

附件 3

# 《地下轨道交通结构噪声排放监测方法》

(征求意见稿)

## 编 制 说 明

《地下轨道交通结构噪声排放监测方法》编制组

二〇一五年六月

项目名称：地下轨道交通结构噪声排放监测方法

项目统一编号：2014-24

编制单位：北京市环境保护监测中心、清华大学建筑学院、北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心

编制组负责人：张中平

编制组主要成员：石爱军，刘倩，燕翔，宋杰，郭建辉，胡月琪，温志伟，王铮，李彬，薛晓燕，孟磊

标准所技术管理人：张国宁

标准处项目管理人：秦勤

# 目 录

|      |                                        |    |
|------|----------------------------------------|----|
| 1    | 项目背景.....                              | 1  |
| 1.1  | 任务来源.....                              | 1  |
| 1.2  | 工作过程.....                              | 1  |
| 2    | 标准制修订的必要性分析.....                       | 2  |
| 2.1  | 现行标准存在问题分析.....                        | 2  |
| 2.2  | 现行相关标准应用困难.....                        | 2  |
| 2.3  | 相关环保标准和环保工作的需要.....                    | 3  |
| 3    | 国内外相关分析方法及科研成果调研.....                  | 4  |
| 3.1  | 主要国家、地区及国际组织相关分析方法研究.....              | 4  |
| 3.2  | 国内相关监测与评价方法研究.....                     | 7  |
| 3.3  | 国外相关监测与评价方法研究.....                     | 8  |
| 4    | 标准制修订的基本原则和技术路线.....                   | 9  |
| 4.1  | 整体思路及条款说明.....                         | 9  |
| 4.2  | 标准的适用范围和主要技术内容.....                    | 10 |
| 4.3  | 标准制修订的技术路线.....                        | 10 |
| 5    | 方法研究报告.....                            | 11 |
| 5.1  | 建筑物室内结构噪声基本规律研究.....                   | 11 |
| 5.2  | 测量方法理论基础研究.....                        | 14 |
| 5.3  | 结构噪声与振动产生机制研究（参考 ISO14837-1:2005）..... | 16 |
| 5.4  | 地下轨道交通结构噪声频率特性研究.....                  | 19 |
| 5.5  | 特征频率选择分析.....                          | 22 |
| 5.6  | 事件截取方式与背景噪声关系研究.....                   | 25 |
| 5.7  | 室内监测点位与楼层差异性研究.....                    | 28 |
| 5.8  | 数据结果及频带划分选择分析.....                     | 32 |
| 5.9  | 与现行标准测量结果比较分析.....                     | 33 |
| 5.10 | 烦恼度调查结果汇总.....                         | 34 |
| 6    | 标准实施建议.....                            | 34 |
| 7    | 标准使用经济成本.....                          | 35 |
| 8    | 参考文献.....                              | 35 |
|      | 附录 1 地铁影响调查问卷.....                     | 37 |
|      | 附录 2 试验数据汇总.....                       | 38 |

# 《地下轨道交通结构噪声排放监测方法》编制说明

## 1 项目背景

### 1.1 任务来源

声音作为社会生活中最常见的能量辐射之一，长期存在于我们的日常生活中。某种程度上，它甚至超越了光成为与人们接触最密切的物理量。但是噪声，顾名思义人们正常生活中不需要的声音却时常困扰着人们，尤其是在城市生活的人们。在城市生活中，工业生产噪声、社会生活噪声、建筑施工噪声、地面交通噪声、飞机噪声被人们公认为城市噪声的主要污染源。但是随着城市化进程的加速和城市自身的发展，轨道交通尤其是地下轨道交通已经越来越多的在全国大中城市陆续开工建设。作为城市交通的重要组成部分，轨道交通在极大的方便人们出行的同时却带来了一系列亟待解决的问题。地下轨道交通的噪声扰民问题一直是环保部门信访投诉的热点，也是各地城市居民常年受影响比较普遍的环境污染问题之一。作为监测部门，每年仅北京市环境保护监测中心全国两会期间需要进行监测的噪声扰民提案就达30余项之多。随着全国地下轨道交通的迅猛发展，越来越多的信访、投诉反映由于地铁运行所带来的噪声扰民问题。而实际进行监测时，由于国家标准中存在着些许不足，致使监测部门在对地铁运行所产生的噪声实施监测时常常出现无标可依或有标难依的情况，其中重要原因是使用国标方法进行实际监测时存在诸多方面的障碍。所以，建立针对地下轨道交通排放的监测方法，对于准确、正确的评价由地下轨道交通所引起的结构噪声影响程度，为环境管理部门的政策决定提供相应的技术依据和数据保障有着十分重要的意义。

为此国家环境保护部于2014年下达了标准制定计划。根据环办函〔2014〕411号文《关于开展2014年度国家环境保护标准制修订项目工作的通知》，按照《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（环保总局公告2006年第41号）的有关要求，以及《国家环境保护标准项目任务书》的总体任务要求，由北京市环境保护监测中心联合清华大学建筑学院、北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心共同成立了标准编制组，完成《地下轨道交通结构噪声排放监测方法》制修订任务及相关技术性工作。

### 1.2 工作过程

#### 1.2.1 标准开题论证

2014年12月19日，环保部科技标准司在北京主持召开了标准开题论证会，标准编制组介绍了开题报告和标准草案的主要技术内容、前期调研成果、编制工作过程、后续工作安排等相关内容，经质询、讨论，形成如下意见：

1. 补充完善国内外相关标准调研工作
2. 注意与噪声环保标准体系的协调和衔接
3. 完善监测方法点位布设，数据处理等技术要求。



### 1.2.2 标准草案编制

根据开题论证会的指导意见，标准编制组明确了标准制订原则和框架结构。编制组先后开展了国内外地下轨道交通结构噪声相关标准及科研成果调研、结构噪声传播规律与建筑物室内结构噪声理论研究、地下轨道交通结构噪声现状调查与监测、结构噪声声学特性研究等工作。

在前述工作基础上，标准编制组重点对开题论证会意见中涉及的传播机理、测量方式、点位布设原则、数据采集方法、测量值计算等问题进行了进一步分析、确定，起草了《地下轨道交通结构噪声排放监测方法（征求意见稿）》和编制说明

### 1.2.3 标准征求意见

根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（国家环境保护总局公告 2006 年第 41 号）规定，标准草案（征求意见稿）公开向全国征求意见。

## 2 标准制修订的必要性分析

### 2.1 现行标准存在问题分析

一般噪声污染主要呈现瞬时性、可感受性、空间分布性等特点，地下轨道交通结构噪声也不例外。但是，有别于一般噪声污染，由于地铁车辆运行速度快，周边地下环境自屏蔽效果好，故在实际影响外界声环境时，主要以通过引起附近房屋结构发生振动，从而在建筑物室辐射结构噪声（即二次辐射噪声）为主。这也造成了地下轨道交通结构噪声的短暂性与低频性特征。反观现行标准，绝大部分使用全频 A 声级进行评价。此类评价与固定设备结构传播室内噪声相似，全频带 A 声级低频修正强烈，而低频部分又没有相关技术要求，从而影响最终监测结果与实际扰民程度判断的准确性。同时，在国家标准中规定的测量方法大都为一段时间的等效 A 声级，而在测量过程中由于地铁结构噪声影响时间占总测量时间比重小，致使最终等效声级结果往往受制于其他背景噪声影响，造成监测时效性与代表性严重不足。

