少包括昼间及夜间各1个小时。测量时间内（昼间及夜间）单向通过的列车不应少于20列，必要时应延长测量时间。本次测量采用24小时的连续测量。

### 3.3 地铁引起建筑物振动的有限元模型分析

#### 3.3.1 有限元模型

建筑物标准层建筑平面图如图3.1。

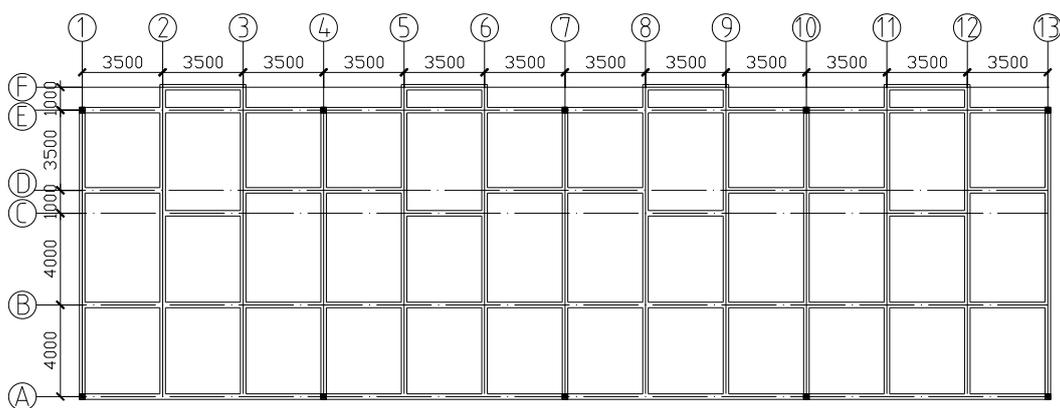


图3.1 建筑平面图

在软件ANSYS中建立建筑物有限元模型，梁柱采用BEAM4单元，楼板和墙体采用SHELL63单元。考虑到建筑物上部结构与基础固结，故有限元模型底部采用三相约束。由于梁截面类型较多，这里不具体列出。其中主要分析结构进行单元细分，建筑物的有限元模型如图3.2(a)，建筑物的有限元网格划分如图3.2(b)。

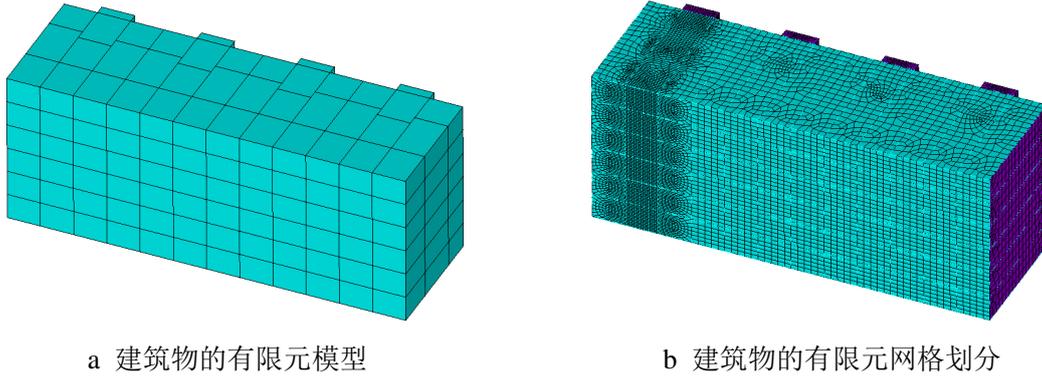


图3.2 建筑物数值模型图

本文主要对建筑物室内楼板与墙体的振动加以分析，主要计算参数如表3.1：

表3.1 ANSYS模型分析主要计算参数

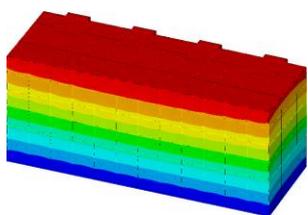
|             |                        |
|-------------|------------------------|
| 房间尺寸(长×宽×高) | 4.2m×3.5m×2.8m         |
| 楼板厚度        | 0.1m                   |
| 楼板弹性模量      | 3.0E10Pa               |
| 楼板材料密度      | 2500 kg/m <sup>3</sup> |
| 楼板材料泊松比     | 0.20                   |
| 墙体厚度        | 0.24m                  |
| 墙体材料弹性模量    | 2.37E9Pa               |
| 墙体材料密度      | 2250kg/m <sup>3</sup>  |
| 墙体材料泊松比     | 0.18                   |

### 3.3.2 结构自振频率与模态

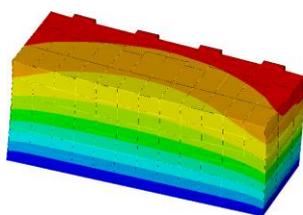
结构的自振频率如表3.2，模态信息如图3.3。

表3.2 结构自振频率表

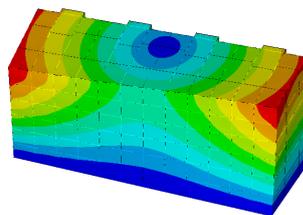
|        |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 阶数     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| 频率(Hz) | 4.59  | 4.90  | 5.40  | 11.30 | 11.44 | 11.51 | 12.28 |
| 阶数     | 8     | 9     | 10    | 20    | 30    | 50    | 80    |
| 频率(Hz) | 12.30 | 12.74 | 10.75 | 18.24 | 18.76 | 21.25 | 23.19 |
| 阶数     | 100   | 200   | 300   | 500   | 600   | 800   | 1000  |
| 频率(Hz) | 24.88 | 27.90 | 30.47 | 34.35 | 37.33 | 40.68 | 46.18 |



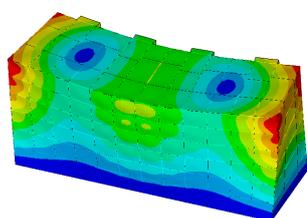
1阶模态



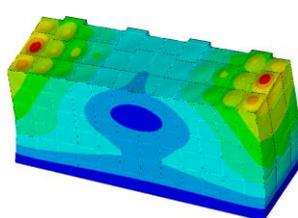
2阶模态



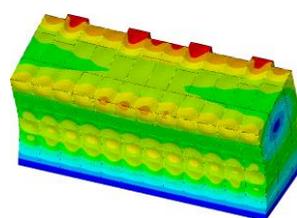
3阶模态



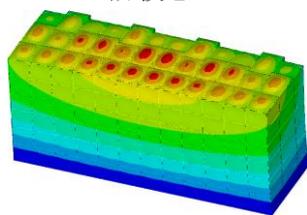
4阶模态



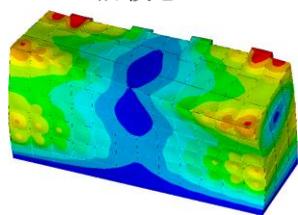
5阶模态



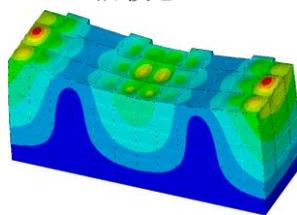
6阶模态



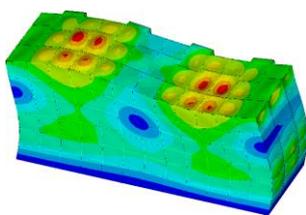
7阶模态



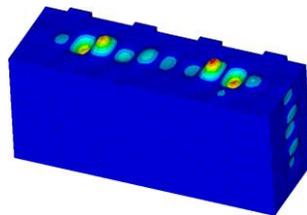
8阶模态



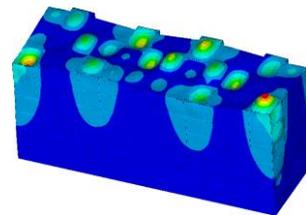
9阶模态



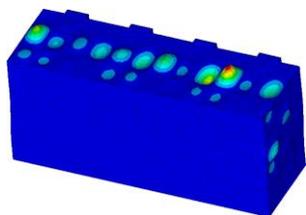
10阶模态



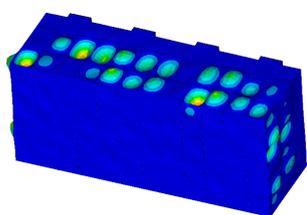
20阶模态



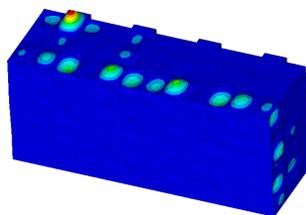
30阶模态



50阶模态



80阶模态



100阶模态

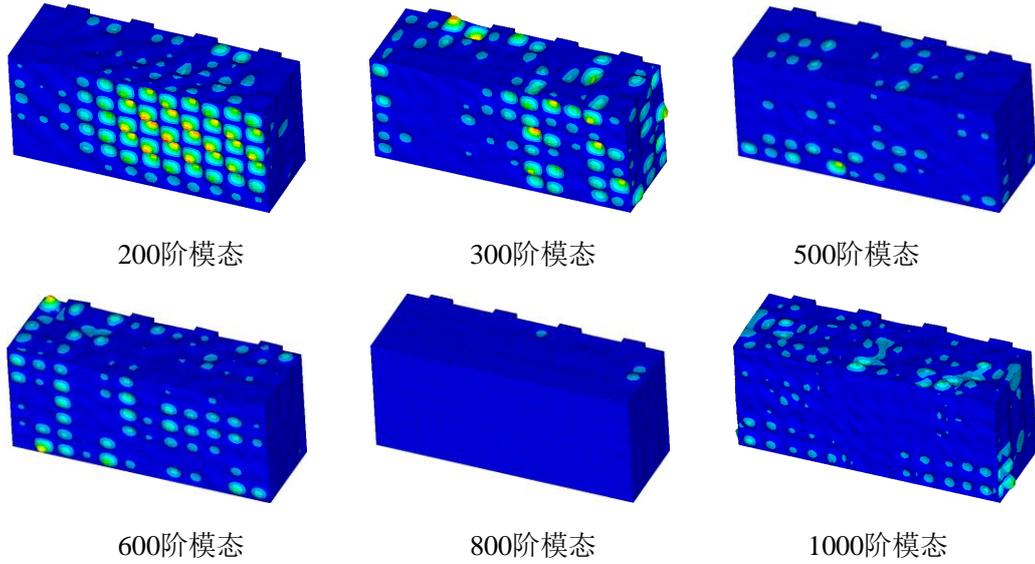


图3.3 结构模态图

### 3.3.3 地面加速度激振

采用实测建筑物地面三向加速度作为输入。加速度时程曲线与频谱曲线如图3.4-图3.6。时程采用一致输入，分析时不考虑土与结构相互作用；计算采用直接积分法，时间步长取0.002s；阻尼为瑞利阻尼。

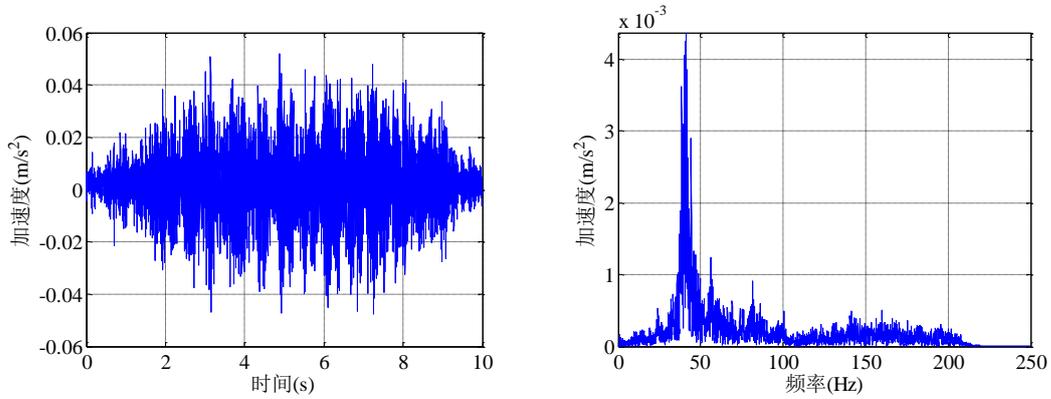


图3.4 竖直方向地面加速度激振力

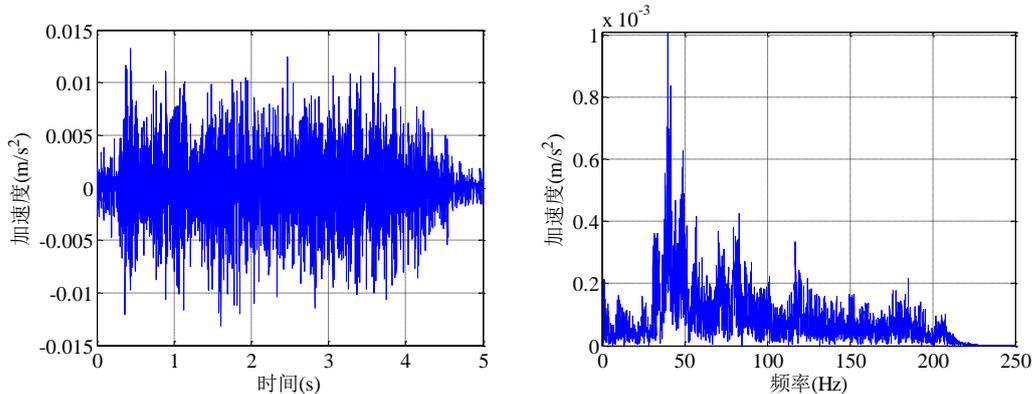


图3.5 平行轨道方向地面加速度激振力

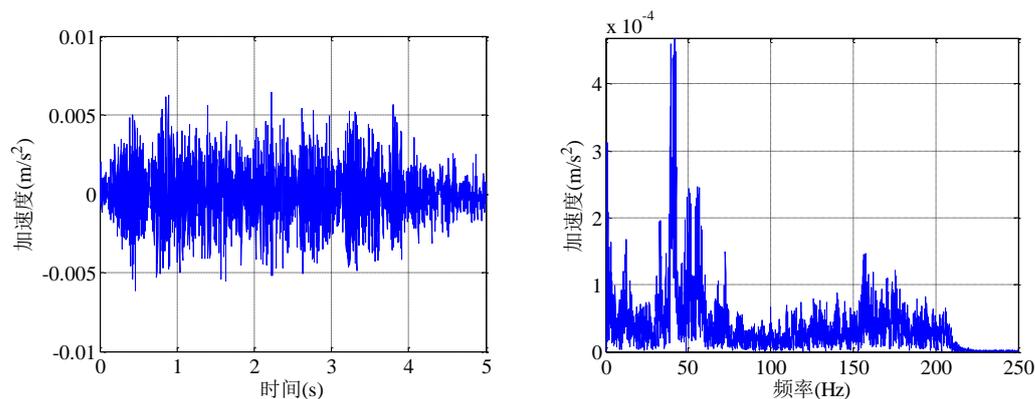


图3.6 垂直轨道方向地面加速度激振力

### 3.3.4 建筑物振动特性

建筑物在地铁激振的影响下，不同楼层的振动特性不同，相同楼层不同的楼板与墙面的振动特性也有差异。为了研究建筑物的振动特性，对建筑物楼面与墙面的有限元模型分析结果进行了比较分析。