### 2.2 现行相关标准应用困难

在现行国家标准中，可适用于轨道交通噪声监测的主要有以下几部，GB3096-2008、JGJ/T170-2009、DB31/T470-2009，结构噪声监测主要有 GB12348-2008、GB22337-2008 等标准。

(1)GB3096-2008《声环境质量标准》，在声环境质量标准中对于轨道交通监测提出了不同测量目的下的多种测量方法。其中附录 C 中规定受轨道交通影响敏感建筑物监测方法在实际监测评价轨道交通对周边居民影响时具有非常重要的意义。但声环境质量标准中对于轨道交通声源类型有着明确限制（地面段），致使在对地下轨道交通进行监测时不能准确按照标准所规定监测方法进行。此外，标准中所规定监测方法主要针对空气传播噪声，监测结果采用了全频带 A 计权等效声级作为评价参量，致使噪声低频部分被大幅度修正，从而降低了监测结果与敏感点主观烦恼的拟合程度。而且，作为质量标准，监测无法对被测声源以外的噪声进行背景修正。

(2)JGJ/T170-2009《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》，该标准为中华人民共和国住房和城乡建设部发布。在标准中首次提出了二次辐射噪声概念，从测量方法上该标准提出了监测 16~200Hz 低频噪声的监测方法，此种方法对于监测地下轨道交通所引起的结构噪声相比较其他相关国家标准在监测数据准确性及代表性方面都有较好的改进。但该标准非国家环保标准，与现行环境监测标准方法不属于同一标准体系，致

使对环境管理部门、执法部门以及监测部门采用该标准进行实际工作存在一定难度。此外，该标准二次噪声监测部分采用的 16Hz-200Hz（未说明为倍频程或 1/3 倍频程中心频率）A 计权等效声级评价量，对于监测设备提出个新的要求，在目前环境噪声监测条件下应用存在相当程度的困难。另外，该方法测量沿用了时间等效声级的测量结果，这使得测量周期内有效测量时间与测量持续时间相关性降低，从而使得测量结果在数值上受背景噪声影响巨大，进而降低敏感人群感受与实际排放情况的吻合程度。

(3)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》，此标准为上海市地方标准，由上海市质量技术监督局发布实施。上海市地方标准为地方环境排放标准，与现行国家环保标准有一定程度的传承性。标准中规定了室内噪声昼夜等效声级及夜间最大声级作为监测评价量，在实施中有较好的便捷性。但其监测方法中如监测时段，监测结果中同样沿用了时间等效声级与全频带 A 计权修正。这与前述标准方法中存在的监测时效性与代表性问题大致相同。此外，该标准在对敏感建筑物进行结构噪声综合噪声与背景噪声监测时需多人同步进行，增加了人为操作仪器所引入的不确定性。

(4)GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》与 GB22337-2008《社会生活环境噪声排放标准》，上述标准在 2008 年修订实施后引入了结构噪声低频分频监测评价概念，其监测量主要针对 500Hz 以下低频噪声，限值参照国际通用 NR 曲线进行制定，为国家标准中结构噪声排放监测与评价开创先河。当然，评价限值参照 NR-10 曲线制定与主观感受符合程度在一定程度上可能还存在争议，但相比较传统 A 计权单一评价方法已有重要突破，且在实际监测中更具有针对性。但作为特定声源的排放监测，标准的监测对象主要针对固定声源，与地下轨道交通声源类型存在差异，不能在交通型污染源结构噪声监测中得以应用。此外对于地下轨道结构噪声而言，在测量频率范围上，500Hz 低频范围噪声较易受到地面其他交通源（如重型载重卡车、大型地面公交车等）的影响。

通过对上述标准的研究与实际应用中存在不足不难发现，目前现行的国家标准均难以满足准确、精确监测地下轨道交通结构噪声的实际需要。应用现行标准所得到的测量结果与实际受影响敏感建筑物室内主观感受存在一定差距。正因如此，本次标准制修订工作拟通过对地下轨道交通及相邻敏感建筑物结构噪声与结构振动进行分析，结合噪声与振动理论研究，总结归纳并建立对地下轨道交通结构噪声更为适合且合理的测量监测方法。

## 2.3 相关环保标准和环保工作的需要

参照《中华人民共和国环境噪声污染防治法》、《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB 12348-2008）、《社会生活环境噪声排放标准》（GB22337-2008）和《环境噪声监测技术规范 结构传播固定设备室内噪声》等相关法律及标准要求，低频噪声或结构噪声已成为当前噪声评价的一个重要部分。

交通噪声一直公认为城市噪声最大贡献声源，随着国家声环境保护工作的不断推进，交通干线及由交通所引发的环境噪声污染已成为噪声污染防治、保护城市声环境的重要关注焦点。国家环境保护标准《交通干线环境噪声排放标准》已进入征求意见阶段，但对于城市轨道交通通过结构传播至噪声敏感建筑物室内的评价需要相应配套的特别监测技术规范，以满足其周期性、低频性噪声特点。

### 3 国内外相关分析方法及科研成果调研

#### 3.1 主要国家、地区及国际组织相关分析方法研究

##### 3.1.1 主要国家、地区轨道交通环境影响评价方式

随着在国外的相关标准中,对于地铁所引发的结构噪声主要以轨道交通设计或评价的指导性文件作为依据,很少由国家专门针对此类结构噪声建立监测或评价方法,即便伴随主体标准有所涉及,也主要以 A 声级值作为评价量给定标准限值,未规定特别的监测方法。而美国、英国、德国、意大利、瑞典、挪威、澳大利亚乃至日本更多的是将轨道交通环境问题通过振动控制的方式进行处理。

固然振动是地下轨道交通环境影响的重要组成部分,以振动控制达到降低源强的方法是工程首选途径,但是由于振动所产生的结构噪声更加明显的作用于受影响者,故也同样不能忽视。两者从能量上存在一定的相互关系,但由于地域差异、各地建筑结构组成与建造方式不同或其他原因致使当前国际上还没有统一的监测方法或理论体系。如图 1 中所示为日本、澳大利亚与其他西方国家现行标准中振动一般影响评估指标。其中各国振动标准之间存在相当大差异,数值差异达 20dB 之多。