#### 3.3.4.1 建筑物楼面振动特性

该建筑物采用100mm厚的钢筋混凝土预制楼板，不同楼层楼面的振动时程如下。其中楼板不同测点位置如图3.7。

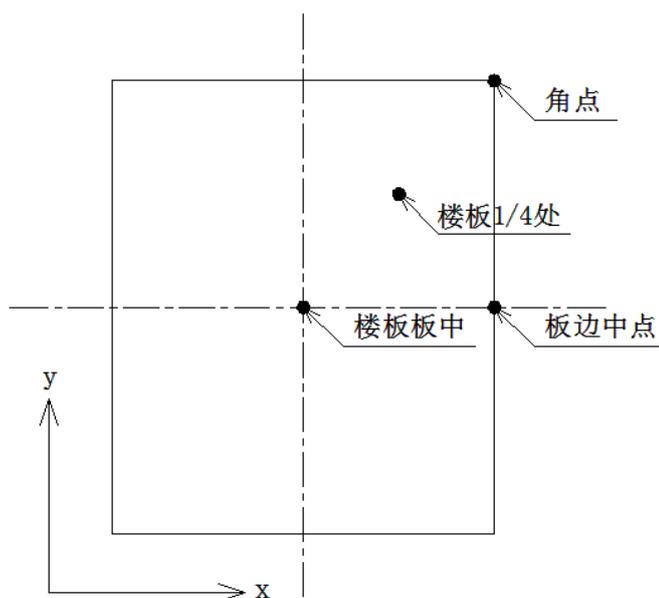


图3.7 楼板不同测点位置示意图

一楼楼面的不同点处的振动时程如图3.8-图3.11。

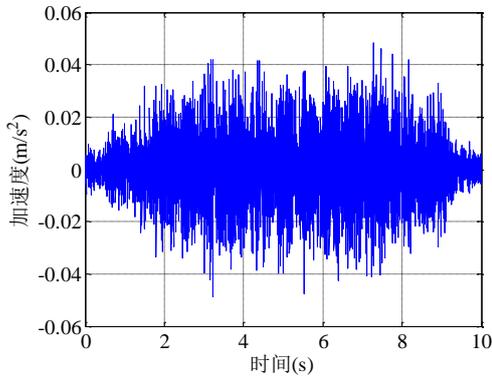


图 3.8 一楼楼板板中处时程曲线

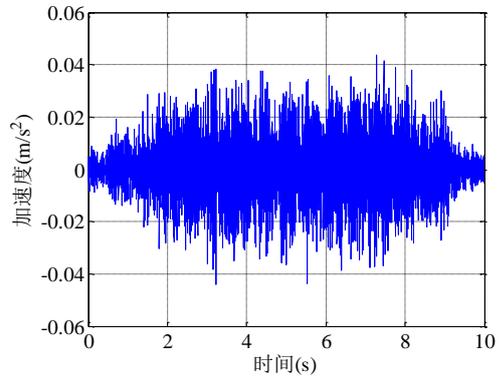


图 3.9 一楼楼板 1/4 处时程曲线

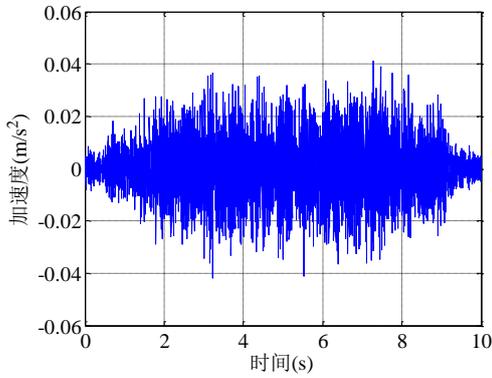


图3.10 一楼楼板板边中心处时程曲线

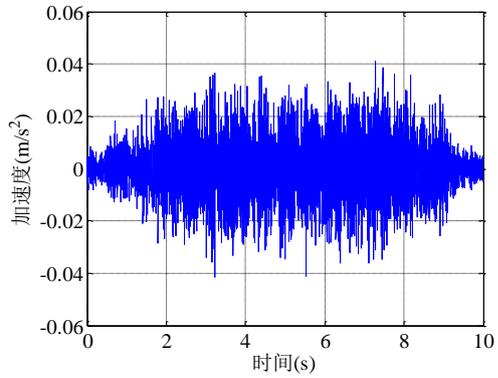


图3.11 一楼楼板角点处时程曲线

二楼楼面的不同点处的振动时程如图3.12-图3.15。

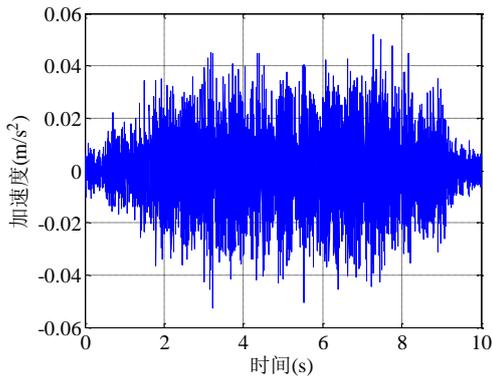


图3.12 二楼楼板板中处时程曲线

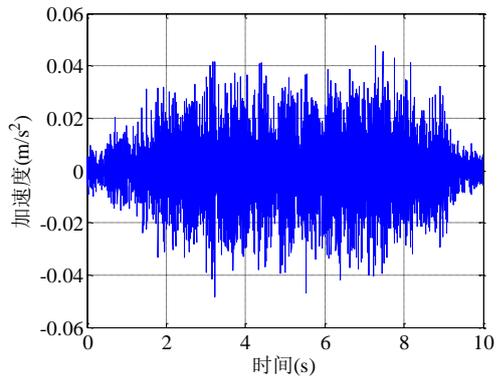


图3.13 二楼楼板1/4处时程曲线

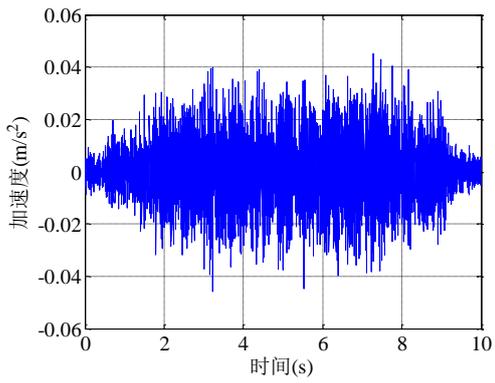


图3.14 二楼楼板板边中心处时程曲线

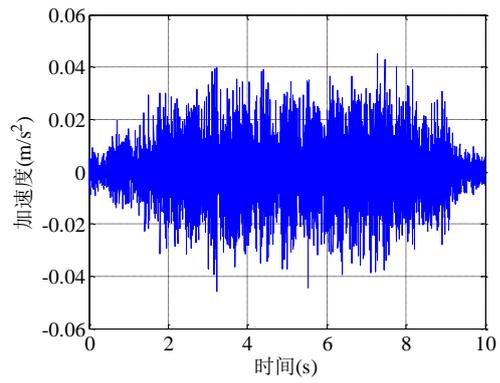


图3.15 二楼楼板角点处时程曲线

三楼楼面的不同点处的振动时程如图3.16-图3.19。

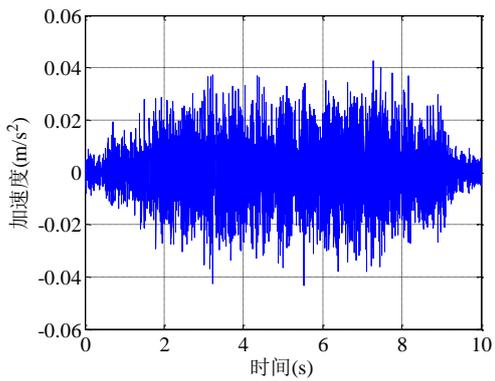


图3.16 三楼楼板板中处时程曲线

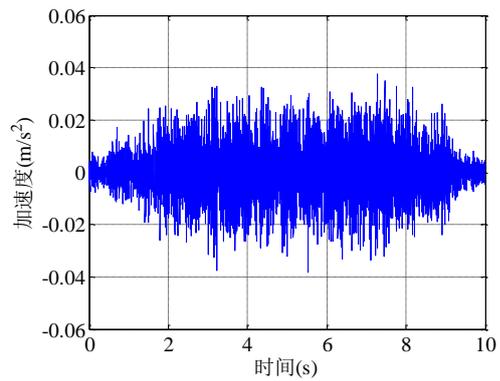


图3.17 三楼楼板1/4处时程曲线

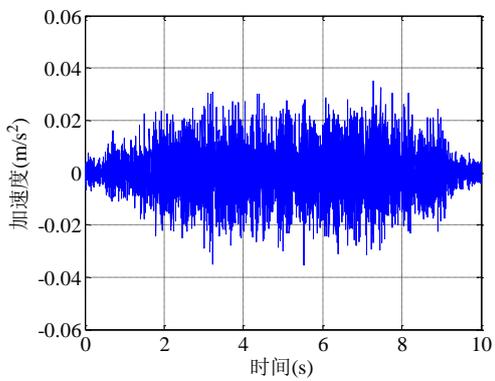


图3.18 三楼楼板板边中心处时程曲线

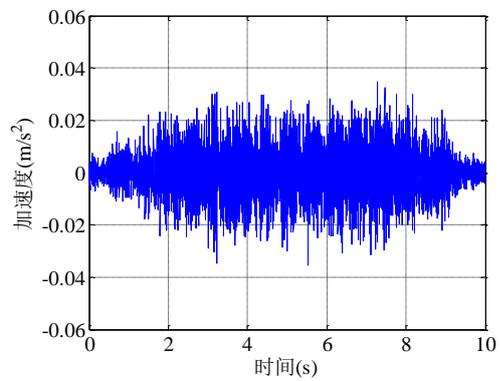


图3.19 三楼楼板角点处时程曲线

四楼楼面的不同点处的振动时程如图3.20-图3.23。

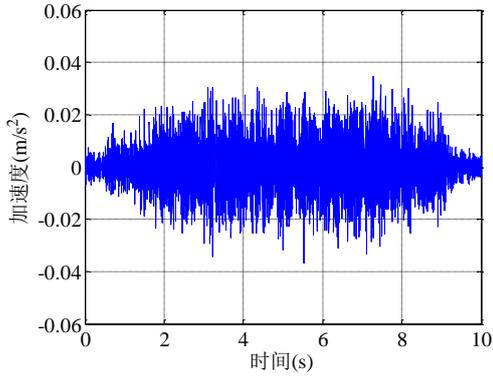


图3.20 四楼楼板板中处时程曲线

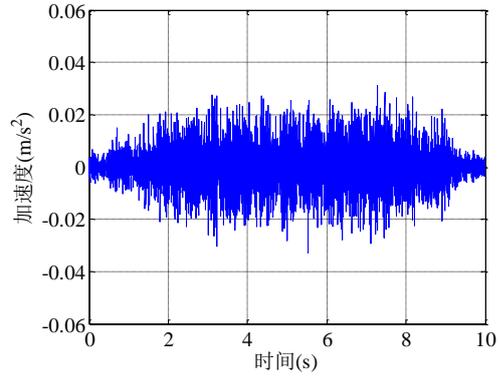
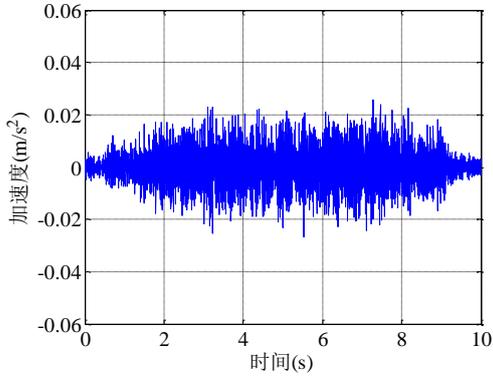


图3.21 四楼楼板1/4处时程曲线



3.22 四楼楼板板边中心处时程曲线

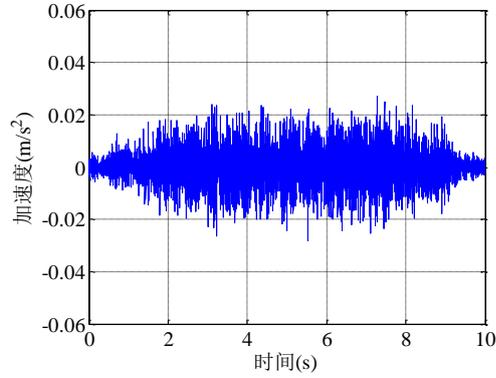


图3.23 四楼楼板角点处时程曲线

图

五楼楼面的不同点处的振动时程如图3.24-图3.27。

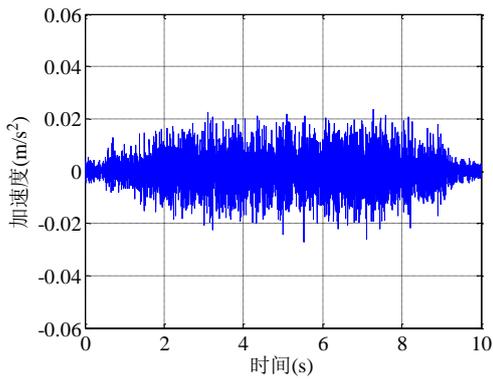


图3.24 五楼楼板板中处时程曲线

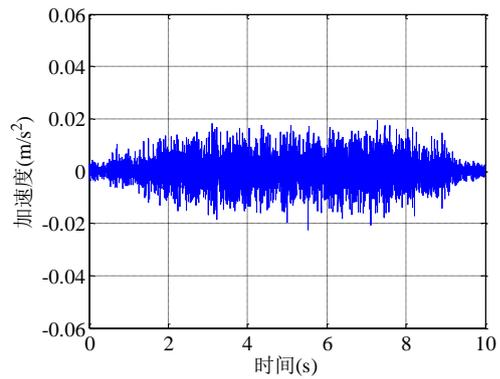
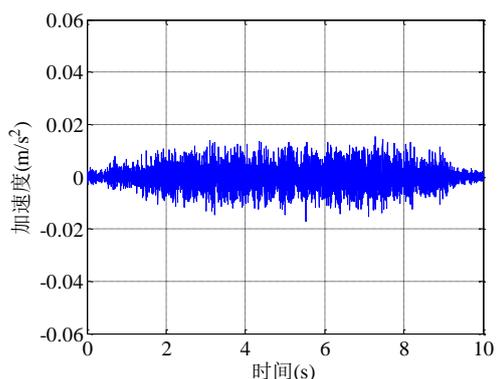


图3.25 五楼楼板1/4处时程曲线



3.26 五楼楼板板边中心处时程曲线

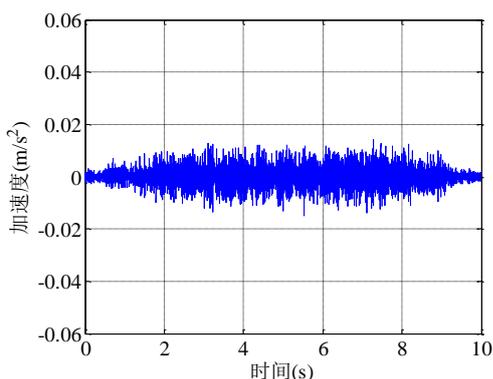


图3.27 五楼楼板角点处时程曲线

由图3.8-图3.27可以看出：总体而言，二楼加速度振幅最大，其余各楼层的振动幅值随着楼层的增加而减小，这主要因为有限元模型中，一层楼板与基础固结，导致楼本刚度比二楼大，这与实际工程情况基本相符；其中，一楼与五楼楼板振动幅值相差约为 $0.025\text{m/s}^2$ ；对于同一楼层，楼板板中比楼板端部振动明显。

不同楼层楼板板中处与楼板角点处的加速度三分之一倍频程比较如图3.28-图3.32。

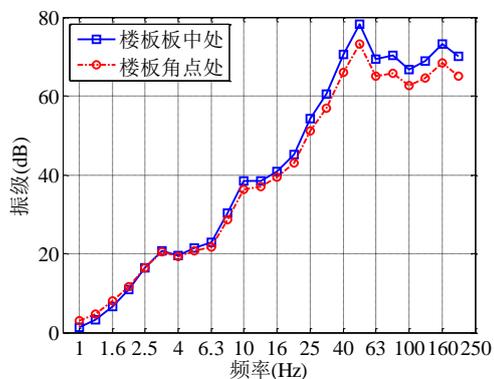


图3.28 一楼楼板不同点处1/3倍频程图

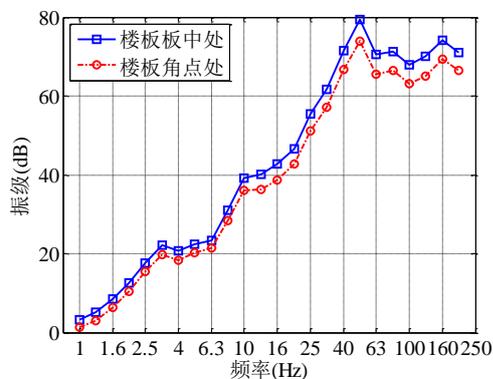


图3.29 二楼楼板不同点处1/3倍频程图

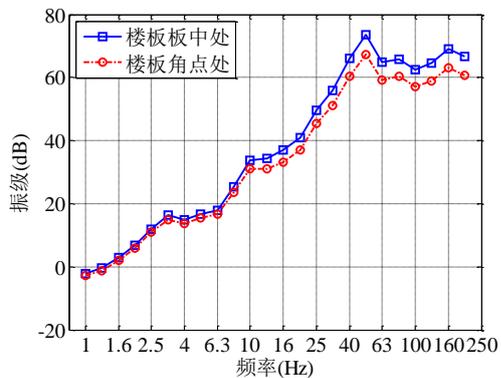
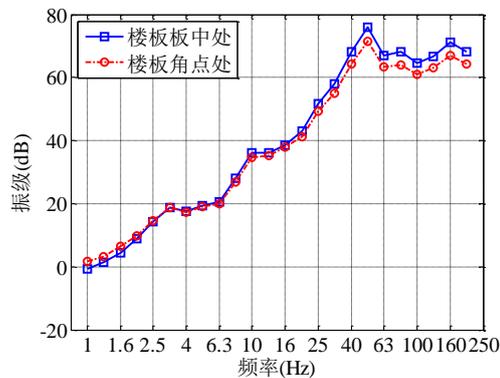


图3.30 三楼楼板不同点处1/3倍频程图

图3.31 四楼楼板不同点处1/3倍频程图

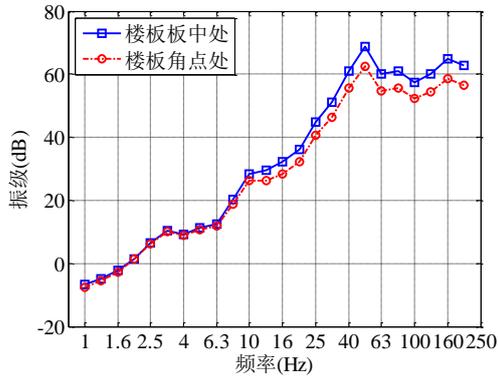


图3.32 五楼楼板不同点处1/3倍频程图

由图3.28-图3.32可以看出：总体看来，楼板板中与角点出的三分之一倍频程的变化趋势基本相同，楼板板中的振级高于楼板角点处。当中心频率在1-10Hz范围内，楼板板中与角点处振级相差较小，基本在1dB之内；当中心频率在10-40Hz范围内，板中与角点处振级相差在2dB左右；当中心频率在40-200Hz范围内，板中与角点处振级相差较为明显，为2-6dB。同时，不同楼层下，楼板板中与角点处的振级差值基本相同。可见，楼板不同位置的振动特性基本不受楼层变化的影响。

### 3.3.4.2 建筑物墙面振动特性

该建筑物采用240mm厚的粘土砖。按照墙面的外法向方向对墙面命名： $+x$ 向为E， $-x$ 向为W， $+y$ 向为N， $-y$ 向为S。不同墙面命名示意图如图3.33。