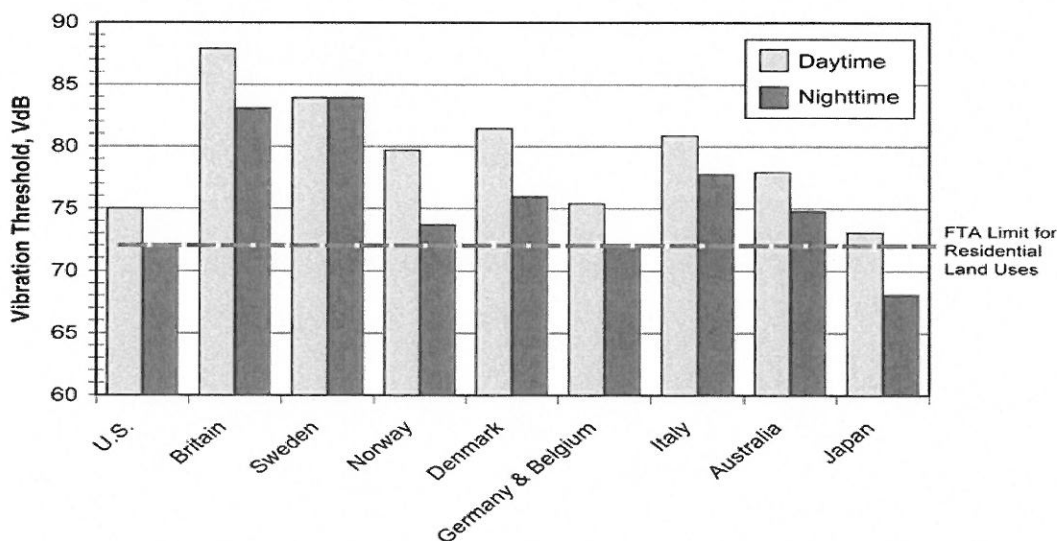


图 1 世界各国振动标准比较

在国外标准应用中,如英国标准 BS6841:1987《人体全身暴露机械振动与重复性冲击测量与评价》中对于振动或结构噪声发生密度进行了一定程度的要求。其中波峰系数 (crest factor) 是表征其测量变化的重要参数,在标准中规定波峰系数需要小于 6.0,等于计权峰值加速度与计权有效加速度比值 ( $\text{Crest factor} = (\text{weighted peak acceleration})/(\text{weighted r.m.s. acceleration})$ )。而 FTA 标准《交通噪声与振动影响评估》中,结构噪声由于不同使用者对于噪声强度需求不统一,如在室内录音间可能要求结构噪声各频率均不构成影响,故 FTA 并没有对结构噪声设统一限值,推荐具体问题具体分析。

##### 3.1.2 主要国家、地区轨道噪声及轨道引发结构噪声标准

###### 3.1.2.1 国际标准化组织 ISO:《Mechanical vibration—Ground-borne noise and vibration arising from rail systems —Part 1: General guidance》(ISO 14837-1:2005)

ISO14837 系列标准是国际标准化组织针对铁道系统所制定的技术标准,标准共分为 6



各部分，分别为 Part 1：总体要求、Part 2：预测模型、Part 3：测量、Part4：评估限值、Part 5：缓解措施、Part 6：资产管理。除第一部分外，标准 2~6 部分还处于准备阶段，并未颁布实施。

测量设备，声级计或分析仪应符合 IEC61672-1:2002 中 1 型声级计的相关要求。设备应当经过 IEC 60942 规定程序的校准方能进行使用。由于结构噪声可能主要由于结构振动所激发，所以测量方法中数据采集方式、频率范围、设备安装要求可以参考结构振动部分。

测点位置选择，根据不同的需求，测试地点应当有所不同。标准测量部分将不同的测试项目大致归结为研究性测量、问题调查测量、模型开发测量等。对于测量结构噪声人体影响时，应将测量位置临近但不能置于房间中央位置。

采集的数据应当能够反映评价车流量变化，测量过程应包含至少 5 辆具有代表性的列车通过过程（应保证列车具有相似的重量，通勤密度，最高时速等）。如果测量结果平均偏差大于 25%或±2dB，则应对现场测量进行检查，并对大量列车同行过程进行记录。

对于测量结果度量或测量量而言，量化结构噪声和结构振动影响主要针对人体影响、建筑物影响、敏感设备影响几个方面。测量量应与对应评价标准相符，室内测量点位可以根据房间内部结构进行预测（通常靠近墙壁或角落的测量将高于室内中央 2~3dB）。如果结构噪声绝大部分成分为低频噪声，采用全频带 A 声级将严重低估其造成影响。由于评价量可能需要不同的度量方式，应当优选时间历程采样方式进行噪声测量。

### 3.1.2.2 美国联邦运输管理局，FTA：《Transit noise and vibration impact assessment》

美国现行评价交通产生的噪声与振动影响是应用 FTA 手册。建筑物依照使用用途被划分成 3 个不同的类型。影响限值根据其发生频次分为了频繁（>70 个事件/天），偶尔（30-70 个事件/天）以及不频繁（<30 个事件/天）。标准限值同时涵盖了如音乐厅、电视和录音室，听众席以及剧院等更低限值需求的“特殊建筑物”，具体限值如表 1 所示。

表 1 FTA 结构振动与噪声影响限值

| 用地类型                                                                                                                                                                                 | 振动影响限值<br>(VdB, 1 微英寸/秒为参照) |                    |                    | 噪声影响限值<br>(dB, 20 微帕为参照) |                  |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|------------------|------------------|
|                                                                                                                                                                                      | 高频 <sup>1</sup>             | 偶尔 <sup>2</sup>    | 不频繁 <sup>3</sup>   | 高频 <sup>1</sup>          | 偶尔 <sup>2</sup>  | 不频繁 <sup>3</sup> |
| 类型 1：振动将严重影响室内生活                                                                                                                                                                     | 65VdB <sup>4</sup>          | 65VdB <sup>4</sup> | 65VdB <sup>4</sup> | n/a <sup>5</sup>         | n/a <sup>5</sup> | n/a <sup>5</sup> |
| 类型 2：用作睡眠的住宅类                                                                                                                                                                        | 72 VdB                      | 75 VdB             | 80 VdB             | 35dBA                    | 38dBA            | 43dBA            |
| 类型 3：白天运行的主要用于工业生产类                                                                                                                                                                  | 72 VdB                      | 78 VdB             | 83 VdB             | 40dBA                    | 43dBA            | 48dBA            |
| 注：<br>1.每天大于 70 个振动事件，多数高速交通属于此类<br>2.同一振源每天产生 30-70 个振动事件，涵盖多数通勤铁路中继线<br>3.同一振源每天产生少于 30 个振动事件，主要包含通勤铁路支线<br>4.此限值适用于绝大部分精密仪器，如光学显微镜。振动敏感的生产或研究需要详细评估可接受的振动水平<br>5.大多数的振动敏感设备不对噪声敏感 |                             |                    |                    |                          |                  |                  |

### 3.1.2.3 英国，The British Standard BS8233: 1999

英国标准 BS8233:1999—“建筑物隔音和减少噪声”中指出了建筑物内噪声水平的参考值。这些值是基于 WHO 的限值，详见表 2。

表 2 BS8233:1999 居住区室内噪声级参考值

| 类别                                               | 典型情况 | 设计范围, LAeq, dB |    |
|--------------------------------------------------|------|----------------|----|
|                                                  |      | 良好             | 合理 |
| 睡眠和休息的合理环境                                       | 客厅   | 30             | 40 |
| 睡眠和休息的合理环境                                       | 卧室   | 30             | 35 |
| 通常卧室内夜间来源于单个噪声事件的噪声级不应超过 45dB LAmax(通过 F 时间计权测得) |      |                |    |

英国评定结构噪声有些类似于评定航空噪声, 同样使用 A 计权测量。对于地下铁路系统产生的噪声使用  $L_{Amax}$  参量进行评价, 评价限值详见表 3。

表 3 居民区、学校以及大学受地下工程影响限值

| 影响等级                 | 噪声等级 dB (L <sub>Amax,S</sub> ) <sup>1</sup> |       |
|----------------------|---------------------------------------------|-------|
| 低                    | 35-39                                       | 一般    |
| 中                    | 40-44                                       | 有明显影响 |
| 高                    | 45-49                                       |       |
| 很高                   | >49                                         |       |
| 注: 1.测点在一层靠近声源房间中央测量 |                                             |       |

#### 3.1.2.4 丹麦 Orientering om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer ieksternt miljø

丹麦关于测量与评价环境低频噪声、次声以及振动的标准发布于 1997 年<sup>[1]</sup>。该标准规定了噪声与振动的测量方法和标准限值。对于测量方法的详细说明标准 NT ACOU-082 也被同时使用。