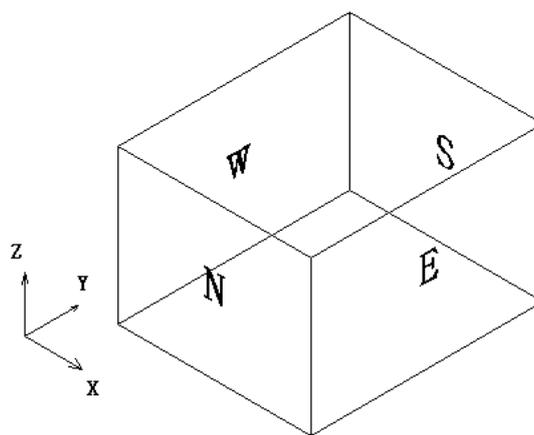


图3.33 不同墙面命名示意图

一楼不同墙面中心处的振动时程如图3.34-图3.37。

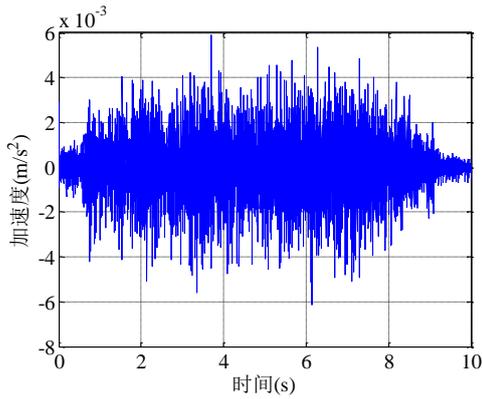


图3.34 一楼墙E中心处时程曲线

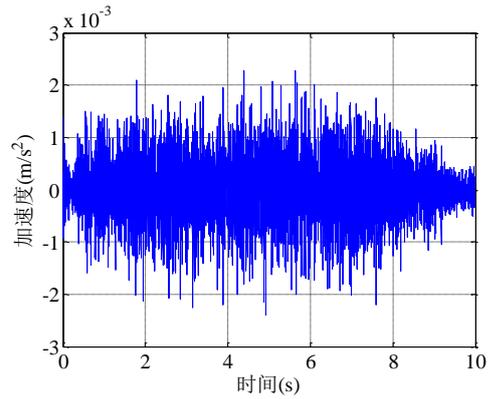


图3.35 一楼墙S中心处时程曲线

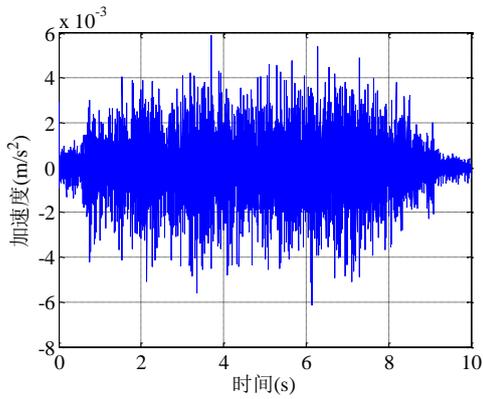


图3.36 一楼墙W中心处时程曲线

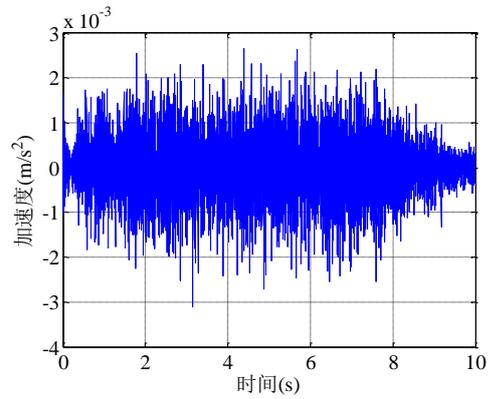


图3.37 一楼墙N中心处时程曲线

二楼楼面的不同点处的振动时程如图3.38-图3.41。

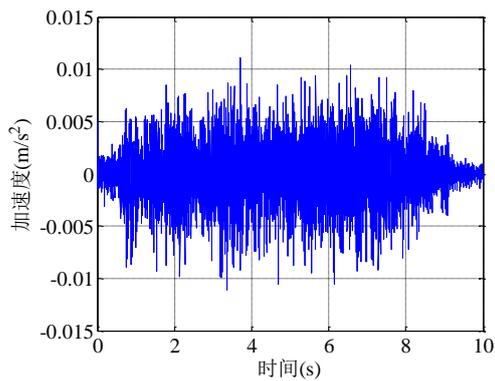


图3.38 二楼墙E中心处时程曲线

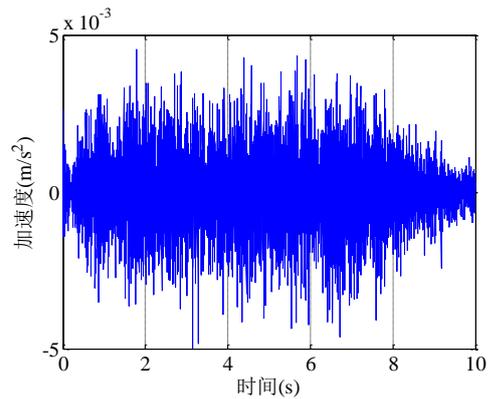


图3.39 二楼墙S中心处时程曲线

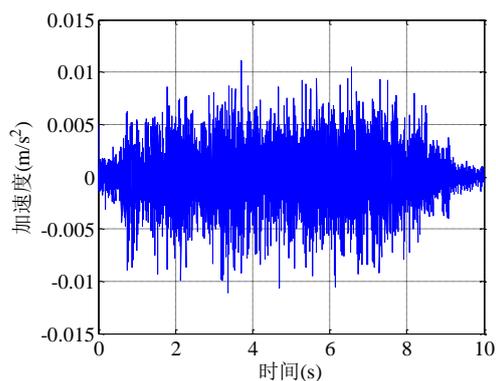


图3.40 二楼墙W中心处时程曲线

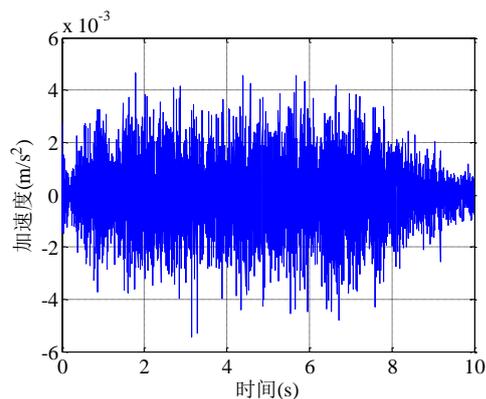


图3.41 二楼墙N中心处时程曲线

三楼楼面的不同点处的振动时程如图3.42-图3.45。

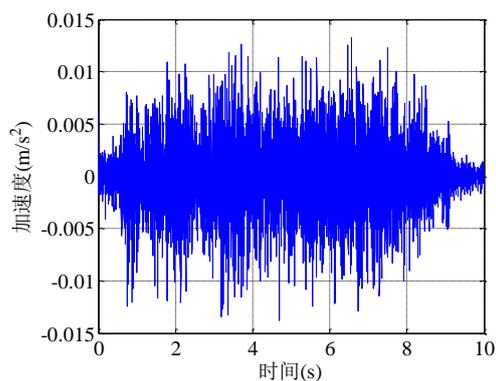


图3.42 三楼墙E中心处时程曲线

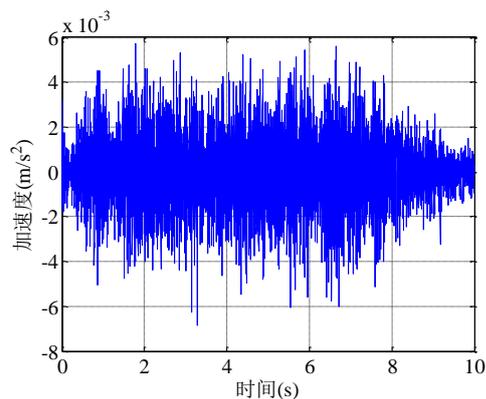


图3.43 三楼墙S中心处时程曲线

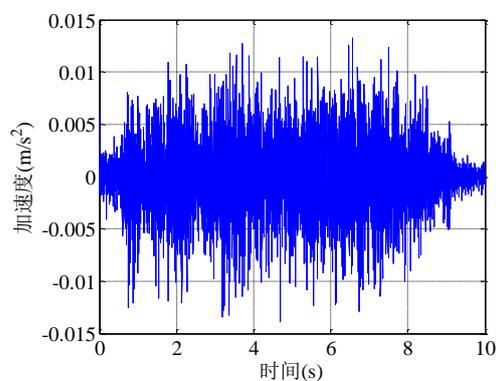


图3.44 三楼墙W中心处时程曲线

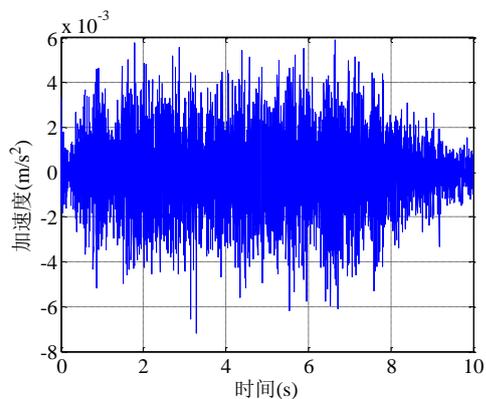


图3.45 三楼墙N中心处时程曲线

四楼楼面的不同点处的振动时程如图3.46-图3.49。

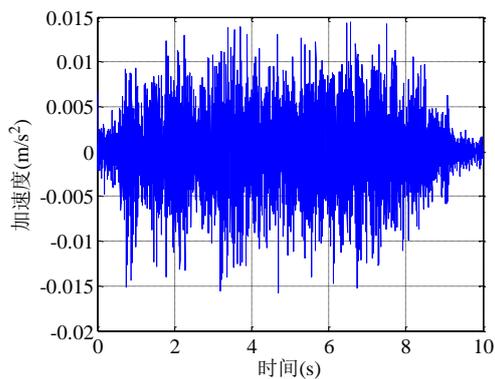


图3.46 四楼墙E中心处时程曲线

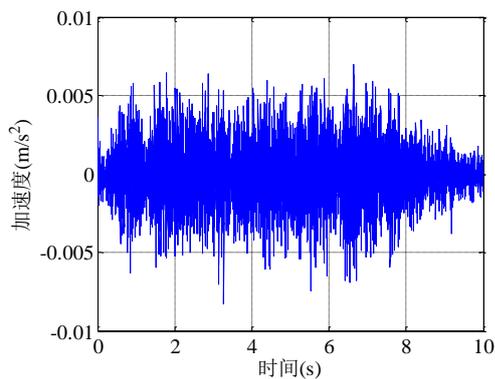


图3.47 四楼墙S中心处时程曲线

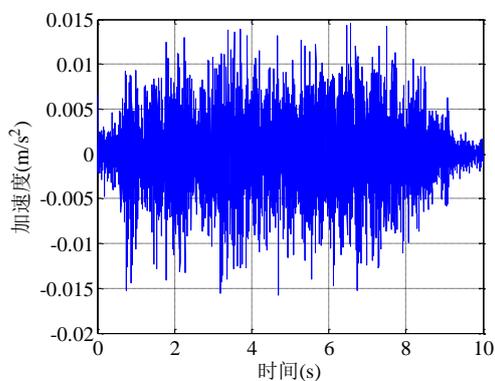


图3.48 四楼墙W中心处时程曲线

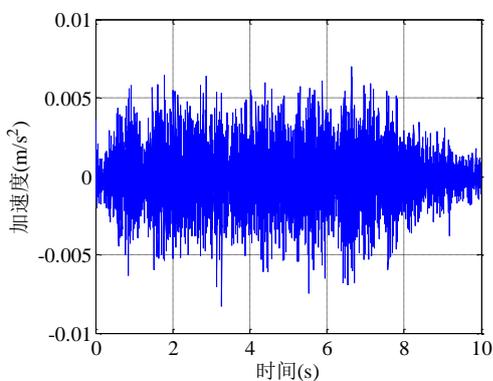


图3.49 四楼墙N中心处时程曲线

五楼楼面的不同点处的振动时程如图3.50-图3.53。

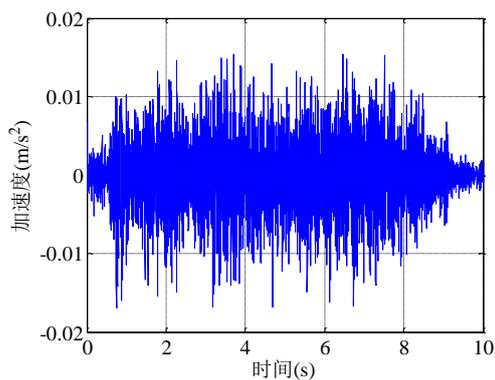


图3.50 五楼墙E中心处时程曲线

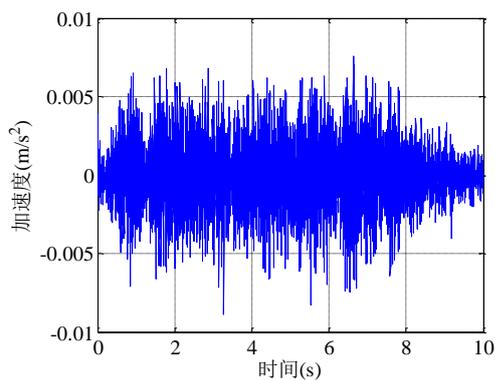


图3.51 五楼墙S中心处时程曲线

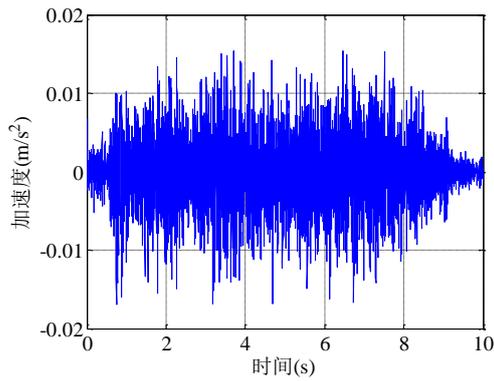


图3.52 五楼墙W中心处时程曲线

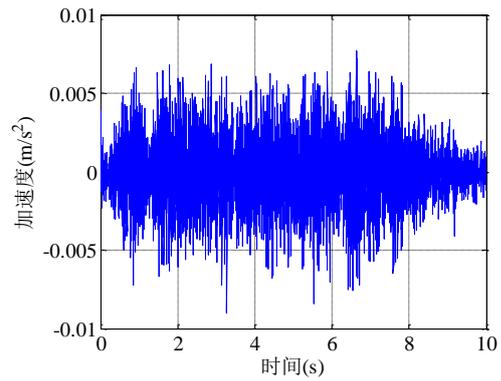


图3.53 五楼墙N中心处时程曲线

由图3.35-图3.53可以看出：墙面振动随楼层变化不明显。其中，一楼墙面振动较小，这主要因为在有限元模型中一楼墙体的底部与基础固结，导致墙体刚度较大。这基本符合实际工程情况。

在同一楼层中，平行墙体的墙面振动相差不大，外法向为x向的墙面振动较大。这是因为地面加速度时程输入时x向加速度约为y向加速度4倍，同时由于结构的空间整体受力效应，使得约为外法向为y向的墙面振动幅值的1.5-2倍。

### 3.4 有限元模型分析与实测结果比较

#### 3.4.1 时程比较

图 3.54 与图 3.55 分别给出了楼板板中处与墙面的振动加速度时程曲线。

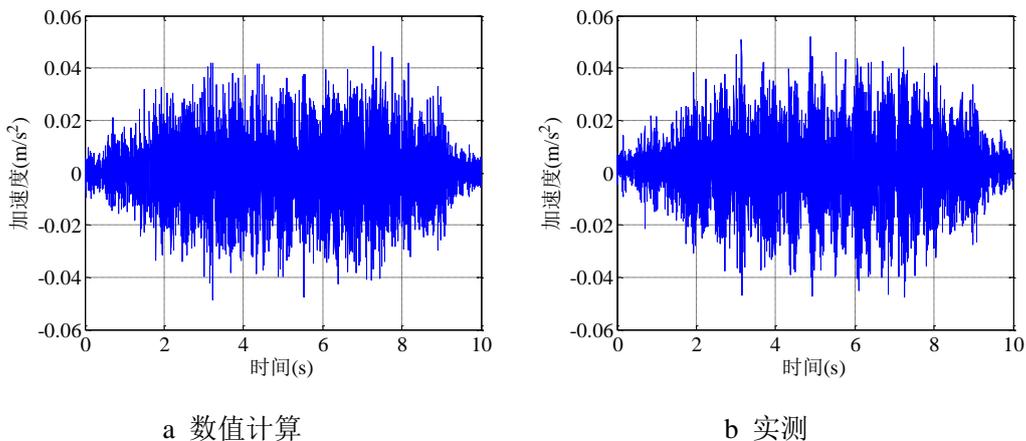


图 3.54 一楼楼板

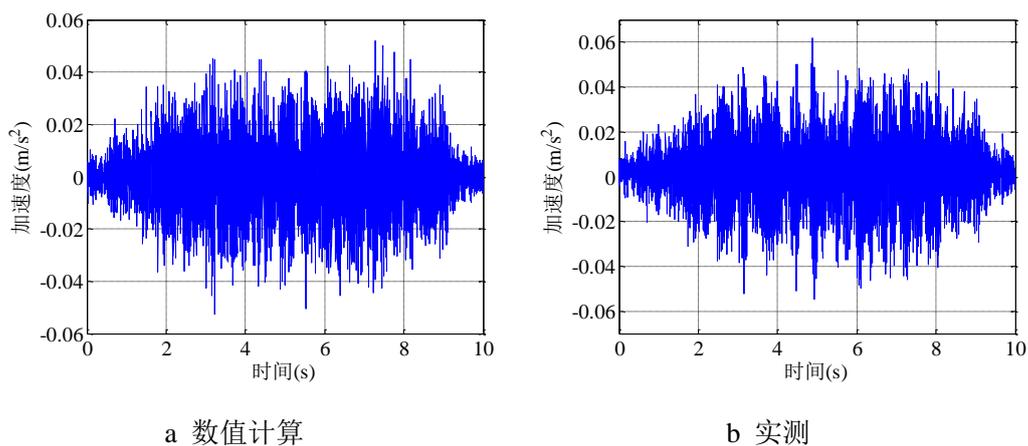


图 3.55 二楼楼板

由图3.54与图3.55可以看出：计算所得数值结果与实测数据在幅值上比较一致。二楼振动幅值比一楼约大 $0.005-0.01m/s^2$ 。

### 3.4.2 频谱比较

图3.56与图3.57给出了一楼与二楼数值计算与实测计算的频谱结果。

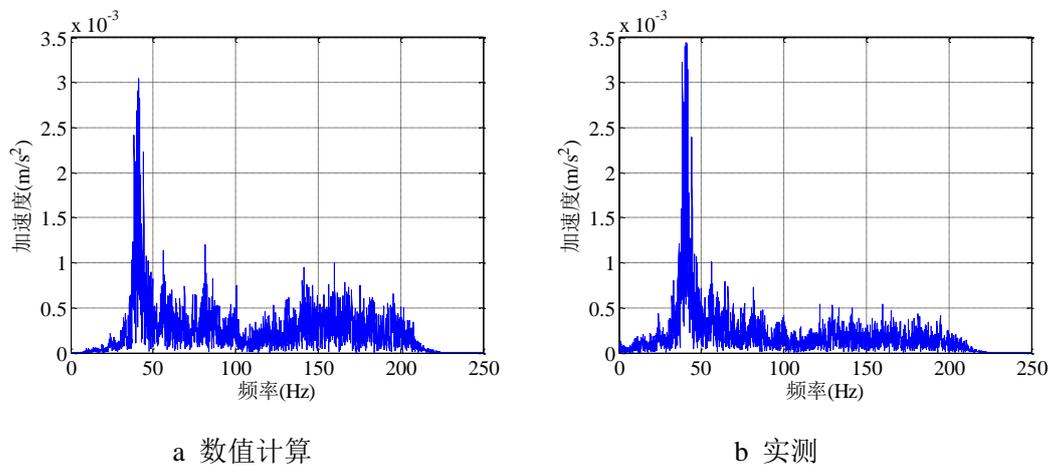


图 3.56 一楼楼板

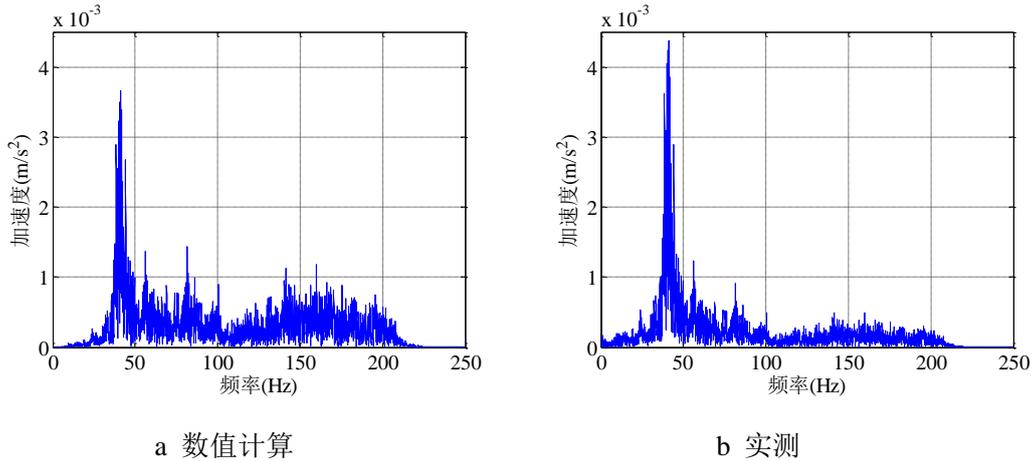


图 3.57 二楼楼板

由图3.56与图3.57可以看出：计算结果与实测结果在加速度频域上也具有一致性，二楼谱值比一楼大；此外，计算与实测加速度在频域的幅值分布也基本一致,表明地铁对地面的振动影响主要为200Hz以下，能量主要集中在于30-50Hz频率段。

### 3.4.3 三分之一倍频程分析与实测结果比较

#### 3.4.3.1 三分之一倍频程计算原理

人们往往把三分之一倍频程作为振动与噪声评价相对尺度，国内外规范中，通常把三分之一倍频程作为环境评价的衡量标准。

根据国际电工委员会（IEC）第 225 项推荐，三分之一倍频程的中心频率为：

$$F_c = 1000 \times 10^{\frac{3n}{30}} \quad (3.1)$$

其中： $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$

在实际应用中，通常都采用近似值，根据国际标准化组织（I.S.O）和我国的标准《GB3785-83 声级计的电声性能与测试方法》规定，中心频率为1Hz,1.25Hz,1.6Hz,2Hz,2.5Hz,3.15Hz,4Hz,5Hz,6.3Hz,8Hz,10Hz,.....。

每一个 1/3 倍频程的上下两端的截止频率为 $2^{1/6}$ ，并由下式确定

$$f_l = \frac{F_c}{\sqrt[6]{2}}, f_u = \sqrt[6]{2} \cdot F_c \quad (3.2)$$

由上式可知，相邻的下一个中心频率点为上一个的 $2^{1/3}$ 倍。三分之一倍频程就是在各中心频率点计算上下截止频率之间的频带内的振动加速度级别（dB）。加速度级的定义为：

$$L_a = 20 \lg \left( \frac{a}{a_0} \right) \quad (3.3)$$

其中  $a$  为竖直向振动加速度的有效值,  $a_0$  为基准加速度值, 取  $10^{-6} m/s^2$ 。  
振动加速度的有效值  $a$  为一个振动周期内瞬时值  $a_i$  的平方的均值的平方根, 即

$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_i^2(t) dt} \quad (3.4)$$

若为简谐振动,  $a = A/\sqrt{2}$ ,  $A$  为简谐振动的振幅。

而实际测量或计算的加速度通常为离散的数据, 对于离散的加速度, 由 (3.4) 容易得其有效值的表达式:

$$a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i^t)^2} \quad (3.5)$$

其中  $a_i^t$  为时域内第  $i$  个时间点的加速度。

在计算中可以把得到的某频域段的频域数据逆傅里叶变换到时间域, 而后根据式 (3.5) 进行计算。根据随机过程中离散傅里叶变换的 Parseval 定理:

$$\sum_{i=0}^{N-1} |a_i^\omega|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |a_i^t|^2 \quad (3.6)$$

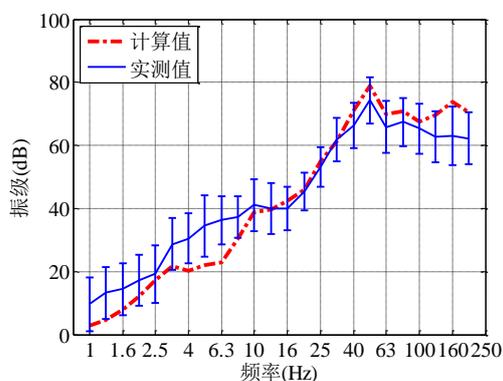
其中  $a_i^\omega$  为频域内第  $i$  个加速度。

这样我们就得到了频域内的加速度有效值的计算公式:

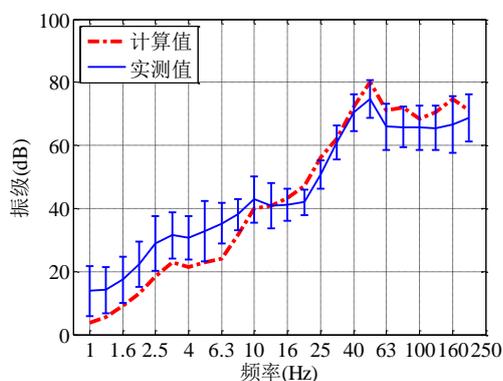
$$a = \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i^\omega)^2} \quad (3.7)$$

### 3.4.3.2 三分之一倍频程图比较

图3.58与图3.59分别给出了不同楼层室内振动的三分之一倍频程曲线。



3.58 一楼数值结果与实测结果比较



3.59 二楼数值结果与实测结果比较

由图3.58与图3.59可知：数值模拟三分之一倍频程结果与实测结果基本一致。具体而言，数值模拟结果在1-12.5Hz范围振级偏小，在16-200Hz范围与实测结果基本吻合，这主要因为在有限元模型分析中，振动输入低频成分较少；同时，在实测中，低频段部分受到干扰较大，实测结果本身包括干扰成分，使得结果偏大。

### 3.4.4 计算结果振级比较

#### 3.4.4.1 振级评价标准 $VL_z$

根据《人体全身振动暴露的舒适性降低界限和评价准则》的有关条款，振动对人体影响的主要频率范围为1-80Hz，在三分之一倍频程的基础之上，GB/T50355-2005《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》可以根据公式(3.8)来确定振级：

$$VL_z = 10 \lg \left[ \sum_{i=1}^{20} 10^{(a_i - W_i)/10} \right] \quad (3.8)$$

其中 $a_i$ 为根据公式(3.5)或(3.7)计算得的第*i*个中心频率的振级； $W_i$ 为该频率上竖直方向的计权因子，如表3.3。

表 3.3 竖直方向计权因子

|                |    |      |     |    |     |      |    |    |     |    |
|----------------|----|------|-----|----|-----|------|----|----|-----|----|
| <i>i</i>       | 1  | 2    | 3   | 4  | 5   | 6    | 7  | 8  | 9   | 10 |
| 1/3 倍频程中心频率    | 1  | 1.25 | 1.6 | 2  | 2.5 | 3.15 | 4  | 5  | 6.3 | 8  |
| 计权因子 ( $W_i$ ) | 6  | 5    | 4   | 3  | 2   | 1    | 0  | 0  | 0   | 0  |
| <i>i</i>       | 11 | 12   | 13  | 14 | 15  | 16   | 17 | 18 | 19  | 20 |
| 1/3 倍频程中心频率    | 10 | 12.5 | 16  | 20 | 25  | 31.5 | 40 | 50 | 63  | 80 |
| 计权因子 ( $W_i$ ) | 2  | 4    | 6   | 8  | 10  | 12   | 14 | 16 | 18  | 20 |

一列列车通过的时间通常为10秒左右，为了更精确描述这个10秒内振动对人的影响，在HJ453-2008《环境影响评价技术导则——城市轨道交通》中，对于

运营期间城市轨道交通环境影响评价引起的环境振动来评价范围内振动环境保护目标室外环境符合相关标准，现状评价使用 $VL_z$ ，预测评价使用铅垂向Z振级 $VL_{z10}$ 、 $VL_{zmax}$ 。

根据GB 10071-88中规定的时间计权常数为1s，列车经过时段的时程结果按1s的时间长度分成几段，对每一段时程进行1/3倍频程分析，取每次列车经过时段的 $VL_z$ 的最大值作为该次列车通过时的 $VL_{zmax}$ 值。

#### 3.4.4.2 振级比较

表3.4为数值模拟与实测的 $VL_{zmax}$ 比较。

表 3.4 数值模拟与实测的  $VL_{zmax}$  比较

| 楼层 | 数据类型 | $VL_{zmax}(dB)$ | $VL_{zmax}$ 标准差(dB) |
|----|------|-----------------|---------------------|
| 一层 | 计算   | 69.31           |                     |
|    | 实测   | 68.43           | 2.13                |
| 二层 | 计算   | 70.21           |                     |
|    | 实测   | 69.18           | 2.07                |

由表3.4可知，数值计算的振动振级结果基本吻合；二楼振级比一楼大，且数值计算结果基本在实测结果的变化范围之内。说明该计算方法在一定精度下可以用于建筑物楼板振级的预测分析。

### 3.5 本章小结

应用地铁地面振动实测加速度时程作为输入，建立建筑物三维分析模型，对结构楼面与墙面的振动特性进行时程与频谱分析；同时，将数值模拟得到的结构响应与实测数据进行比较。通过上述分析得到如下结论：

(1)对于不同楼层，二楼加速度振动最大，其余各楼层的振动随着楼层的增加而减少；对于同一楼层，楼板板中比楼板角点振动明显；楼板板中与角点处的三分之一倍频程的变化趋势基本相同，楼板板中的振级高于楼板角点处；楼板不同位置的振动特性基本不受楼层变化的影响。

(2)建筑物楼板的有限元数值模拟分析结果与实测结果比较可知：二者在振幅、频域分布于三分之一倍频程分析呈现一致性。可见，计算方法在一定精度下可以用于建筑物楼板振级的预测分析。

## 第四章 地铁运行引起建筑物室内辐射噪声数值分析

### 4.1 引言

随着我国各大城市地铁交通的迅猛发展，地铁引起房屋二次辐射噪声已日益得到公众的重视。上海、北京等地区的地铁已多次遭沿线居民关于地铁噪声问题的投诉。

目前，我国已制定了相关标准，给出了建筑物二次结构噪声的相关限值和测量方法为地铁建设项目环境影响评估提供了参考。国际上，对噪声评价还未颁布统一的相关标准，仅有美国公共运输协会在“轨道运输设计指南”中、英国伦敦地铁公司在“关于噪声与振动备忘录”中给出了有关建议标准，其评价量均采用  $L_{A,max}$ ，测点位于房间中部。其中英国建议标准对于居民集中建筑物内的限值为  $L_{A,max} \leq 40$  dB, 美国调查结果表明：当  $L_{A,max} > 45$  dB 时，居民主观反应影响较大。鉴于上述标准的使用范围与我国地铁运输系统相近，故在评价因地铁振动引起的建筑物内二次辐射噪声影响时，可参考该标准限值。

近年来，噪声预测使用较多的是利用 Kurzweil<sup>[4]</sup>的经验公式，但是，该公式仅使用与建筑物底层室内二次噪声预测，而且建筑物室内二次结构噪声响应与建筑物自身特性密切相关。所以，预测公式存在一定的局限性。

本章建立了建筑物室内声场边界元数值模型，以第三章求得的建筑物楼面与墙面的振动响应为边界条件，分析室内二次结构噪声响应以及声场分布特性。Welker<sup>[30]</sup>通过实测分析得出地铁振动引起的建筑物二次辐射噪声的频率范围一般在20-200Hz，本章将对16-250Hz频率内的噪声特性进行频域分析，并与实测结果进行比较。

### 4.2 室内二次辐射噪声实测基本条件

在房屋振动实测的同时，测量室内的二次辐射噪声。根据JGJ/T 170-2009和HJ453-2009的规定：将测点布置在居室中噪声较高、距地面1.2-1.5m处；为了防止户外噪声影响，测量时关闭门窗；在昼间和夜间，各选一段时间进行测量，同时测量持续时间应不少于1小时；同时保证测量时间内单向通过的列车不应少于5列。噪声测试的房间尺寸为4200mm×3600mm×2800mm；室内无装修，墙面与地面的表面均为混凝土面层。

## 4.3 地铁引起室内二次辐射噪声数值模拟分析

### 4.3.1 Virtual. Lab 室内声场分析模型

#### 4.3.1.1 Virtual. Lab软件介绍

Virtual. Lab是由LMS公司开发的，基于CATIA V5平台的集成仿真CAE平台；主要有声学、耐久性、动力学、振动、有限元和优化等工程模块。Virtual. Lab中创建的结构或声学网格可以兼容Nastran和Ansys单元，也可以直接导入Nastran和Ansys有限元模型，进行各种有限元模型计算。

Virtual. Lab声学模块是在集成SYSNOISE的基础上开发的一套专门用于声学仿真计算工具。它提供了声学有限元、声学边界元和ATV计算声场的方法，可以在时域或频域中求解。声学模块还提供其他分析功能，如随即声学、传递路径函数分析、气动声学、多级边界元。同时，Virtual. Lab声学模块可以计算辐射声场的声学响应，如声压、声强及声功率等。辐射声场可以是由结构振动引起的，可以使由声源引起的，也可以二者均有。声学模块能预测声波辐射、散射、折射和传递以及声荷载引起的声学响应。根据分析类型不同，可以建立非耦合和耦合声学模型。其中，声场中的流体材料可以是均值或多质流体。

#### 4.3.1.2 Virtual. Lab声学模型

在Virtual. Lab中导入声场边界元模型，为了满足单元尺寸满足小于计算频率最短波长 $1/6$ 的划分条件，声场边界元的最大尺寸为20cm。由于计算封闭声场分布，故计算方法可采用直接边界元法。声场分析基本流程如图4.1。

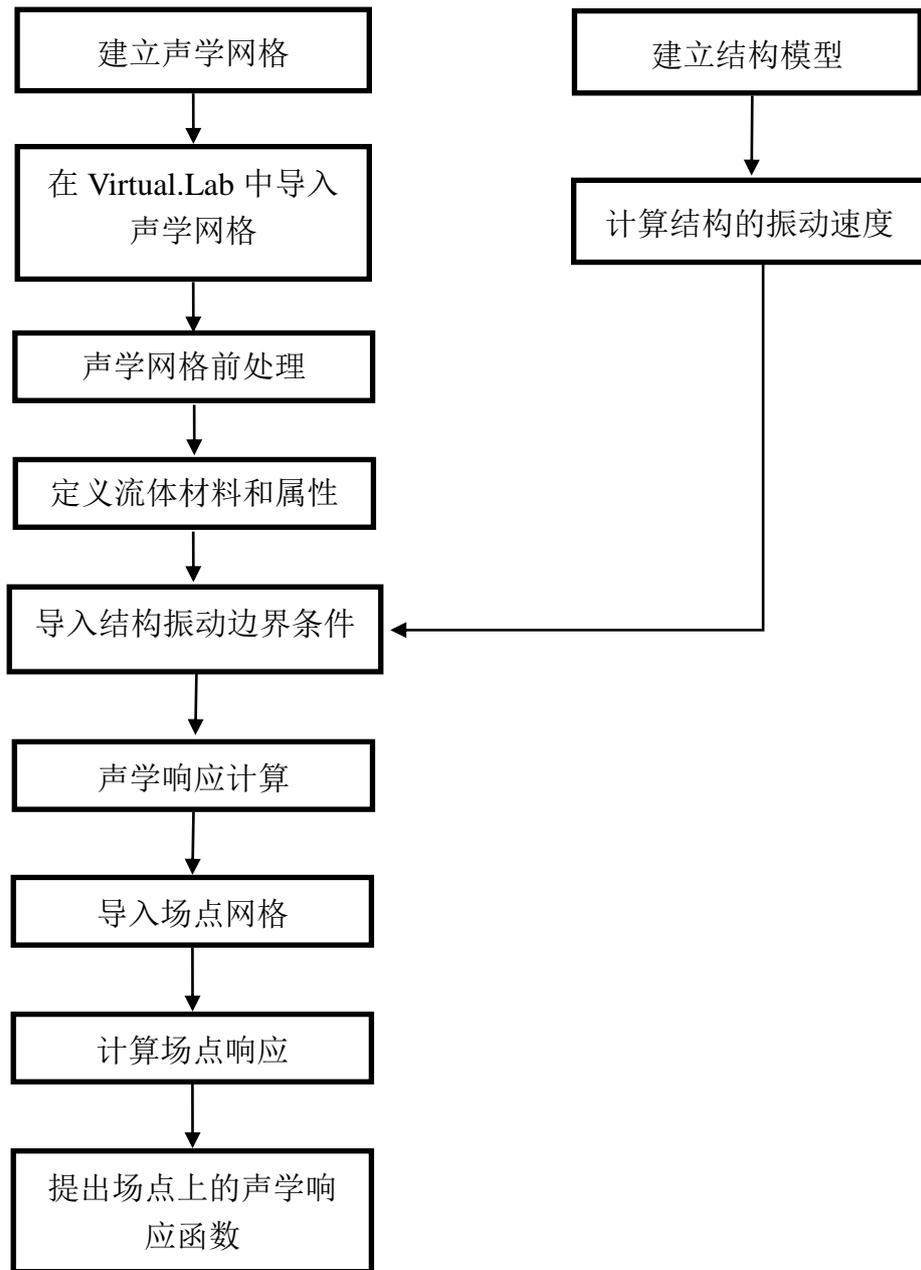


图4.1 声场计算流程图

声场计算主要参数如表4.1。

表4.1 声场主要计算参数

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| 总体尺寸(长×宽×高) | 4.2m×3.6m×2.8m          |
| 空气中声速       | 340m/s                  |
| 空气密度        | 1.225kg/ m <sup>3</sup> |
| 楼板材料密度      | 2500 kg/ m <sup>3</sup> |
| 分析频率范围      | 16-250Hz                |

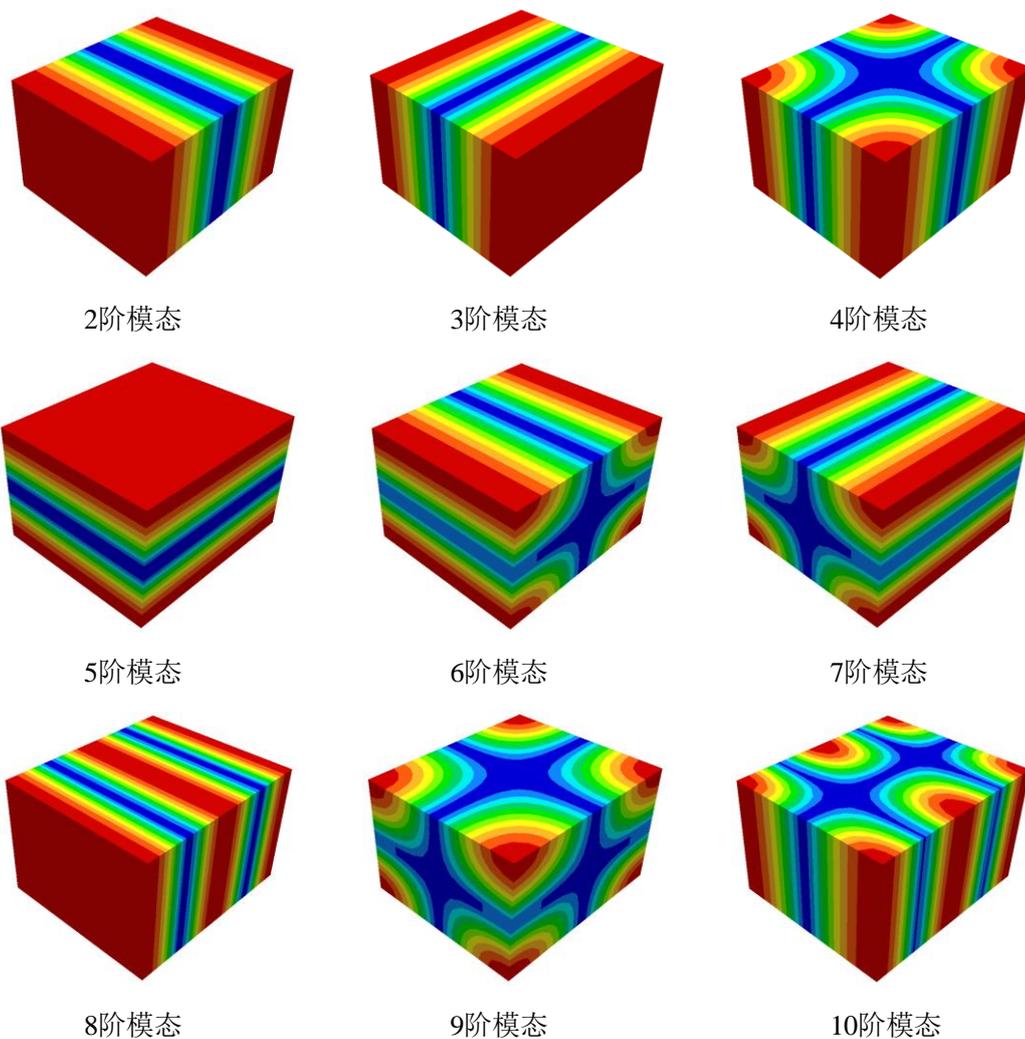
## 4.3.2 声场的声频率与声模态

声场的声频率如表4.2。

表4.2 声频率表

|        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 阶数     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| 频率(Hz) | 40.78  | 47.22  | 62.20  | 65.38  | 76.90  | 80.65  | 80.95  |
| 阶数     | 9      | 10     | 12     | 15     | 20     | 30     | 40     |
| 频率(Hz) | 90.24  | 93.72  | 102.75 | 114.87 | 130.75 | 153.82 | 174.57 |
| 阶数     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     | 100    |        |
| 频率(Hz) | 193.08 | 203.85 | 215.57 | 229.65 | 241.86 | 249.18 |        |