标准主要分为振动与噪声两部分。对于振动, 其“全身振动计权”(KB) 主要依照 ISO 2631-2<sup>[2]</sup>中相关规定, 其测量频率范围为 1-80Hz, 最大有效振级是其标准的基础测量量。在设定标准限值以反映环境可接受振动时仅考虑了可感受的振动部分。二次辐射噪声通常伴随振动出现而呈现低频性。对于低频噪声, 采用 10-160Hz 下的 A 计权声级进行评价, 并标注为  $L_{pA,LF}$ 。其建议标准比常规噪声标准低 5 到 15dB。其他二次辐射现象, 如颤动的窗户不被考虑在内, 具体限值如表 4 所示。

表 4 丹麦环境保护推荐标准

| 建筑类型                            | 计权加速度级, $L_{aw}$ | 计权加速度, $a_w$          | 相应计权速度, $V_w$ | 振动级 (VdB) | 低频噪声限值, $L_{pA,LF}$ |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------|---------------------|
| 居住用房区域 (昼间、夜间), 混合区 (傍晚、夜间), 院校 | 75dB             | 5.6mm/s <sup>2</sup>  | 0.16mm/s      | 75        | 20dBA               |
| 混合区居住用 (昼间)                     | 80dB             | 10mm/s <sup>2</sup>   | 0.3mm/s       | 81        | 25dBA               |
| 办公室及教室                          | 80dB             | 10mm/s <sup>2</sup>   | 0.3mm/s       | 81        | 30dBA               |
| 其他企业房间                          | 85dB             | 17.8mm/s <sup>2</sup> | 0.5mm/s       | 86        | 35dBA               |

#### 3.1.2.5 瑞典, SOSFS 1996: 7/E

瑞典低频噪声指南主要依据 Socialstyrelsen (国家卫生局) 标准《SOSFS 1996: 7/E “室内噪声与高噪声级”》<sup>[3]</sup>, 室内噪声限值规定不得超过 30dBA。但是低频噪声指南中并未对低频噪声做明确的限值规定, 而是提供了可能产生烦恼情绪的低频噪声特性, 结构噪声推荐限值如表 5 所示。

表 5 公共卫生噪声评价——低频噪声推荐限值

| 1/3 倍频程, Hz | 等效声压级, dB |
|-------------|-----------|
| 31.5        | 56        |

|     |      |
|-----|------|
| 40  | 49   |
| 50  | 43   |
| 63  | 41.5 |
| 80  | 40   |
| 100 | 38   |
| 125 | 36   |
| 160 | 34   |
| 200 | 32   |

### 3.1.2.6 美国国家标准学会，ANSI：ANSI S3.29-1983

由于地下轨道交通存在一定的周期性，故在使用振动进行测量或评价时需要在此方面进行考虑，结构噪声在此点上也存在相同问题。在 ANSI 标准 ANSI S3.29-1983 中，规定了频繁振动事件所采用的方法系数评价方法。放大系数计算公式如下：

$$F_n = 1.7 \times N^{-0.5}$$

式中，N 为一天中事件次数（N>3）

放大系数对照表具体如表 6 所示。

表 6 ANSI 放大系数对照表

| 居住类型                                                                                                                                                                | 时段        | 连续、间歇或重复振动 | 较低频率的冲击振动<br>(3 次或更少) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------------------|
| 医院手术室和特殊工作场所 <sup>1</sup>                                                                                                                                           | 全部        | 0.7-1      | 1                     |
| 居住区（良好环境标准）                                                                                                                                                         | 0700-2200 | 1.4 至 4    | 90                    |
|                                                                                                                                                                     | 2200-2400 | 1 至 1.4    | 1.4                   |
|                                                                                                                                                                     | 2400-0700 | 1 至 1.4    | 1.4                   |
| 办公室 <sup>2</sup>                                                                                                                                                    | 全部        | 4          | 128                   |
| 工作车间 <sup>2,3</sup>                                                                                                                                                 | 全部        | 8          | 128                   |
| 注：<br>1.适用于正在进行手术或其他特殊工作正在进行时段。其他时间振动只需要等同于居住区标准即可，但应注明或警示可能存在高振动风险；<br>2.非频发振动需要避免未经考虑可能出现振动的可能性，以防止影响相应的工作效率；<br>3.对于特殊工种（如锻造、冲压）应该特殊考虑，可参照《ANSI S3.18-2002》相关要求。 |           |            |                       |

## 3.2 国内相关监测与评价方法研究

在我国开通地下轨道交通的城市中，由列车运行所引发的结构噪声扰民情况已比较普遍。几乎所有开通地铁线路的城市环境保护或其他相关部门都不同程度的接到或受理过相应信访、投诉。尽管建设部于 2005 年颁布实施了 GB/T50355-2005《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》，对建筑物室内振动做出了 1/3 倍频程限值要求，但由于缺乏针对性，对轨道交通噪声与振动问题处理效果甚微。直至 2009 年住房和城乡建设部才以标准 JGJ/T170-2009《轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及测量方法标准》对轨道交通环境影响进行限制。标准内容所存在问题前文已进行讨论，在此不再赘述。其间，上海市针对地区问题也出台了 DB31/T470-2009，但总体而言这些标准在环境保护部门处理问题时

依然存在一定程度不足。

对于此类问题，国内已有大量学者进行相关问题研究。辜小安，谢咏梅等<sup>[4]</sup>对建筑物二次辐射噪声原理、环保部及建设部标准等问题进行探讨，认为地铁列车运行对建筑物二次辐射噪声影响主要在16~200Hz频率范围，并建议参照美国使用最大声级对结构噪声进行评价。

储益萍<sup>[5]</sup>对地铁引起的结构振动与噪声进行了相关性分析，认为列车经过时产生的二次结构噪声在25 Hz~300 Hz的中低频段范围内增量较大，特别是在63 Hz附近最大增量可达到24 dB(A)~30 dB(A)，由于低频声的波长长、衰减较慢，因此敏感目标室内居民的烦恼度较大。此外，振动与噪声相关性分析得到2~3层房屋的噪声与振动相关性较好，达到0.99以上，而多层房屋相关性较差。

毛东兴，杨碧君等<sup>[6]</sup>对地铁引起的二次辐射噪声进行了相关烦恼度研究，认为在等响情况下，窄带信号的烦恼度在1000Hz最小，随频率增大烦恼度增大。频率范围为100Hz~1000Hz时，烦恼度随频率增加而递减。在100Hz以下时，烦恼度随频率的变化呈现倒抛物线特性，在50Hz处出现烦恼度峰值。

申道明，张来栋等<sup>[7]</sup>对地铁引起的二次噪声特性及评价量进行了实测与探讨，通过测量得到高频段（1000Hz以上）二次噪声与背景噪声基本重合，25Hz~250Hz实测与背景信号差值均在6dB以上，而90%测点数据 $L_{Ceq}-L_{Aeq}>20dB$ ，且二次噪声主要频率在16~250Hz范围内。

对于地铁引发的结构噪声与振动研究中还有单涛涛等<sup>[8]</sup>，祝培生等<sup>[9]</sup>分别就地铁引发的地面振动阻尼矩阵模式以及地铁对建筑物噪声与振动影响等相关问题进行了分析。编制组主要国内调研文献如表7所示。

表7 国内研究文献调研列表

| 论文名称                          | 作者    | 时间     |
|-------------------------------|-------|--------|
| 地铁引起的二次辐射噪声烦恼度研究              | 毛东兴.等 | 2010 年 |
| 地铁引起的结构振动与噪声及其相关性分析           | 储益萍   | 2011 年 |
| 地铁列车运行引起建筑物二次辐射噪声执行标准探讨       | 辜小安   | 2012 年 |
| 城市轨道交通二次结构噪声执行标准及验收监测中几点问题的探讨 | 潘晓岩   | 2012 年 |
| 地铁运行引起室内二次辐射噪声烦恼度阈值分析         | 申道明.等 | 2013 年 |
| 地铁引起二次噪声特性及评价量实测与探讨           | 申道明.等 | 2013 年 |

### 3.3 国外相关监测与评价方法研究

编制组对国外研究成果也进行了文献调研。Ass.Prof. KONSTANTINOS VOGIATZIS<sup>[10]</sup>对希腊至比雷埃夫斯地铁沿线结构噪声与振动进行了相关分析得出结论，声压级与振动级关系为 $L_p=L_v-22$ ，采取减振措施的区段噪声与振动等级都要低于普通区段（未采取措施），而特殊轨道段中，最大结构噪声级与减震措施转换特性有关，并认为此类现象的出现主要与减震措施在100Hz以上效果减弱有关。

Tim Preager, Jihyun Cho, Marc Bracken. et al<sup>[11]</sup>对多伦多地铁振动影响评估报告中表示。对于列车滚动接触疲劳与钢轨波磨对结构振动影响巨大。单对不同车轮条件比较，其振动差值可以达到4-5dB。尽管此类变化对于振动影响不算很大，但是由其引发的摩擦噪声却相对较强。同时，对于振动等级受车速影响也产生非常明显差别。

Jeffrey A.Zapfe, Hugh Saurenman, Sanford Fidell, et al.<sup>[12]</sup>在由美国联邦运输管理局（FTA）主办，交通发展有限公司协办合作研究项目 D-12 报告中对轨道交通引起的建筑物结构噪声与振动进行了系统分析。研究认为，现行的美国标准（FTA 指南）不能客观反映主管烦恼度。



通过对纽约、萨克拉门托、波士顿、达拉斯以及多伦多 5 个城市进行社会调查与实际测量的基础上, 总结得到地铁所引发的结构噪声主要以低频为主、振动最大振级出现在 63Hz 附近、结构噪声与振动关系应满足  $L_p=L_v-5\text{dB}$  的特性等结论。编制组主要国外调研文献如表 8 所示。

表8 外文文献调研列表

| Document name                                                                                               | Author & Report Unit                                                                             | date                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Noise & Vibration Update – Three West-End Communities (B-D Subway Line)                                     | CHIEF EXECUTIVE OFFICER'S                                                                        | Update for October 2012 |
| Subway Vibration Assessment Report<br>Old Mill Drive/Traymore Crescent Area<br>& Bloor Street West          | Tim Preager, B.A.Sc., P.Eng;<br>Jihyun Cho (Ken), Ph.D., P.Eng;<br>Marc Bracken, M.A.Sc., P.Eng. | 11 July 2012            |
| Excessive Noise Level Measures in a Large Metropolitan Subway System                                        | Marissa A.Barrera,MS.CFY-SLP;<br>Robyn<br>R.M.Gershon.MHS.MT.DrPH                                | November18th-20th2005   |
| Ground-borne vibrations due to dynamic loadings from moving trains in subway tunnels*                       | Xue-cheng BIAN, Wan-feng JIN,<br>Hong-guang JIANG                                                | 2012 13(11):870-876     |
| Groundborne Noise and Vibration Assesment from Metro operation in the New Athens Metro Extension to Piraeus | Ass. Prof. KONSTANTINOS<br>VOGIATZIS                                                             | November 2008           |

## 4 标准制修订的基本原则和技术路线

### 4.1 整体思路及条款说明

鉴于前期结构噪声调研结果, 课题组研究决定本次监测方法标准制定以各次地下轨道交通结构噪声事件作为基础, 建立科学、准确、有代表性的监测方法。监测方法包含①以 1s 为时间单元进行倍频程时间历程数据监测; ②通过对 31.5Hz~250Hz 低频噪声数据观察, 确定测点结构噪声特征频率; ③对特征频率数据以  $L_{\max,i}-10\text{dB}$  为基准进行测量时段各噪声事件截取; ④将所有噪声事件持续时间内低频噪声数据进行能量平均; ⑤最终计算出 31.5Hz~250Hz 倍频带声能均值, 并对 31.5Hz~250Hz 中心频率范围平均声压级进行 A 计权得到低频 A 声级值。标准制定思路及相关条款具体解释如下:

#### (1) 选择高效的数据采集方法

由于传统噪声测量使用的时间等效 A 声级, 即  $L_{Aeq}$  评价方式对于地下轨道交通结构噪声评价存在诸多不足。所以在进行结构噪声监测时, 应采用时间历程的方式进行数据采集。时间历程数据应以 1 秒为单位, 测量整个测量时段的噪声随时间变化。由于噪声监测数据采集频率通常小于 1 秒, 所以标准 5.4.1 中规定各中心频率采集数据应以单位时间进行等效后记录。同时, 时间历程监测应测量低频段各倍频程中心频率数据, 以方便对数据进行后续计算。此外, 为使测量数据计算更具可操作性, 并使测量数据能够有效归档保存, 所测量的时间历程数据应能够进行导出, 并导出成.txt 或.xls 等常见数据格式。

## （2）噪声监测频次

在 JGJ/T170-2009 标准中对二次辐射噪声监测规定了夜间最小包含车次数，规定通过列车数量不应少于 5 列。在实际中，由于测点距离同一线路双方向轨道距离是不同的，往往同样的车速所造成的影响也存在差别，此点差异在距离轨道较近的敏感建筑物室内尤为突出。为避免此种情况对测量结果的影响，本标准规定最少列车通行次数为 6 次。以当下地铁运营情况为例，间隔一段时间发行一对列车是比较普遍的。因此在通过同一测点时，偶次数可以避免如奇次列车通过距离不一所造成的结果差别。

## （3）选取特征频率

为突出结构噪声低频特性，避免在使用 A 声级时间历程数据进行事件截取时产生问题。在事件截取之前应选择测量点所对应最具代表性频率点作为该点位地下轨道交通结构噪声特征频率。以该特征频率数据进行事件截取。选取特征频率时应优先选择在各中心频率时间历程数据中峰值最高的频率为特征频率，对于峰高较接近的两个或几个频率，应选择列车不通过时背景值较低的频率。

## （4）进行事件截取

参照声暴露级的运算方法，事件截取时应在特征频率下将该频率每次过车最大声压级减 10dB 时间段作为截取事件持续时间。在持续时间内选取倍频程中心频率 31.5Hz~250Hz 低频数据作为该次事件所包含的地下轨道交通结构噪声。由于列车通过测量点附近时车速、轮轨等可能存在差异，各次噪声事件持续时间可能也不一样。但持续时间应有一定的限定条件，为了避免测量过程中一些突发事件对测量结果的影响，持续时间最短不应小于 5 秒，如持续时间小于 5 秒，则该噪声事件应视为无效事件。