声模态信息如图4.3。



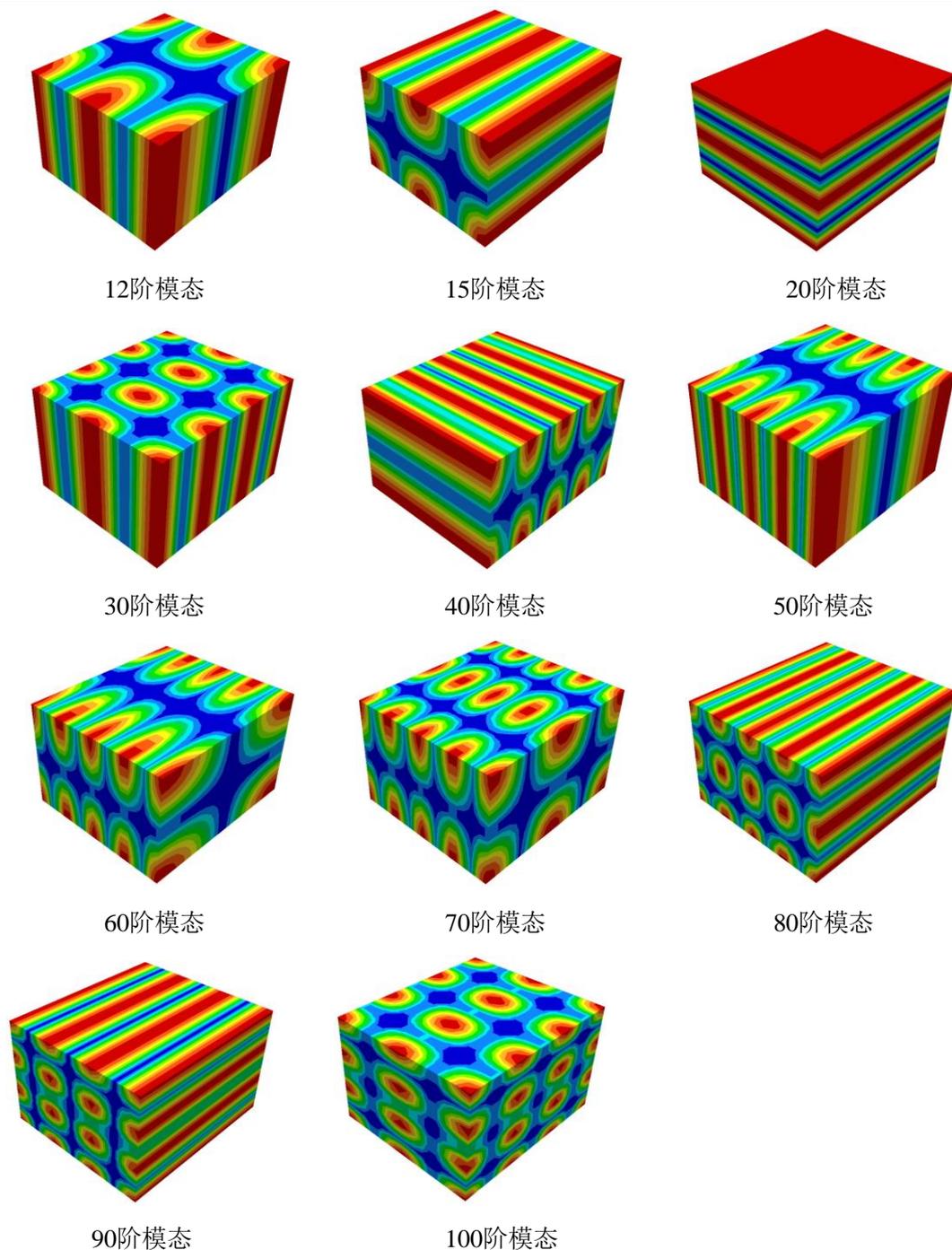
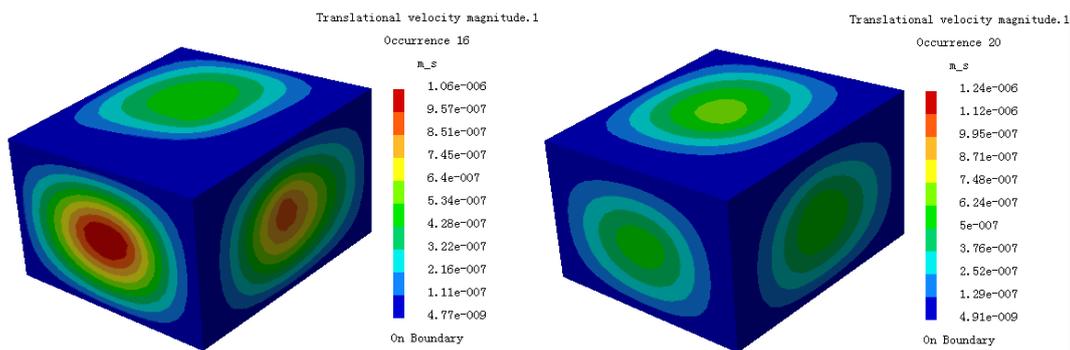


图4.2 声学模态图

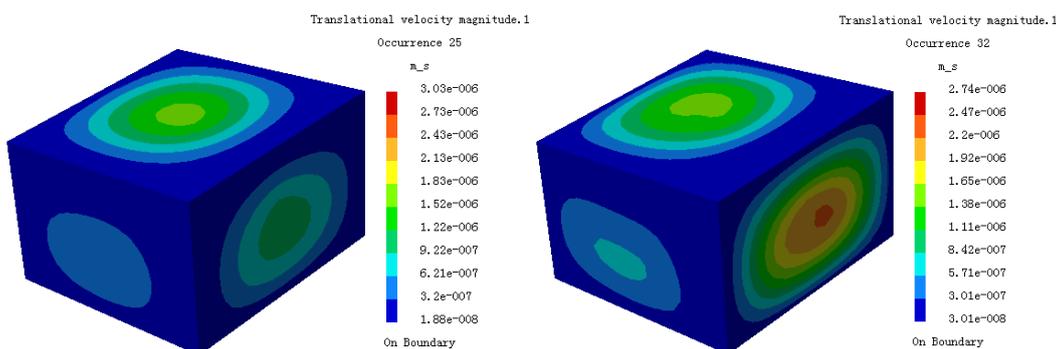
### 4.3.3 声场速度边界条件

首先，计算建筑物一楼室内声场分布情况。通过结构有限元模型，计算房间楼面与墙面的速度场，将此速度场作为声场计算的边界条件。其中，16-250Hz范围内1/3倍频程中心频率点的声场边界的速度场云图如图4.3。



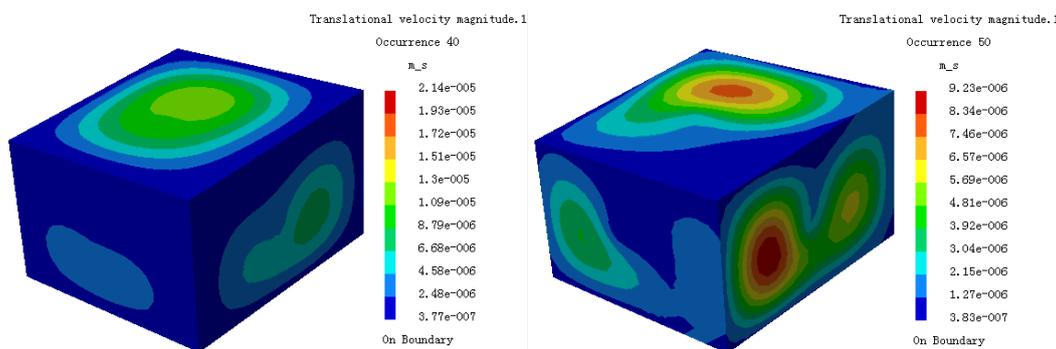
f=16Hz

f=20Hz



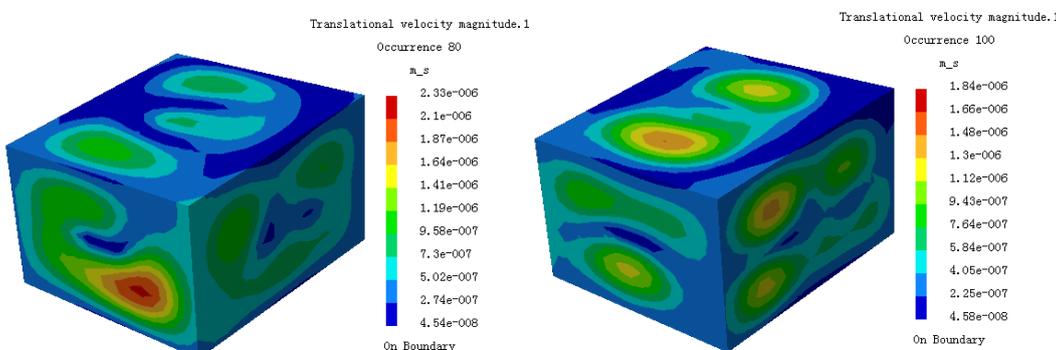
f=25Hz

f=32Hz



f=40Hz

f=50Hz



f=80Hz

f=100Hz

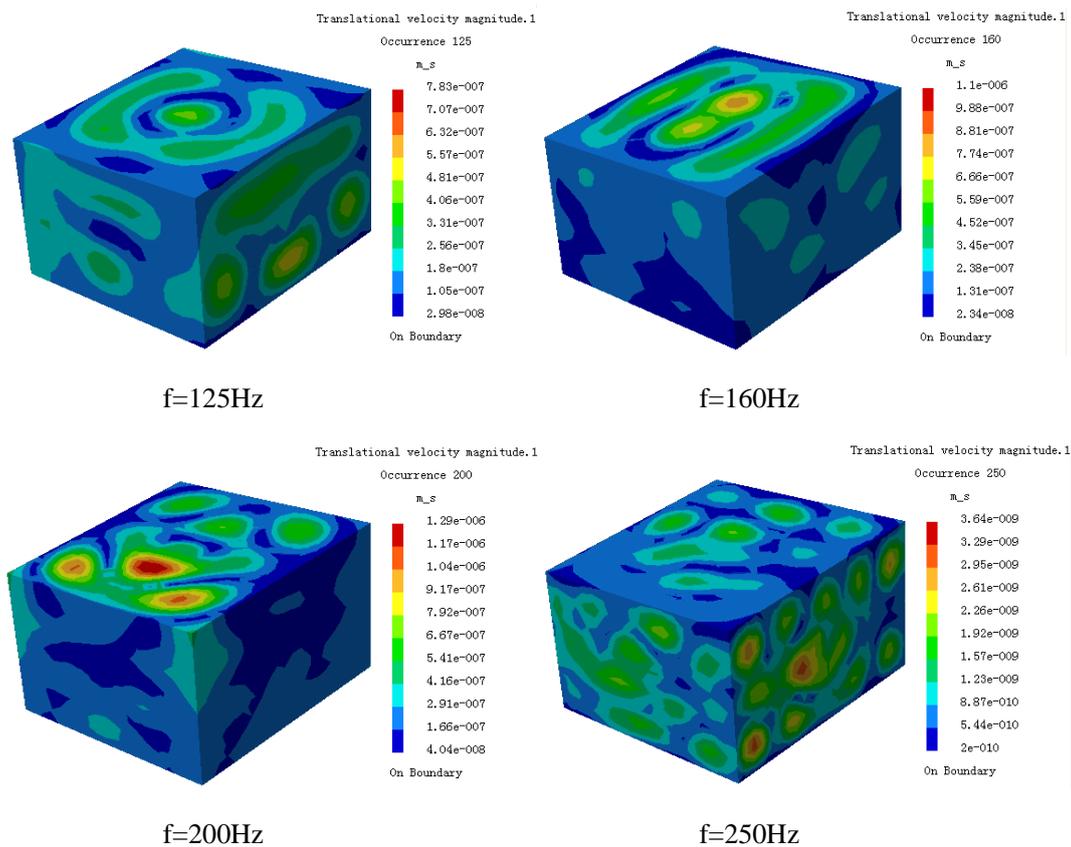


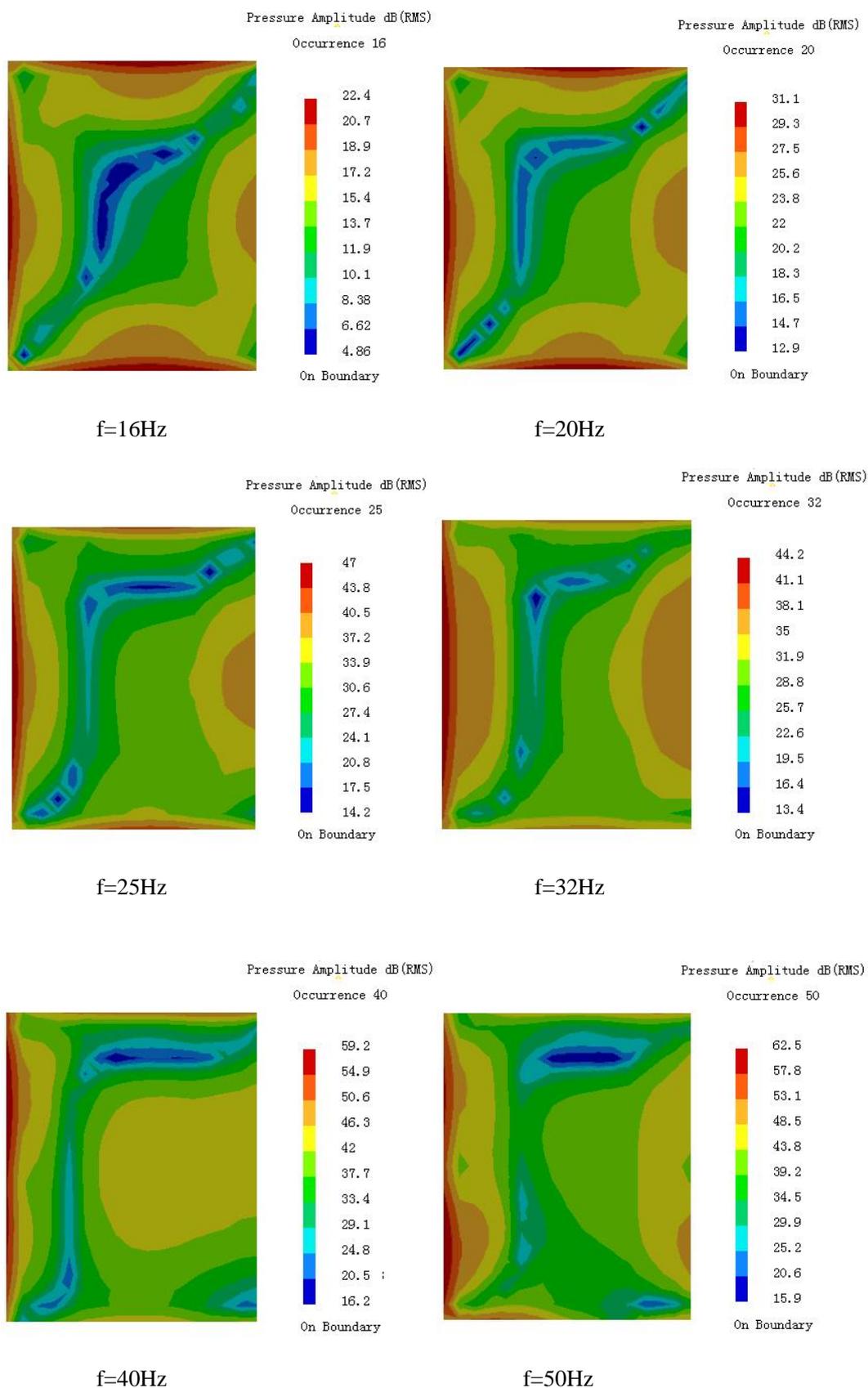
图4.3 声场边界的速度场云图

#### 4.3.4 建筑物室内声学响应分析

为了分析建筑物室内噪声级和声场分布，在距地面1.2m高，建立与楼面平行的水平场点。声场计算采用直接边界元法，分析频率范围为16-250Hz。

4.3.4.1 声场场点分布特性

16-250Hz范围内1/3倍频程中心频率点的声场场点声压分布如图4.3。



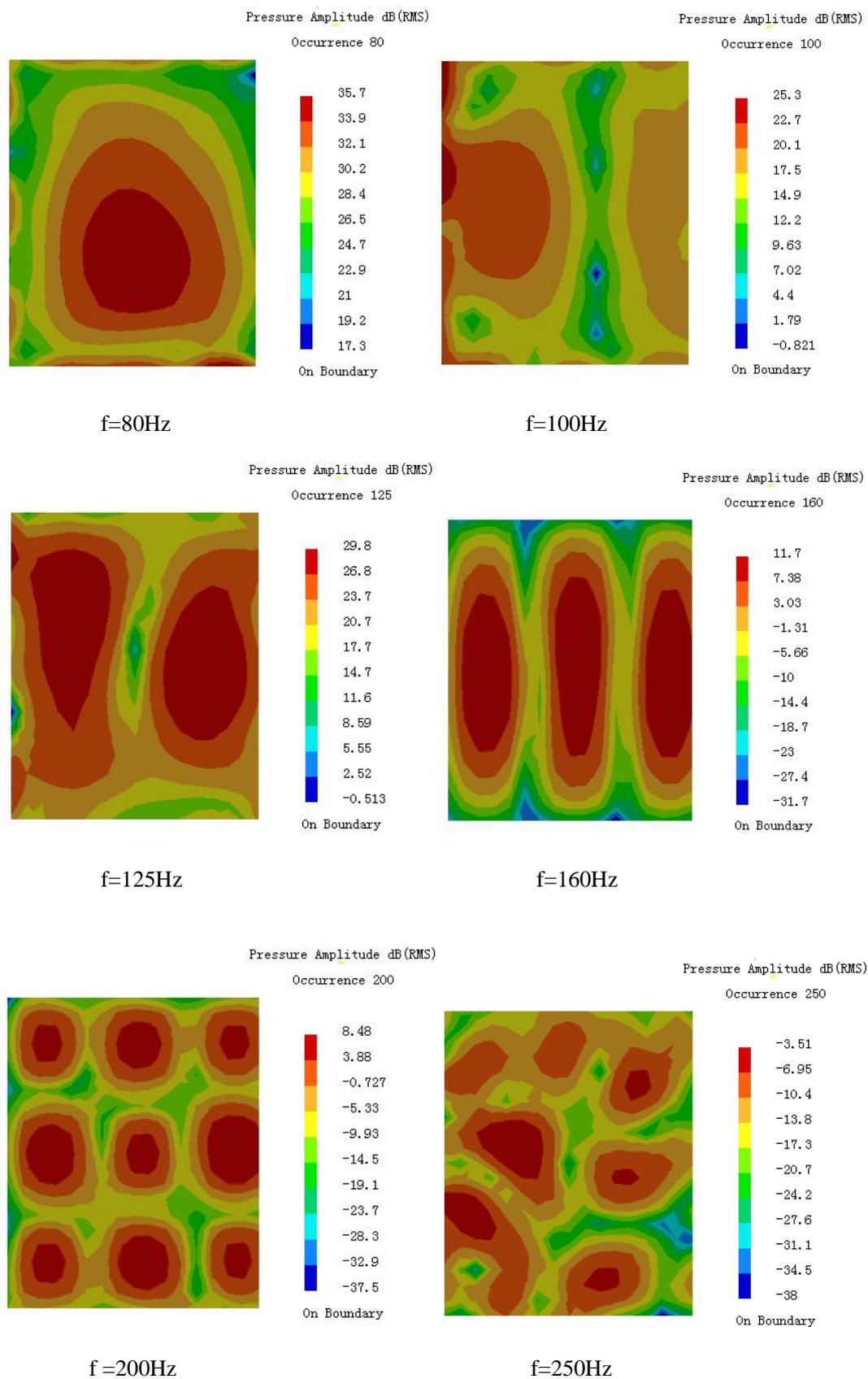


图4.4 声场场点声压级云图

## 4.3.4.2 声场场点频域特性

根据声场场面的分布特性，提取场点中心处的声压响应曲线，并对其进行三分之一倍频程分析，结果如图4.5：

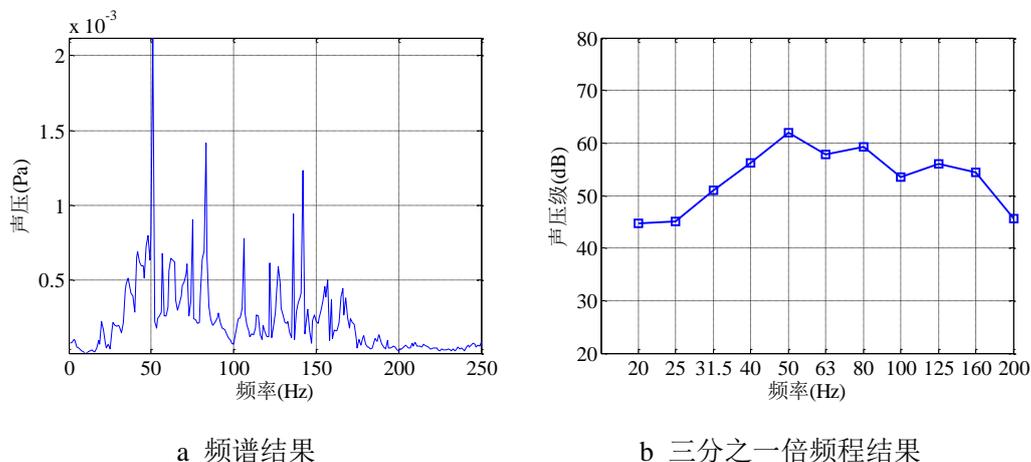


图 4.5 一楼室内测点声压频谱特性

由图4.5可见，数值模拟的一楼场点声压响应曲线主要集中在40-200Hz的频率范围。

对该建筑物的其他楼层进行声场与声压级分析，数值模拟得到的三分之一倍频程曲线如图4.6。

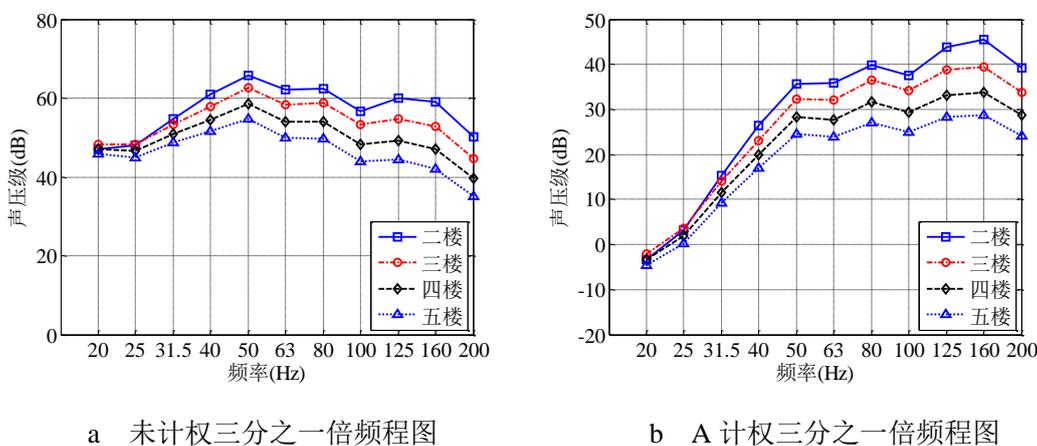


图 4.6 二楼-五楼室内测点声压级 1/3 倍频程曲线

由图4.6可知：二楼-五楼室内声压数值结果随着楼层的增加而减小；其中中心频率点为160Hz的声压级随楼层变化较大，基本相邻楼层相差5dB。

## 4.4 数值模拟分析与实测结果比较

### 4.4.1 三分之一倍频程比较

图4.7与图4.8分别给出了不同楼层的数值模拟与实测声压级三分之一倍频程曲线。

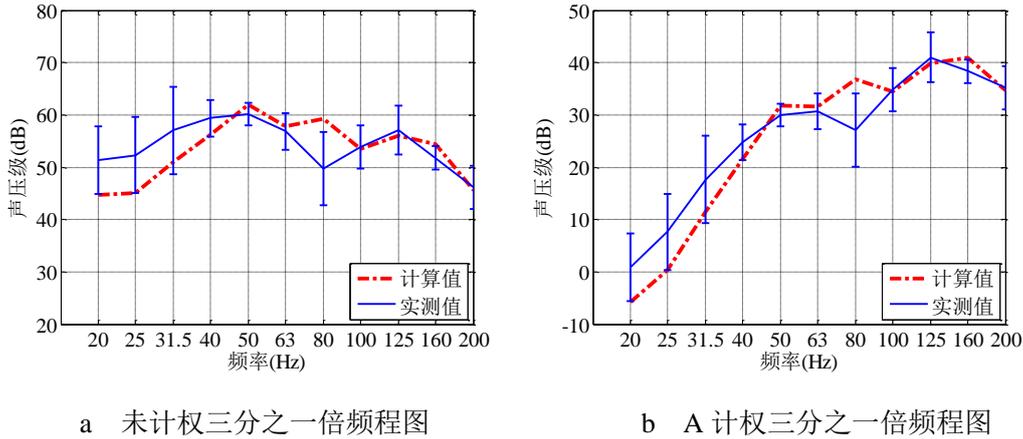


图 4.7 一楼楼板数值模拟与实测声压级三分之一倍频程

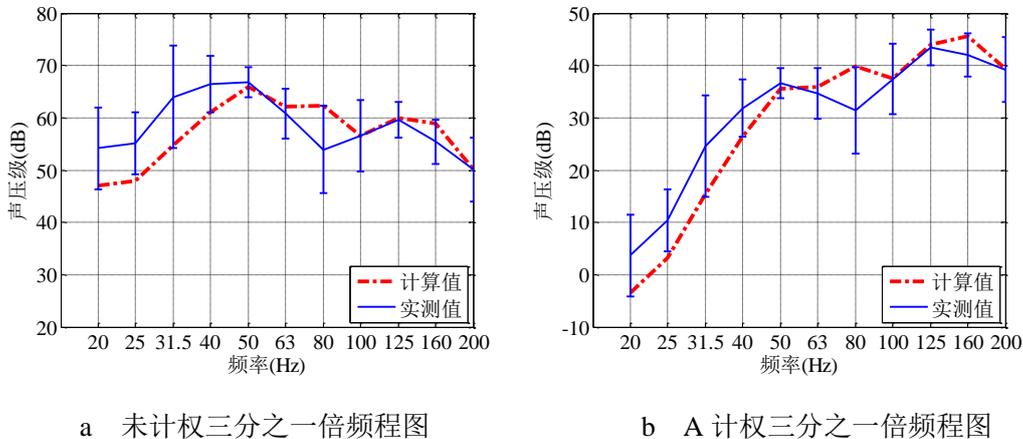


图 4.8 二楼楼板数值模拟与实测声压级三分之一倍频程

由图4.7与图4.8可知，数值模拟声压三分之一倍频程与实测结果基本一致。在20-40Hz，数值模拟结果偏小，在50-200Hz，二者基本吻合。这主要因为在低频范围，振动数值模拟结果，低频响应较小；同时，由于背景噪声主要集中在低频范围内，使得噪声实测中，低频段的声压级测试结果较真实值偏大。对不同楼层进行比较可知，二楼声压级比一楼大，数值计算结果基本在实测结果的变化范围之内。

## 4.4.2 等效连续声级比较

### 4.4.2.1 等效连续A声级

考虑人耳对噪声强度与频率和时间的主观感受时，通常采用等效连续A声级。其定义为：在声场中的某定点位置，取一段时间内能量平均的方法，将间歇的几个不同的A声级噪声，用一个在相同的时间内声能与之相等的连续稳定的A声级来表示该段时间噪声的大小。表示为：

$$L_{A,eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt \quad (4.1)$$

式中： $L_{A,eq}$  为等效连续 A 声级； $T$  为噪声暴露时间； $L_A$  为在  $T$  时间内 A 随机变化的瞬时值。

### 4.4.2.2 等效连续A声级比较

表4.3给出了数值模拟与实测噪声在20-200Hz的等效连续A声级。

表4.3 数值模拟与实测等效连续A声级

| 楼层 | 数据类型 | $L_{A,eq}$ (dB) | $L_{A,eq}$ 标准差(dB) |
|----|------|-----------------|--------------------|
| 一层 | 计算   | 45.54           |                    |
|    | 实测   | 45.36           | 1.75               |
| 二层 | 计算   | 47.63           |                    |
|    | 实测   | 46.26           | 1.32               |

由表4.3可知：数值计算的等效计权A声级与实测结果基本吻合；二楼比一楼大，且数值计算结果基本在实测结果的变化范围之内。说明该计算方法在一定精度下可以用于建筑物二次辐射噪声室内声压级的预测分析。

## 4.5 本章小结

应用第三章有限元模型分析得出的建筑物室内振动为输入，建立室内声场模型，采用直接边界元对室内声场分布、实测点的声压级进行频谱分析；同时，将数值模拟得到的声压响应与实测数据进行比较。通过上述分析得到如下结论：

(1) 对于不同楼层，二楼声压级最大，其余各楼层随着楼层的增加呈现下降趋势。

(2) 建筑物室内声场的有限元数值模拟分析结果与实测结果比较可知：二者在频域分布分析与等效声压级上呈现一致性。可见，计算方法在一定精度下可以用于建筑物楼板振级的预测分析。

## 第五章 不同轨道支承减振降噪性能比较分析

地铁的振动传播过程分为振源、传播路径和振动接受三个部分。目前，控制振源是最有效的减振措施<sup>[41]</sup>。Nelson<sup>[42]</sup>通过研究表明：地铁运营引起的振动振源部分主要包括车轮与铁轨的粗糙度、轨道线路设计、轨道的支承方式以及轨道支承的刚度大小等因素。改善轨道的支承方式可以达到有效控制振源的目的。轨道支承刚度是影响轮轨系统动力特性的重要参数，也是地铁减振中的重要控制参数。刘学毅<sup>[44]</sup>通过分析不同的轨道支承刚度以及扣件与道床的刚度比，进而达到优化轨道的动力学特性目的。吴建忠<sup>[45]</sup>对两种轨道支承的减振性能进行落锤减振试验研究，结果表明弹性支承块轨道结构优于DTVII-2型扣件的减振效果。

我国《地铁设计规范》中，将地铁减振轨道支承划分为一般减振结构、较高减振轨道结构和特殊减振轨道结构三个等级。一般减振轨道支承采用无缝线路、弹性扣件、整体道床等结构形式；较高减振轨道支承采用轨道减振器扣件、弹性短轨枕式整体道床或其他较高减振轨道结构形式；特殊减振轨道结构采用浮置板；特殊减振轨道支承采用浮置板整体道床、新型轨道减振扣件或其他特殊轨道减振结构。

为满足不同等级地铁减振的需要，轨道支承通常采用DTIII型扣件、弹性支承块结构和先锋扣件等形式。本章以第三章和第四章的结构模型和声场模型为基础，对比分析以上三种轨道支承形式下地铁引起建筑物振动及二次辐射噪声响应，以及弹性支承块结构与先锋扣件减振降噪效果。

### 5.1 三种轨道支承形式

#### 5.1.1 DTIII-2 型扣件

DTIII-2型扣件是无挡肩、全弹性分开式扣件。采用有螺栓 $\varnothing 13$ 国铁I型弹条，在钢轨和铁垫板下均设有绝缘橡胶板，结构形式如图5.1。该扣件为二阶减振，适用于60kg/m的钢轨及整体道床一般的地段。DTIII-2型扣件的竖向刚度为20kN/mm-40kN/mm。

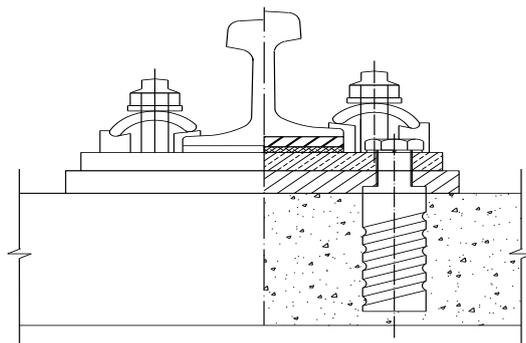


图5.1 DTIII-2型结构图

### 5.1.2 弹性支承块结构

弹性支承块轨道结构，又称低振动轨道结构。弹性支承块式轨道结构由弹性支承块、道床板和混凝土底座构成，如图5.2。弹性支承块由橡胶垫包裹的钢筋混凝土支承块以及块下弹性垫板组成。橡胶垫与支承块下弹性垫板有一定的厚度，其中橡胶垫板为沟槽形。道床板由浇灌混凝土和道床将弹性支承块为嵌固联接。弹性支承块结构的竖向刚度为 $12\text{kN/mm}$ - $20\text{kN/mm}$ 。

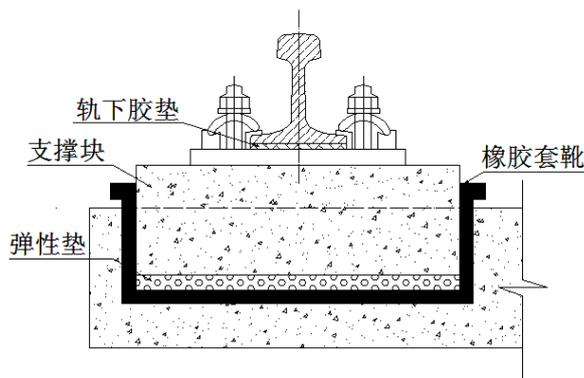


图5.2 弹性支承块结构图

### 5.1.3 先锋扣件

先锋扣件是一种新型扣件系统。钢轨通过弹性橡胶楔块支撑轨头支承轨腰两侧，使得钢轨工作时轨底处于悬空状态，结构形式如图5.3。该扣件动态刚度较小，列车驶过下的竖向位移解可达 $3\text{mm}$ 以上；由于与轮轨之间的相互作用更靠近轮轨接触线，因而能将钢轨的扭动降低到较小程度。先锋扣件的竖向刚度为 $4\text{kN/mm}$ - $6\text{kN/mm}$ 。

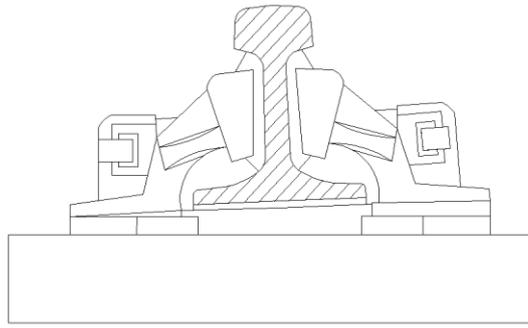


图5.3 先锋扣件结构图

## 5.2 三种轨道支承减振效果分析

### 5.2.1 三种扣件下实测地面振动比较

图5.4-图5.6为三种轨道支承下，实测建筑物地面振动加速度。

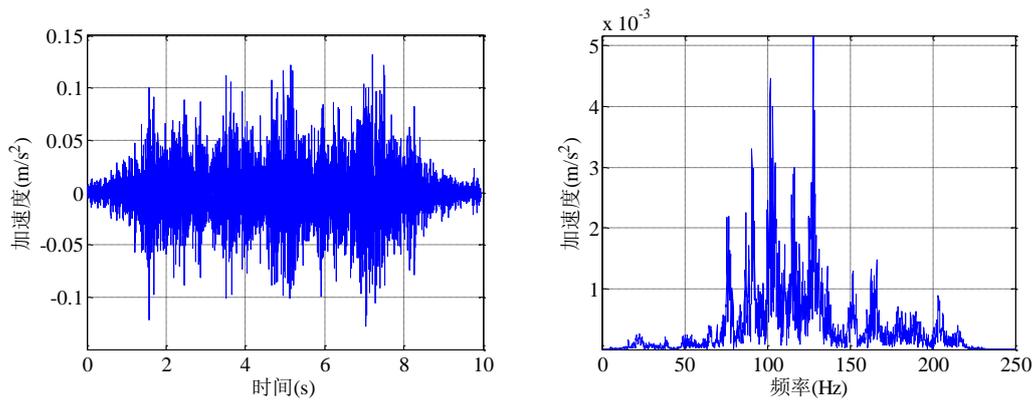


图 5.4 DTIII-2 型扣件下地面振动图

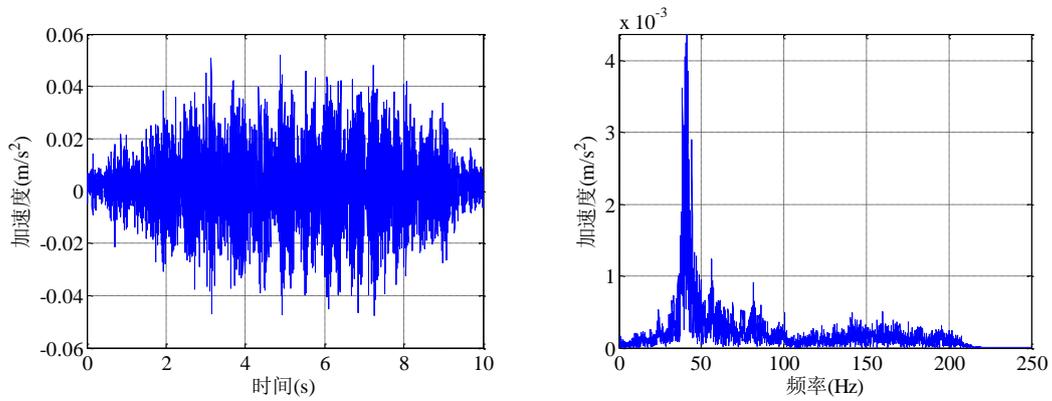


图 5.5 弹性支承块下地面振动图

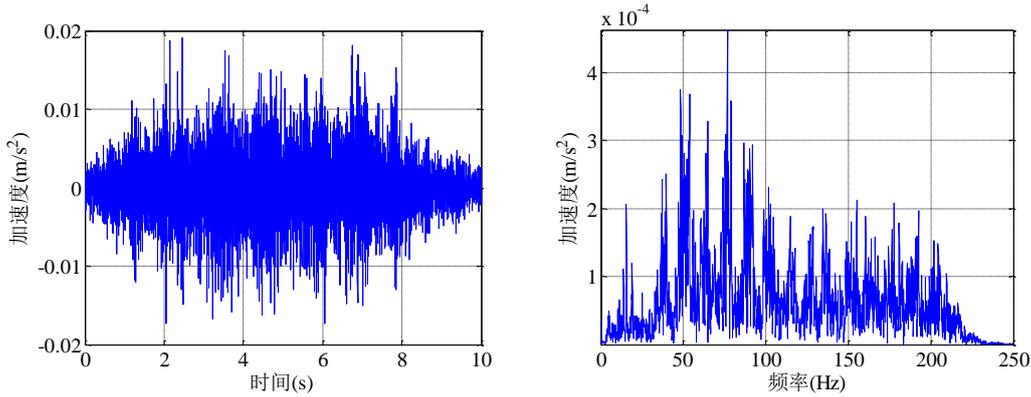


图 5.6 先锋扣件下地面振动图

由图5.4-图5.6可以看出：时域中，安装DTIII-2型减振扣件、弹性支承块及先锋扣件三种情况下，室内竖向振动加速度峰值分别为 $0.131\text{m/s}^2$ 、 $0.058\text{m/s}^2$ 及 $0.025\text{m/s}^2$ 。频域中，DTIII-2型减振扣件下，振动能量主要集中在60-145Hz和150-200Hz两个范围内；弹性支承块下，振动能量主要集中在40-55Hz范围内；先锋扣件下，振动能量在40-200Hz范围内分布较为平均，且频谱幅值远小于以上两种轨道支承。

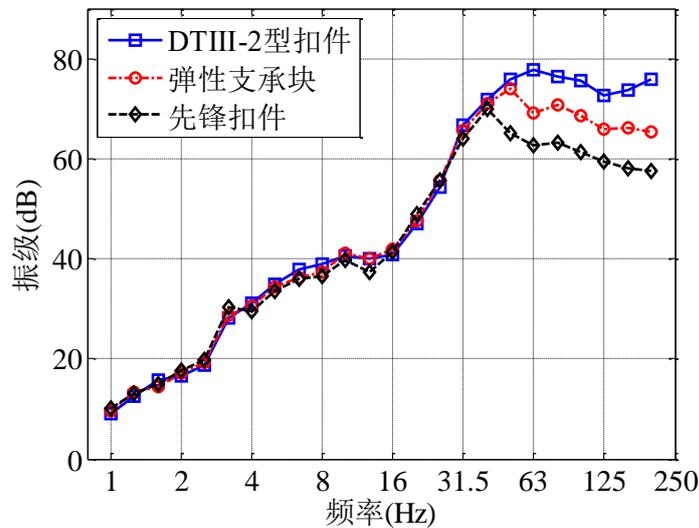


图 5.7 三种扣件下实测建筑物地面振动加速度 1/3 倍频程

由图5.7可以看出：三种轨道支承下地铁引起的振动能量主要分布于40Hz以上的频率范围；在1-40Hz范围内，三种轨道支承下地面振级的相差很小，这与Dawn<sup>[43]</sup>的研究结果一致。同时，由于三种轨道支承的减振工作频率不同，DTIII-2型扣件、弹性支承块结构的第一个峰值点分别出现在63Hz、50Hz；可见两者的工作频率分别在60Hz左右和50Hz左右；先锋扣件的峰值点出现在40Hz，可见先锋扣件的工作频率更低，约为40Hz。