## （5）测量结果

为与国家现行标准相互衔接，测量结果应能正确反映测量过程中全部噪声事件低频各频率能量水平，故应对全部持续时间内噪声数据做分频能量平均。此外，为配合噪声评价 A 计权普遍认同现状，更好的为测量结果评价提供便利，在低频数据分频能量平均的基础上，还可增加低频 A 声级值或其他评价量。

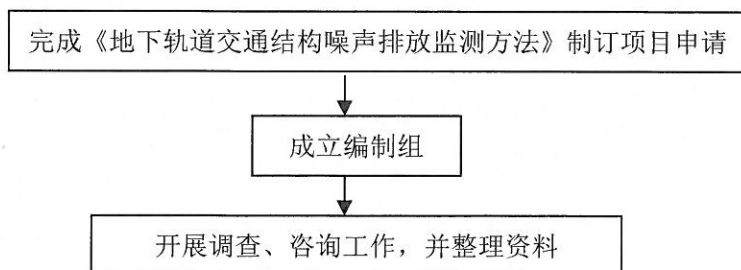
# 4.2 标准的适用范围和主要技术内容

本标准的适用范围是：适用于受地下轨道交通结构噪声影响的噪声敏感建筑物室内噪声监测。

本标准的主要技术内容是：规定了地下轨道交通结构噪声监测的测量条件、测量方法、数据处理、测量结果与计算方法、监测质量保证等技术要求。

# 4.3 标准制修订的技术路线

根据资料调研和专家讨论、审议，本标准制订的技术路线见图 2。



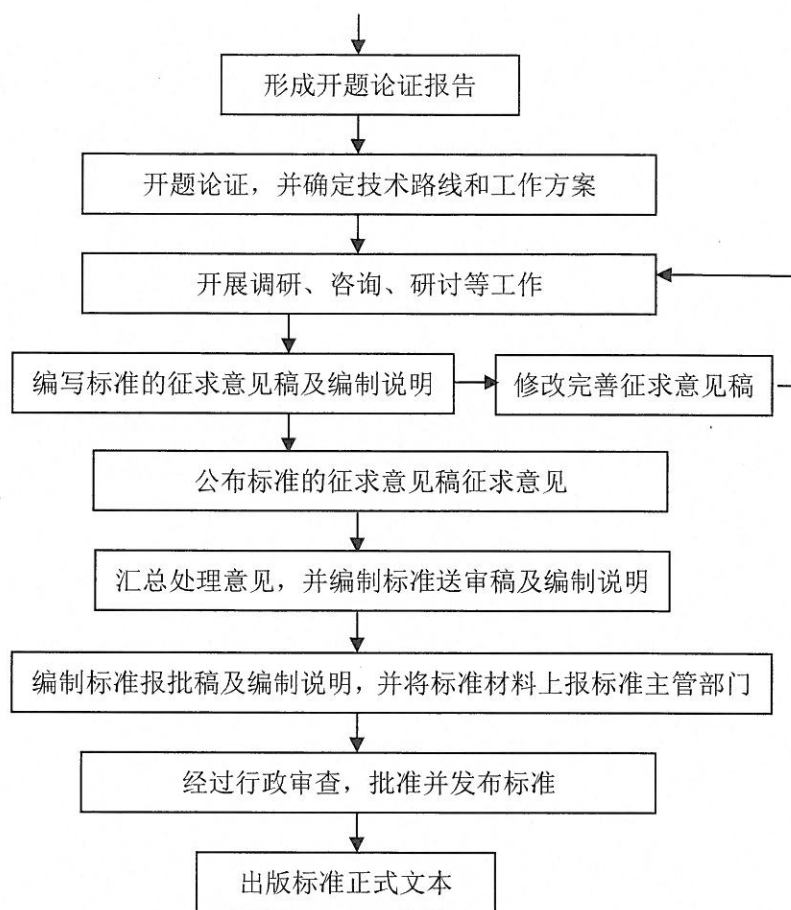


图2 本标准制订的技术路线图

## 5 方法研究报告

### 5.1 建筑物室内结构噪声基本规律研究

#### 5.1.1 轨道振动及其大地传播

列车在隧道内（或地面、高架桥等）的轨道上行驶时，将产生振动。振动同过道床传递给隧道结构（对于地面列车，则传递给路基或高架桥结构），结构的振动再传递给大地，最终通过地层传递给附近地面上的建筑物，引起建筑物的振动。

列车运行形成的振源强度大，频率范围宽，不但与列车自身的属性有关，如动力牵引、列车总重量、轮轨形式、行进速度等，还与轨道的动态刚度密切相关，包括是轨道扣件的弹性、道床板的弹性等均会影响振动强度（此部分将在后文中深入分析）。

轨道振动传递到隧道（或路基、高架桥）等结构上时，会在这些结构上形成受迫振动。由于这些结构往往采用了厚重的混凝土，刚度很大，固有频率较高，在列车振源的强烈作用下，衰减较少地将振动传递给与其紧密接触的大地。

振动在大地中的传播可能会变得比较复杂，将受到地层、土壤等多方面的影响。一般而言，若把大地的土壤结构看作匀质的，那么振动向外传递时，因土壤自身吸收振动的衰减不是主要因素，主要因素是振动的扩散衰减，也就是由于振动向外传播时的发散引起的衰减，即距离衰减。列车振源可以近似地看作线性振源，发散引起的衰减理论上距离加倍，振动衰



减 3dB。土壤结构不可能完全是匀质的，振动传播也不可能是理想的发散衰减，会因为地层的不均匀形成振波的弯折、反射、甚至干涉等，也会因土壤的不同引起传播过程中吸振的不同，因此实际大地振动传播要比线形振源的理想传播复杂。这种复杂性体现在振动强度的复杂变化和振动频率的复杂变化上。

一般而言，轨道振动振源的频率范围相对比较宽的，根据国内外大量轨道线路的隧道（或路基、高架桥）的振动实测来看，明显地存在频率峰值，且峰值的频率通常在 20-200Hz 范围内。振动在地层中向建筑物传播时，由于土壤吸收作用，高频率的成分的衰减程度一般会比低频率成分要高一些，也就是说高频率成分衰减量会更大一些，500Hz 以上的振动能量衰减很快。因为在频率上，衰减不会出现突变，固而对于振动的频率特性而言，地层的振动主要产生了衰减作用，而不会改变频率的峰值位置。

### 5.1.2 建筑结构的振动

轨道振动通过地层传递给附近的建筑物，建筑物的结构随之振动。建筑一般由梁、板、柱等结构构件构成，由于这些构件存在一定的动态刚度，在地层传来的振动激励下，不但会由于受迫作用而产生跟随地层振动的振动，还会在结构的共振模态频率上形成共振振动。图 3 给出了板的振动模态示意图。共振模态主要取决于建筑结构的尺寸和刚度。

以琴弦做比喻，琴弦共振模态的振动频率主要决定于其长度和拉力。在自由状态下，其共振频率的波长应是其长度 1/2 的整数倍；当施加约束（力）时，共振频率会有所提高。

同样，建筑结构的共振模态与建筑构件的尺寸和安装形式密切相关，在共振模态上，当外部振动的激励传来时，将形成共振，产生较大的振幅、速度和加速度。由于振源能量的频率范围主要集中在 20-200Hz 范围，最多扩展到中频 500Hz，因此，被激发的共振模态频率只可能存在于 20-500Hz 范围内。在 20-500Hz 范围内，建筑结构的振动是受迫跟随振动与共振模态频率上共振振动的和。