三种轨道支承下地面振动测试 $VL_{zmax}$ 统计结果如表1。

表5.1 不同轨道支承下地面振动 $VL_{zmax}$ 比较

| 轨道支承      | $VL_{zmax}$ 均值(dB) | $VL_{zmax}$ 标准差(dB) |
|-----------|--------------------|---------------------|
| DTIII-2扣件 | 74.24              | 2.76                |
| 弹性支承块     | 68.43              | 2.13                |
| 先锋扣件      | 61.15              | 1.62                |

从表5.1中可以看出：相对于DTIII-2扣件，弹性支承块结构的地面减振效果为5.2dB左右；先锋扣件的地面减振效果为13.5dB左右。

### 5.2.2 三种扣件下建筑物室内振动数值模拟结果比较

将建筑物在三种轨道支承下的地面振动加速度作为激振输入，对建筑物进行有限元模型分析，计算各楼层楼板板中处的加速度振级。

#### 5.2.2.1 三种扣件下各楼层三分之一倍频程比较

图5.8-图5.12给出了三种轨道支承下，数值模拟得到的各楼层室内振动加速度三分之一倍频程结果。

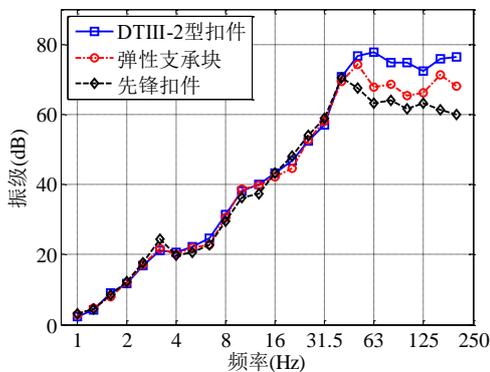


图5.8 一楼楼板振动1/3倍频程比较图

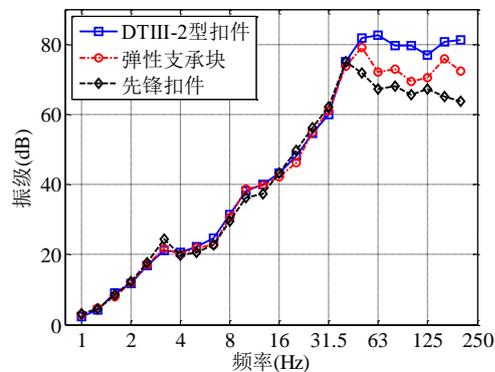


图5.9 二楼楼板振动1/3倍频程比较图

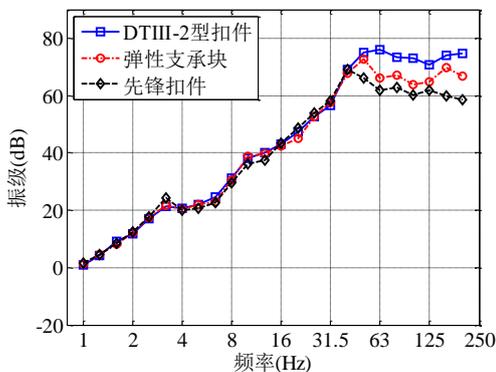


图5.10 三楼楼板振动1/3倍频程比较图

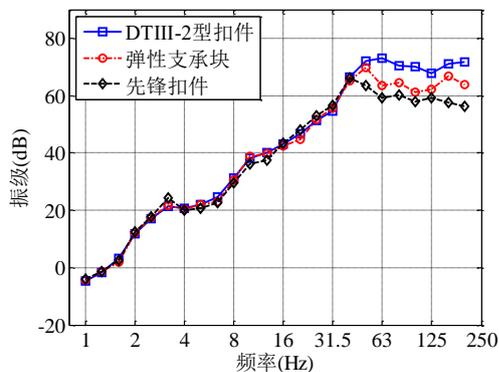


图5.11 四楼楼板振动1/3倍频程比较图

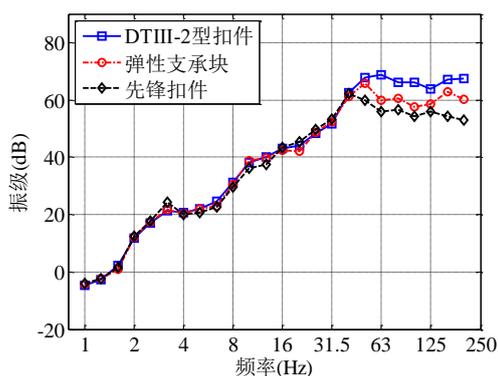
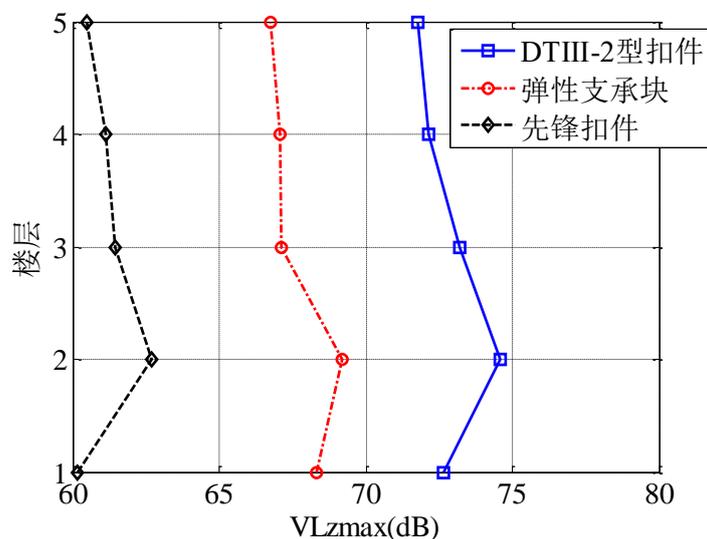


图5.12 五楼楼板振动1/3倍频程比较图

### 5.2.2.2 三种扣件下各楼层振级 $V_{Lzmax}$ 比较

图5.13给出了各楼层的最大 $z$ 振级图。

图 5.13 三种扣件下各楼层最大  $z$  振级

由图5.8-图5.13可知，室内振动数值模拟结果在1-40Hz范围，三种轨道支承的三分之一倍频程曲线基本吻合，这主要因为选取的加速度激振在此频段的振级相差较小所致；三种扣件中，先锋扣件减振效果最为明显，弹性支承块结构次之，而且弹性支撑块结构与先锋扣件的减振性能主要体现在40-200Hz的高频范围。比较不同楼层变化可知：三种轨道支承下，均为二楼的室内振级为最大；二楼以上，随着楼层增加，建筑物室内振动振级呈现下降趋势，导致一楼振动比二楼振动小的原因主要是有限元模型分析时，考虑一楼楼面与基础固结，这也比较符合实际情况。

### 5.3 三种轨道支承降噪效果分析

根据有限元数值模拟室内楼地面与墙面的振动结果作为声场边界条件，计算距地面1.2m中心点处的声压特性。

#### 5.3.1 三种扣件下各楼层三分之一倍频程比较

图5.14-图5.18给出了三种轨道支承下，数值模拟得到的各楼层室内噪声声压三分之一倍频程结果。

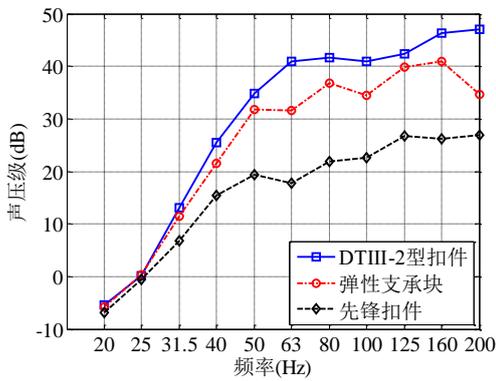


图5.14 一楼室内声压1/3倍频程比较图

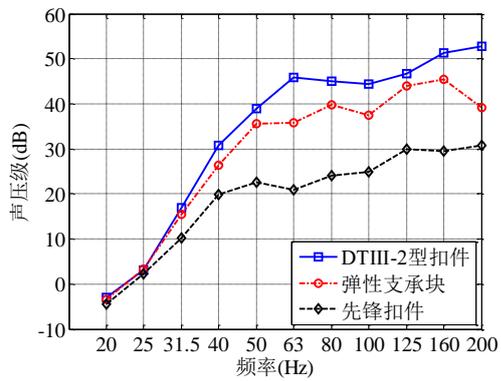


图5.15 二楼室内声压1/3倍频程比较图

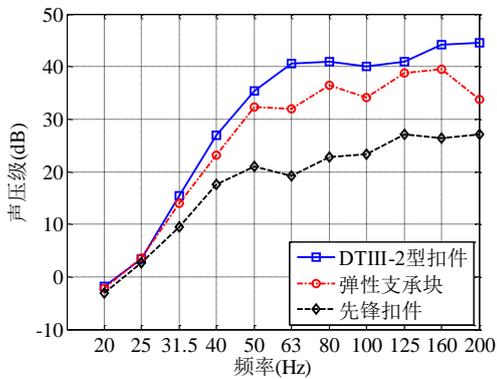


图5.16 三楼室内声压1/3倍频程比较图

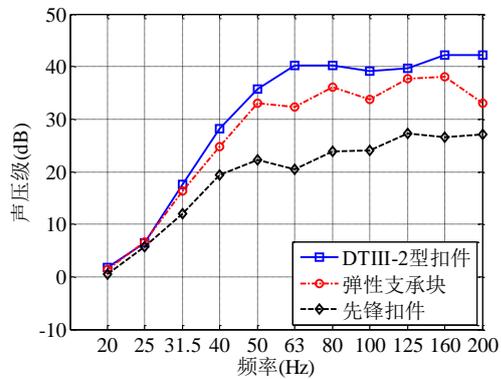


图5.17 四楼室内声压1/3倍频程比较图

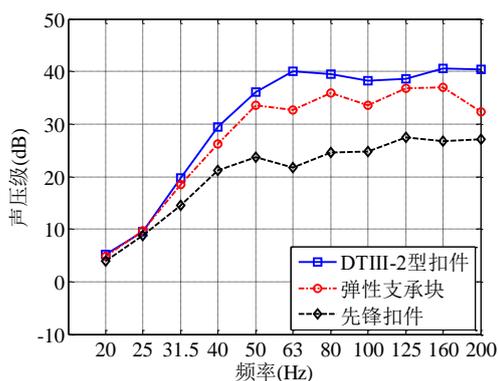


图 5.18 五楼室内声压 1/3 倍频程比较图

### 5.3.2 三种扣件下各楼层等效声级比较

图5.19给出各楼层室内噪声等效连续A声级图。

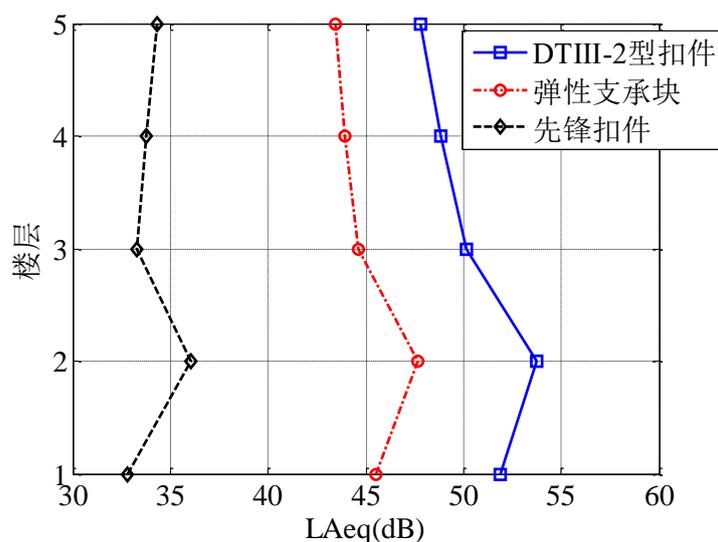


图 5.19 三种扣件下各楼层室内噪声等效 A 声级

由图5.14-图5.19可知：在40-200Hz，三种轨道支承的室内噪声三分之一倍频程相差较为明显：其中，先锋扣件降噪性能最好，弹性支承块次之，DTIII-2型扣件最差；相对于DTIII-2型扣件，弹性支撑块的室内减振效果为5dB左右，先锋扣件的室内减振效果为15dB左右。比较不同楼层室内辐射噪声可知，三种扣件下，均为二楼的室内辐射噪声为最大；其他楼层，随着楼层增加，建筑物室内噪声声压级呈现下降趋势，这与振动模拟结果一致。

## 5.4 数值模拟与实测结果比较

由于实测中对该建筑物一楼与二楼进行了室内振动与辐射噪声进行了测试，故本节将对一楼与二楼的数值模拟与实测结果进行比较。

### 5.4.1 建筑物室内振动结果比较

#### 5.4.1.1 三分之一倍频程比较

图5.20给出了DTIII-2型扣件下三分之一倍频程比较图：

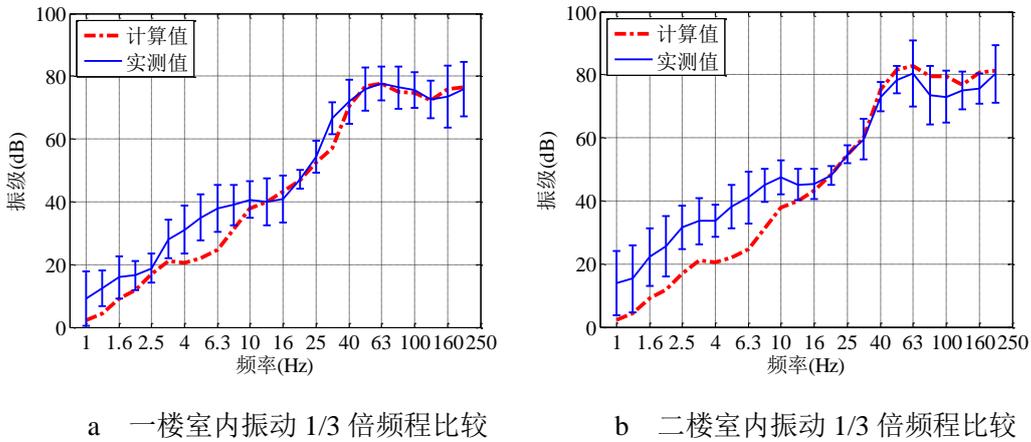


图 5.20 DTIII-2 型扣件下三分之一倍频程比较图

图5.21给出了弹性支撑块下三分之一倍频程比较图：

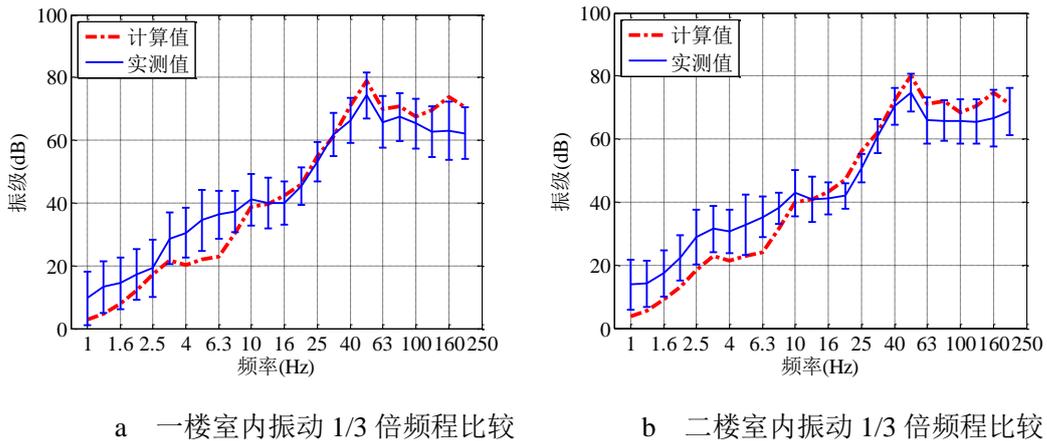


图 5.21 弹性支承块下三分之一倍频程比较图

图5.22给出了先锋扣件下二楼的三分之一倍频程比较图:

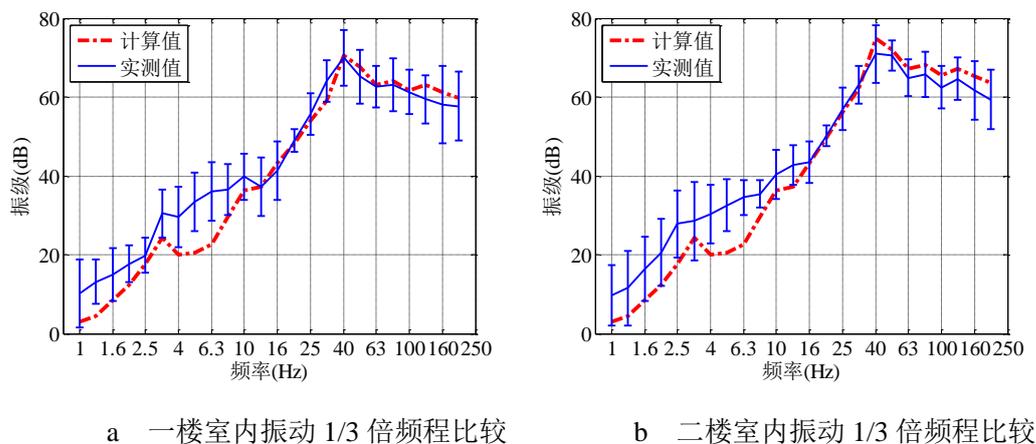


图 5.22 先锋扣件下三分之一倍频程比较图

#### 5.4.1.2 振级比较

表5.2给出了三种轨道支承下的建筑物室内振级比较。

表5.2 不同轨道支承下建筑物室内振动 $VL_{zmax}$ 比较

| 轨道支承类型     | 楼层 | 数据类型 | $VL_{zmax}$ (dB) | $VL_{zmax}$ 标准差(dB) |
|------------|----|------|------------------|---------------------|
| DTIII-2型扣件 | 一层 | 计算   | 73.67            |                     |
|            |    | 实测   | 74.24            | 2.76                |
|            | 二层 | 计算   | 75.27            |                     |
|            |    | 实测   | 74.78            | 2.47                |
| 弹性支撑块      | 一层 | 计算   | 69.31            |                     |
|            |    | 实测   | 68.43            | 2.13                |
|            | 二层 | 计算   | 70.21            |                     |
|            |    | 实测   | 69.18            | 2.07                |
| 先锋扣件       | 一层 | 计算   | 60.17            |                     |
|            |    | 实测   | 61.15            | 1.62                |
|            | 二层 | 计算   | 62.68            |                     |
|            |    | 实测   | 62.46            | 1.73                |

由图5.20-图5.22可知:数值模拟三分之一倍频程结果与实测结果基本一致。具体而言,数值模拟结果在1-12.5Hz范围振级偏小,在16-200Hz范围与实测结果基本吻合。这主要因为在有限元模型分析中,振动输入低频成分较少;

同时，在实测中，低频段部分受到干扰较大，实测结果本身包括干扰成分，使得结果偏大。由表5.2可知，数值模拟得到的室内振级与实测振级基本一致。可见，该数值方法可以在一定程度上预测不同轨道支承下建筑物的室内振动。