其中受迫跟随振动部分的强度将随着与振源距离的增加而减弱，即地面上，建筑的高层的受迫跟随振动的强度应该要比建筑低层的受迫跟随振动的强度要小；但是，其中共振振动部分的强度不一定遵循距离增加而减弱的规律，可能要复杂得多，一旦共振频率上传来的激励能量适合的话，即便在建筑的高层上，也可能产生远大于低层的建筑结构振动。

另外，一些轻制的建筑构件，例如窗玻璃、门板、装饰薄板、家具薄板等，由于质量轻，振动效率高，在共振时，产生的振动可能会非常大，甚至远大于振源传来的受迫跟随振动的强度。这就是在某些情况下，列车经过时，建筑窗、门、薄板等轻质会出现异常剧烈振动的原因。

共振模态上的共振会影响到振动测量。当建筑构件处于某个共振模态上发生共振振动时，将形成明显的波峰和波节，波峰处振动大，波节处振动小，波峰和波节之间的间隔一般是波长的 1/2。也就是说，以 200Hz 的振动为例（混凝土结构中波速约 2000m/s，其波长约 10m），在建筑结构每 5m 范围内，振动强度将出现从极大值逐渐过渡到极小值的变化，这为在建筑结构上安装拾振器进行精确测量时带来一些麻烦。

基频共振模态上往往存储的能量是最大的，也就是说，建筑结构共振基频上的振动是最大的，其强度往往比其低的频率上的受迫跟随振动的强度大数倍甚至数十倍。

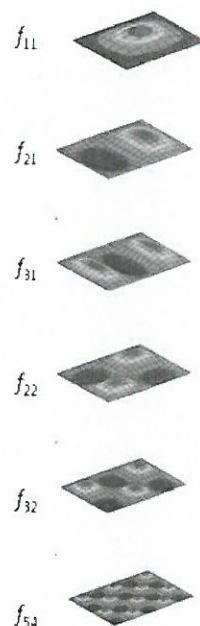


图 3 建筑结构的共振模态示意图

### 5.1.3 建筑结构振动的空气声辐射

建筑结构，主要是板（包括楼板、墙板）振动时，将大量向建筑室内辐射声能。对室内辐射噪声的理论模型可以看作是建筑结构界面振动的运动，驱动了界面处空气分子产生受迫振动，形成空气声辐射。

理想情况下， $dS$  面积上与建筑构件垂直的平面振动时，平面界面附近辐射出理想的平面波，其声功率应为：

$$W_{noise} = I \cdot dS = \frac{p^2}{\rho_0 c} dS$$

其中， $W_{noise}$  为噪声声功率，(W)，

$I$  为声强，(W/m<sup>2</sup>)，

$p$  为声压，(Pa)，

$\rho_0$  为空气密度，(kg/m<sup>3</sup>)

$c$  为空气声速，(m/s)

$dS$  为界面辐射面积，(m<sup>2</sup>)

上式所确定的辐射声功率可以改写为界面运动速度和辐射效率的形式，其中辐射效率是需要通过实验确定的界面声源辐射出声能的比例因子，有：

$$W_{noise} = \sigma u^2 \rho_0 c \cdot dS$$

其中： $\sigma$  是辐射效率，一般 $<1$ ，

$u$  为辐射界面的运动速度均方根值，(m/s)

在实际情况下，建筑界面既不是理想的平面，也不是无限大，因此，引入辐射效率有助于分析问题的简化。美国声学家白瑞纳克（Beranek）于 1971 年分析墙体声辐射时引入了这一概念，他的分析中指出，辐射效率与材料材质、边界约束情况及频率有较大关系。对于金属板、玻璃、混凝土、石膏板等材料，高频振动以剪力波为主导，辐射效率可以认为接近于  $\sigma=1$ ；在低频部分含有大量的弯曲波， $\sigma$  要比 1 小很多；而在吻合临界频率附近， $\sigma$  将出现大于 1。对于混凝土等厚重材料， $\sigma$  也要比 1 小很多。因此，在实际建筑中，轻薄的板，空气声辐射能量相对要高些，甚至吻合临界频率附近可能出现放大性的空气声声辐射；而厚重的板，空气声辐射能量要低得多。

必须指出的是，由于空气声辐射效率值的存在，建筑结构中振动的频率特性，甚至是频率峰值的位置，可能与辐射后形成的室内空气声的频率特性具有较大差异。这些差异主要是由建筑结构界面材料及其安装形式决定的。可能存在的情况是，在结构振动中，其峰值频率上的振动由于辐射效率的不同，辐射成为室内空气声时，不再成为频率上的峰值；而振动中非峰值频率，在室内空气声中成为了峰值频率。

但是，整个轨道振动的传播到室内空气声辐射的过程中，系统是线性的，即振源的源强频率范围主要在 20-500Hz 内，那么辐射形成的空气声也将这一范围内。由于建筑构件所辐射的空气声具有频率越低辐射效率越低的趋势，一般在 40Hz 以下，空气声能的辐射能量就很小了。因此，在建筑室内大量的测量结果显示，轨道引起的噪声频率范围基本在 40-500Hz 范围内，其峰值频率也处于这一范围内。监测技术规范（暂行）的要求一致。



### 5.1.4 室内声场

从波动角度来看,室内空间是一具有若干固有频率的振动系统,受某些频率激发时,会形成驻波。封闭空间中,驻波有一维横向的,也有二维切向的和三维斜向的,如图4。驻波可看作是一种共振现象,称之为房间共振。驻波的频率即房间固有频率,也称之为简正频率,与房间几何尺寸及半波长整数倍有关。低频范围内,波长长,简正频率的数量少,越高的频率范围简正频率的数量越多。在非封闭空间,只要存在出现驻波的条件,如一维的平行界面组,或两两平行的二维围和界面组,均可以形成驻波,只是由于某方向界面的整体缺失,难于形成三维斜向驻波,故而与封闭空间相比,简正频率的数量将大大减少。

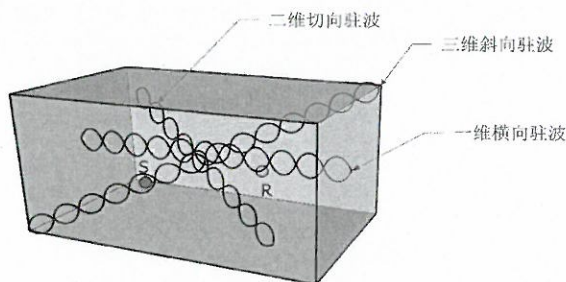


图4 三维空间中的驻波

建筑结构的界面成为声源,形成辐射声能,对空间形成了受迫振动。当声源含有与简正频率相等或接近的频率成分时,空间被激励发生共振,生成该频率的驻波。当声源为宽频带声源时,空间内将在声源频率范围内所有简正频率上发生共振,形成较多驻波。共振形成的驻波中存储了较大声能,若不同共振模式中出现相同的简正频率时,将形成累加效应,发生简并,驻波中储能按几何级数增大。宽带声源稳态发声,将在空间激发形成大量的驻波,一段时间后,驻波储能达到最大值,接收点处的声波含有了因驻波所致的稳态声波。

根据以上分析,有与房间驻波的存在,会造成室内声场的频率特性,与建筑结构辐射声能的频率特性产生较大变化,峰值频率的位置可能发生再一次的变化。因为房间声场仍然是线形系统,声能的频率范围依然保持在 40-500Hz 这个范围内。