## 5.4.2 建筑物室内辐射噪声结果比较

### 5.4.2.1 三分之一倍频程比较

图5.23给出了DTIII-2型扣件下三分之一倍频程比较图：

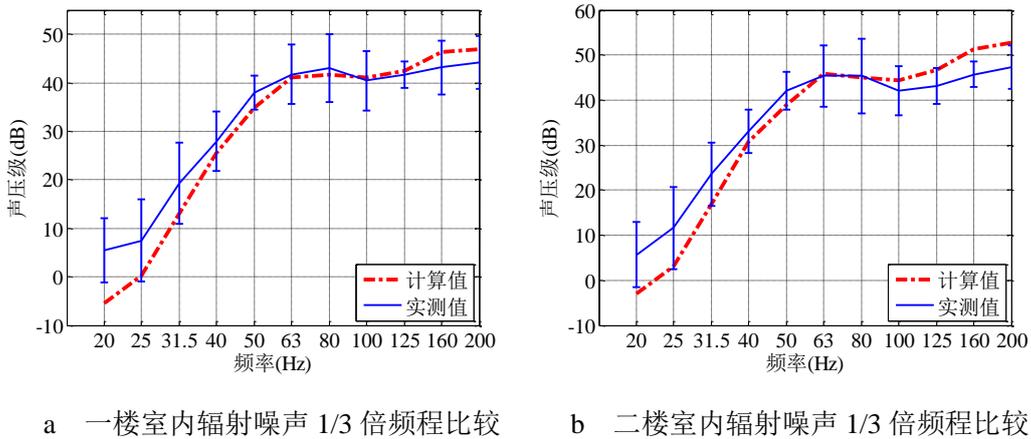


图 5.23 DTIII-2 型扣件下三分之一倍频程比较图

图5.24给出了弹性支承块下三分之一倍频程比较图：

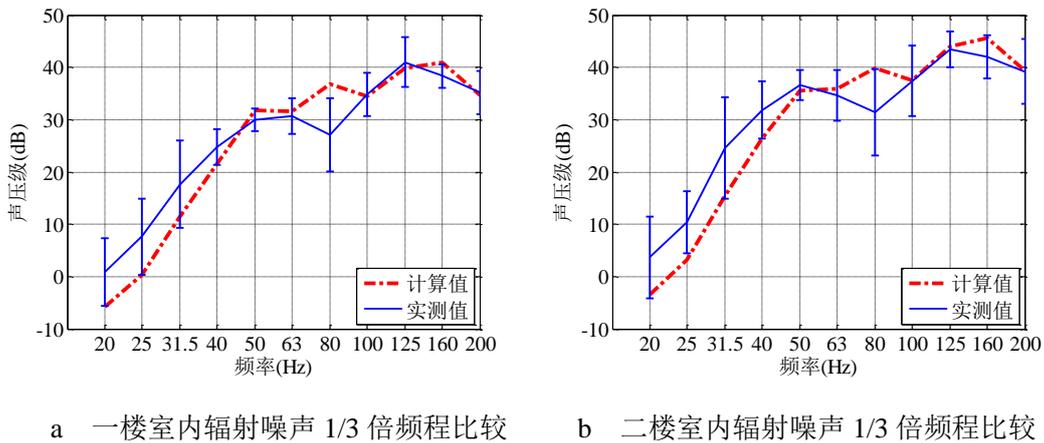


图 5.24 弹性支承块下三分之一倍频程比较图

图5.22给出了先锋扣件下二楼的三分之一倍频程比较图:

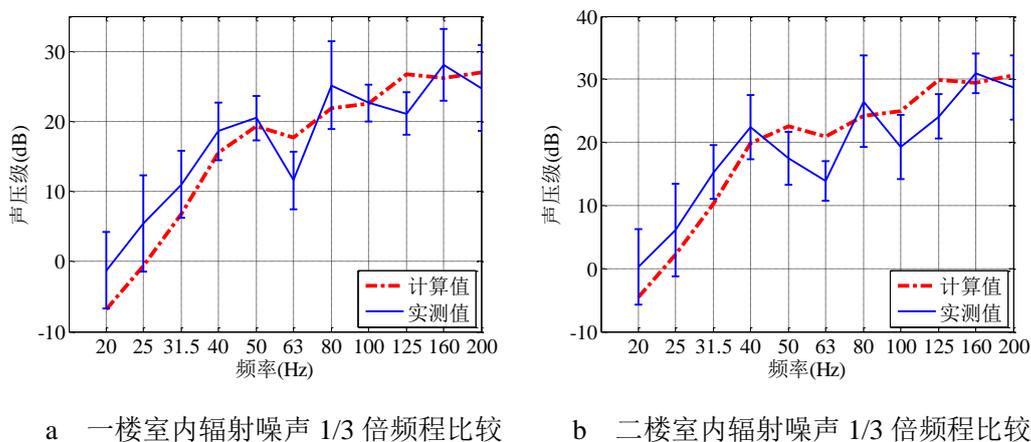


图 5.25 先锋扣件下三分之一倍频程比较图

#### 5.4.2.2 等效连续A声级比较

表5.3给出了不同轨道支承下建筑物室内噪声 $L_{A,eq}$ 。

表5.3 不同轨道支承下建筑物室内噪声 $L_{A,eq}$ 比较

| 轨道支承类型     | 楼层 | 数据类型 | $L_{A,eq}$ (dB) | $L_{A,eq}$ 标准差(dB) |
|------------|----|------|-----------------|--------------------|
| DTIII-2型扣件 | 一层 | 计算   | 51.87           |                    |
|            |    | 实测   | 50.58           | 2.31               |
|            | 二层 | 计算   | 53.78           |                    |
|            |    | 实测   | 52.21           | 2.72               |
| 弹性支撑块      | 一层 | 计算   | 45.54           |                    |
|            |    | 实测   | 45.36           | 1.75               |
|            | 二层 | 计算   | 47.63           |                    |
|            |    | 实测   | 46.26           | 1.32               |
| 先锋扣件       | 一层 | 计算   | 32.78           |                    |
|            |    | 实测   | 32.55           | 1.02               |
|            | 二层 | 计算   | 36.01           |                    |
|            |    | 实测   | 34.86           | 1.27               |

由图5.23-图5.25可知:数值模拟三分之一倍频程结果与实测结果基本一致。具体而言,数值模拟结果在20-50Hz范围声压级偏小,在63-200Hz范围与实测结果基本吻合。这主要因为在有限元模型分析中,振动输入低频成分较少;

同时，在实测中，低频段部分受到干扰较大，实测结果本身包括干扰成分，使得结果偏大。由表5.3可知，数值模拟得到的室内声压级与实测声压级基本一致。可见，该数值方法可以在一定程度上预测不同轨道支承下建筑物的室内辐射噪声。

## 5.5 本章小结

应用第三章与第四章结构有限元与声场边界元的数值模拟方法，对DTIII-2型扣件、弹性支承块结构和先锋扣件三种轨道支承下的建筑物室内振动与辐射噪声进行分析，通过比较得到如下结论：

（1）三种轨道支承中，先锋扣件减振效果最为明显，弹性支承块结构次之，而且弹性支撑块结构与先锋扣件的减振降噪性能主要体现在40-200Hz的高频范围。

（2）比较三种不同轨道支承，先锋扣件建筑物室内降噪性能最好，弹性支承块次之，DTIII-2型扣件最差；在40-200Hz，三种支承下的室内声压级相差较大。

（3）比较不同楼层的室内振动与辐射噪声的数值模拟结果，二楼的室内振级与声压级均为最大，其余各楼层随着楼层的增加有下降趋势。

（4）比较不同轨道支承下室内振动与辐射噪声的数值结果与实测结果，分析表明：二者在频域上呈现一致性，可见该方法可以在一定程度上预测室内振动与辐射噪声。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 本文工作总结

本文以建筑物实测地面振动加速度作为输入，建立结构有限元模型与声场边界元模型，分析地铁运行对建筑物室内振动与辐射噪声的影响，并与实测结果进行比较，最后，对三种常用的轨道支承的减振降噪性能进行研究。主要工作及结论包括以下几个部分：

(1) 利用结构有限元模型计算了建筑物室内楼面与墙面的振动，数值结果比较分析可知：不同楼层，二楼室内振级最大，其余楼层室内振级随楼层的增加而降低；同一楼层，楼板板中振级最大，越靠近板边室内振级越小；楼板不同位置的振动特性基本不受楼层变化的影响。室内振动的数值模拟结果与实测结果在加速度振幅、频谱分布与三分之一倍频程上基本一致，表明该方法能在一定程度上为建筑物室内振动提供预测与分析。

(2) 建立声场边界元模型，以室内振动的数值模拟结果为边界条件，计算建筑物室内声场分布与测点处的声压级。不同楼层，二楼室内声压级最大，其余楼层室内声压级随着楼层增加呈现下降趋势；数值模拟声压级结果与实测结果基本吻合，可见，该方法能在一定程度上预测分析建筑物室内辐射噪声。

(3) 分析了DTIII-2型扣件、弹性支承块结构和先锋扣件三种轨道支承下的建筑物室内振动与辐射噪声，结果表明：三种轨道支承下的室内振动与噪声频谱特性在40-200Hz范围差别较大；三种扣件中，先锋扣件减振效果最为明显，弹性支承块结构次之，DTIII-2型扣件最差。

### 6.2 展望

地铁运行引起建筑物室内振动与辐射噪声的研究涉及建筑物结构特性以及室内结构材料特性等诸多问题，而且作为地铁车辆、轨道、隧道、土体、建筑结构组成的系统的一部分，该研究过程中存在许多不确定因素，所以有许多方面值得深入研究：

(1) 本文研究的建筑物室内振动只结合实际工程选择了砌体结构一种结构类型，由于不同的结构类型下室内振动特性不同，所以，今后有待于对不同建筑物的结构类型进行系统研究。

(2) 本文建立的建筑物室内声学边界元模型较为简单，只这针对相同的结构表面材料进行声场分析，由于建筑物室内结构表面采用不同材料的吸声特性不同，在后续研究中应进一步考虑其他情况的影响。

(3) 本文数值模拟的一些工况没有实测数据对比，今后可以加大地铁实测的力度，通过实测的数据与数值结果全方位的比较，使之能更加真实的模拟地铁运行对建筑物室内振动与辐射噪声的影响。

## 致谢

随着论文写作工作接近尾声，我也即将告别同济的求学生涯。回想七年前，踏入同济校门的情景，至今仍历历在目；其中有些留恋、也有些伤感。在过去学习生活中，遇到了很多的困难和挫折，正是那些无私的关心和帮助让我披荆斩棘、勇往直前。在此，由衷的感谢给予我关心帮助的人们。

首先，感谢我的导师薛松涛老师；在学术上，他治学严谨、一丝不苟；生活中，平易近人、风趣幽默，这些深深的感染了我。同时，也要感谢唐和生副导师，勤奋踏实的工作态度，无声的教育了我们；科学研究中的严格要求，也让我受益匪浅。此外，感谢教研室的谢丽宇老师，感谢他在平时的生活和项目中的关心鼓励。在此，对三位老师表示衷心的感谢！

其次，感谢教研室的申道明师兄，他在我论文写作中给予了细致的指导和帮助；在学术探讨中，也是收获良多。

同时，感谢教研室的李峰、许锐、范德伟、胡长远和白杰师兄以及苏瑜师姐，在平时生活中，正是你们的幽默风趣，让教研室的气氛和谐融洽。

感谢王泽兴、于骁勇、郭海超、王兰斌四位同门，在朝夕相处中给予的无私帮助和巨大支持。

也要感谢汪洁、邓立新、王娇、裘亦文、唐珏、姚雯、谢丽君、李晶晶等师弟师妹在平时生活和学习中给予的关心与帮助。

最后，感谢我的父母，养育之恩无以为报。这一刻，将崇高的敬意献给你们！

赵伟屹  
2012年5月

## 参考文献

- [1] J. H. A. Crocket. Proceedings of the symposium on vibration in civil engineering[M], 1965, 253-271.
- [2] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M].第2版.北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 何琳, 朱海潮等. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] Kurzweil, L. G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems[J]. Journal of Sound and Vibration, Volume 66, Issue 3, 1979, p. 363-370.
- [5] Nelson, J. T. and Saurenman, H. J. State-of-the-Art Review: Prediction and Control of Ground-borne Noise and Vibration from Rail Transit [R]. U.S. department of transportation report DOT-TSC-UMTA-83-3, 1983.
- [6] Dawn, T. M. and Stanworth C. G. Ground Vibrations from Passing Trains [J]. Sound and vibration, 1979, 66(3): 355-362.
- [7] Jonsson, J. O. On Ground and Structural Vibrations Related to Railway Traffic [D]. Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.
- [8] Ungar, E. E. and Bender, E. K. Vibrations produced in buildings by passage of subway trains, parameter estimation for preliminary design, [R]. Inter-noise, 1975: 491, 498
- [9] G Bornitz. Expansion of Heavy Drilling Producing Groud Motion in the Deep [J]. Journal of Springer, Berlin, 1931.
- [10] J.Melke, Noise and Vibration from underground railway lines: proposals for a prediction procedure, [J]. Journal of Sound and Vibration 1988.120(2):391-406.
- [11] Fujikake T. A prediction method for the propagation of groud vibration for railway trains [J]. Journal of sound and Vibration, 1986, 111(2):289-297.
- [12] Hayakawa K. Reduction Effects of Ballast Mats and EPS Blocks on Ground Vibration Caused by Train and its Evaluation [J]. Proc. Inter-Noise 92, 1992; 233-240.
- [13] 王毅. 北京地下铁道振动对环境影响的调查与研究[J], 地铁与轻轨, 1993,(2):21-25.
- [14] 王毅, 徐辉. 浅谈地铁车辆段平台居住小区震动与噪声污染控制[J]. 城市轨道交通, 2000(1).
- [15] 徐忠根, 任珉. 杨泽群,等. 广州市地铁一号线振动传播对环境影响的测定与分析[J], 环境技术, 2002,4(3):12-14.
- [16] 曹国辉, 方志. 地铁运行引起房屋振动的研究[J], 工业建筑, 2003, Vol.33, No.12.31-33.
- [17] 茅玉泉. 交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减[J]. 建筑结构学报, 1987,(1):67-77.
- [18] 田春芝. 地铁振动对周围建筑物影响的研究概况 [J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2000,27(1):39-43.
- [19] 彭胜群. 地铁振动污染防治对策[J]. 铁道勘测与设计, 2004,134(2):7173.
- [20] 夏禾, 曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题. 铁道科学与工程学报, 2004,1(1):44-51.
- [21] 王逢朝, 夏禾, 张鸿儒. 地铁列车振动对邻近建筑物的影响[J]. 北方交通大学学报, 1999,23(5):45-48.
- [22] 洪俊清, 刘伟庆, 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25 (4):

- 142-145.
- [23] 周裕德, 祝文英, 应乐惇, 张玮晨. 地铁振动对上海音乐厅迁址影响分析及对策措施[R]. 上海市环境科学学会第 11 届学术年会, 2004.
- [24] 冯青松, 雷晓燕, 伍明辉. 地铁运行列车引起建筑物低频振动的数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 5: 68-72.
- [25] 楼梦麟, 李守继. 地铁引起建筑物振动评价研究[J]. 振动与冲击, 2007, 6: 68-71.
- [26] A. B. Nagy, P. Fiala, F. Marki, F. Augusztinovicz, G. Degrande, S. Jacobs, D. Brassensx, Prediction of interior noise in buildings, generated by underground rail traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 293 (3-5) (2006) 680-690.
- [27] S. François, L. Pyl, H.R. Masoumi, and G. Degrande. The influence of dynamic soil-structure interaction on traffic induced vibrations in buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27(7):655-674, 2007.
- [28] R. A. Hood, R. The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnel[J]. Journal of Sound and Vibration.(1996)193(1): 215-225.
- [29] J.W. Edwards. Survey of environmental noise and vibration from London Underground trains[R]. Proceedings of Internoise 96, 2029-2032, 1996.
- [30] J. G. Walker, M. F. K. Chan. Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996: 193(1): 49-63
- [31] P. Fiala, G. Degrande. Numerical modeling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007(301)-718-738.
- [32] A.B. Nagy, P. Fiala, F. Marki, F. Augusztinovicz, G. Degrande, S. Jacobs, D. Brassensx, Prediction of interior noise in buildings, generated by underground rail traffic[J]. Journal of Sound and Vibration 293 (3-5) (2006) 680-690.
- [33] 马筠. 地铁列车振动对临近建筑物内结构噪声的影响[J]. 噪声与振动控制, 2005, 11.
- [34] 辜小安, 刘扬. 城市轨道交通列车运行噪声预测模式的确定[J]. 铁道劳动卫生安全与环保, 2004, vol31(1).
- [35] 刘枫. 高架列车振动对临近建筑物内结构降噪的影响. [D]. 北京: 北方交通大学土木工程学院, 2001.
- [36] 高飞, 夏禾, 安宁. 北京地铁5号线高架结构的辐射噪声分析与实验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 5: 134-139.
- [37] Takemiya H, Goda K. Wave propagation/impediment in a soil stratum over rigid base due to impulse/moving load[J]. Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, NO. 605/1-45, 10, 1998: 61-169.
- [38] 彭胜群. 地铁振动污染防治对策[J]. 铁道勘测与设计, 2004, 134(2): 71-73.
- [39] 段金明, 周敬宣, 李艳萍. 统计能量分析在轻轨交通噪声预测中的应用[J]. 华中科技大学学报, Vol. 19 No. 3, 2002.
- [40] 胡新伟, 黄醒春. 高架轨道梁振动与结构噪声的数值模拟[J]. 低温建筑技术, No.2, 54-56, 2007
- [41] Jonsson, J. O. On Ground and Structural Vibrations Related to Railway Traffic[D]. Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.
- [42] Nelson, J. T. and Saurenman, H. J. State-of-the-Art Review: Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit,[R]. U.S. department of transportation

- report DOT-TSC-UMTA-83-3, 1983.
- [43] Dawn, T. M. and Stanworth C. G. Ground Vibrations from Passing Trains[J]. Sound and vibration, 1979, 66(3): 355-362.
- [44] 刘学毅. 轨道刚度的影响分析及动力学优化[J]. 西南交通大学学报, 2004, (01): 1-5.
- [45] 吴建忠. 轨道减振器扣件与弹性套靴整体道床减振对比试验[J]. 都市轨道交通, 2005, 18(5): 61-63
- [46] 陈小平, 王平, 陈嵘. 弹性支承块式无砟轨道的减振机理[J]. 铁道学报, 2007, (05): 69-72.
- [47] 王文斌, 刘维宁, 贾颖绚等. 更换减振扣件前后地铁运营引起地面振动的研究[J]. 中国轨道科学, 2010, 87-91.
- [48] 练松良等. 减振降噪型整体轨道结构类型选择的研究报告[R]. 同济大学, 上海铁路城市轨道交通设计研究院. 2001, 6.
- [49] GB10070-88 《城市区域环境振动标准》[S].
- [50] GB10071-88 《城市区域环境振动测量方法》[S].
- [51] JGJ/T 170-2009 《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》[S].
- [52] HJ 453-2008 《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》[S].
- [53] DB31/T470-2009 《城市轨道交通（地下段）列车运行引起的住宅室内振动与结构噪声限值及测量方法》[S]. 中国建筑工业出版社, 2009, 北京.
- [54] Swedish Defence Material Administration, Infrasound. Stockholm, 1985.
- [55] DEPA. (2002A). Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. Danish Environmental Protection Agency.
- [56] American Public Transit Association 1981 Guidelines for Design of Rapid Transit Facilities Manual for Transit Noise and Vibration Impact Assessment.
- [57] FTA (2006). Transit noise and vibration impact assessment. Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration. Report number: FTA-VA-90-1003-06.
- [58] SS-ISO 14837-1 (2005). Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance.
- [59] 《台湾低频噪声源管制措施以及防治方法》[S], 2005.
- [60] WHO (1999). Guidelines for community noise.
- [61] Deutsches Institute für Normung, DIN 45680: 1997 “Measurement and Evaluation of Low Frequency Environmental Noise”.
- [62] Leo. H. Schaudinischky. 声音·人·建筑[M]. 林达悃, 李冲理译. 中国建筑工业出版社, 北京.

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

赵伟屹, 男, 1987年9月出生。

2009年7月, 毕业于同济大学土木工程专业, 获学士学位。

2009年9月至今, 就读于同济大学土木工程专业。

### 已发表论文:

[1] 赵伟屹, 申道明. 不同轨道支承下地铁引起的地面振动分析. 佳木斯大学学报 (自然科学版). 2012, Vol.30 (3): 360-363.