另外一点必须考虑的是,由于驻波造成室内声场出现了不均匀,在房间简正频率上,特别是发生兼并的频率上,不同房间位置上将出现明显的波峰和波节,造成因位置选择而出现的测量误差。在声压级频率寻峰测量时,应选择多个不同的点位进行观察,以降低由于声场不均匀而造成的测量偏差。当然,也可以通过在房间内增加扩散板的方法提高房间的声场均匀度,降低驻波现象对测量的影响。

## 5.2 测量方法理论研究

在理想流体中媒质只能产生体积形变,即出催的压缩膨胀形变,媒质的弹性可用单一的体弹性系数表征,而这样的媒质只能产生系数与稠密的交替过程,即只能传播纵波。而固体中传播的声波除了仍能产生体积形变外,还会产生切向形变,它除了体弹性外还具有切变弹性,因此在固体中一般除了能传播压缩与膨胀的纵波外还能传播切变波,即横波。此外,固体的自由表面还会产生振幅随离表面深度而衰减的表面波。在实际生活中,由于结构的自屏蔽效应,以及声能在大密度介质中的快速衰减,我们所听到的结构噪声并不是真正意义上的声源所发出的声波通过固体介质传播来的,而是建筑结构受外界振动影响在内表面再次外辐射的可听声。

### 5.2.1 振动测量基础理论

对于地下轨道交通而言,振动是其主要能量辐射途径。由于地铁铁道与列车车轮之间的摩擦、碰撞、挤压等相互作用而产生的振动通过轨道、道床、隧道结构、外围土壤一级一级向外传播扩散,最终传导至与之相邻的建筑物,引起建筑物结构的振动,进而作用于人体。

此种振动在对建筑物内居民产生振动影响的同时还将引起建筑物墙壁、地板、天花板等固体结构振动,从而在房间内以声波的形式向外辐射,这种二次辐射的噪声被称之为结构噪声,它是一种低频可听声。单就地下轨道交通振动而言,由列车运行所产生的振动是纵波、横波、表面波多种波形共同作用的结果,其传播形态较为复杂。对于近场的振动主要以弯曲波为主,而远场则以表面波形式存在。

列车运行时,振源主要主要以人体反映较为敏感的低频为主,其中 50~60Hz 振动影响较大。在传播过程中,振动随着与轨道水平距离的增大而衰减,高频衰减大于低频,水平向衰减大于垂向。所以,实际影响建筑物的振动主要是以铅垂方向的 Z 向振动。在振动范围上,振动的影响范围基本在水平 100 米范围之内,超过 100 米的建筑物基本与环境振动背景一致,但实际的影响范围还取决于隧道结构与地质条件等原因,最终影响振动传播的主要因素可归纳为列车运行速度、埋深、地质条件等。当然,对于沿线建筑物的振动影响与建筑物结构形式、基础类型和水平距离也是相关的。

### 5.2.2 结构噪声测量基础理论

低频噪声通常是相对于中频和高频而言的噪声分类方法,一般的人们把低于 100Hz、150Hz 或 200Hz 的可听声称之为低频噪声,虽然低频噪声的界定值存在一些争议,但是上限频率一般不超过 250Hz,而地下轨道交通所引发的结构噪声属于这样的频率范围内。所谓结构噪声,顾名思义是由于固体(建筑物)结构所传到或辐射的噪声。正如前文中对于地下轨道交通结构噪声的讨论,实际在建筑物室内对人们产生影响的可听声往往并非由列车直接发出,而是振动传导再次辐射的结果。如图 5 所示,列车运行产生了相当强度的振动,这部分能量经隧道向周边地质结构传播,从而影响周边的建筑物。而传导至建筑物的振动将引起房间内表面墙壁振动,进而辐射噪声,被人耳所接收。这样的噪声往往具有低频性、周期性、短暂性、有调性以及可感知性等特点。

早在 2008 年颁布实施的 HJ 453-2008《环境影响评价技术导则-城市轨道交通》中就对由城市轨道交通所引发的结构噪声给出了相应的预测公式。

$$L_p(f) = VL - 20 \log(f) + 37$$

其中,  $f$  为倍频程中心频率,  $VL$  为振动加速度级,  $L_p$  为声压级。



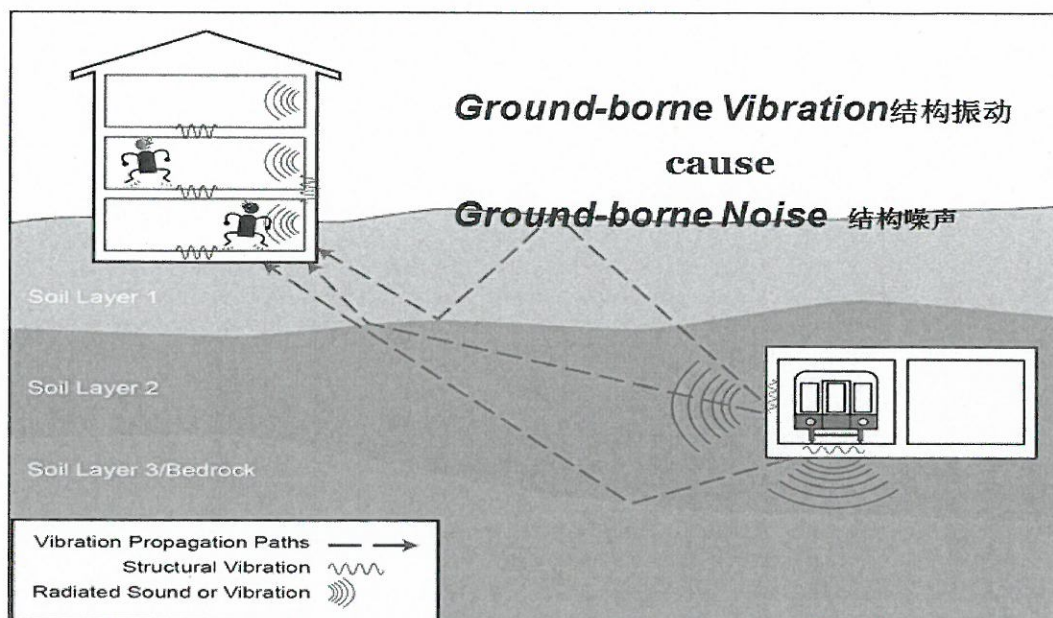


图5 结构噪声传播示意图

由此可见，影响结构噪声大小的变量主要为振动加速度级和频率。但是，仅考虑绝对量值与频率并不能够完全准确评价一段时间内由地铁列车所引发的结构噪声，对于其周期性、重复性同样需要在监测方法中加以体现。与 GB 9661-88《机场周围飞机噪声测量方法》中将飞机每次通过的噪声以事件进行对待的处理方式相似，地下轨道交通结构噪声监测同样应该将列车通过时的结构噪声划归为一次次噪声事件，才可以体现其周期性和短暂性特征。当然，区别于机场噪声测量方法以 A 声级或 D 声级进行监测，地下轨道交通结构噪声由于其特有的低频性和有调性，计权噪声级对于事件判别往往是不够准确的。从实际测量结果中可以发现，倍频程测量下列车通过时噪声与背景噪声在某个频率或某些频率上存在着巨大的差异，此点在方法的事件判别中依然需要考虑。

### 5.3 结构噪声与振动产生机制研究（参考 ISO14837-1:2005）

#### 5.3.1 焦点概述

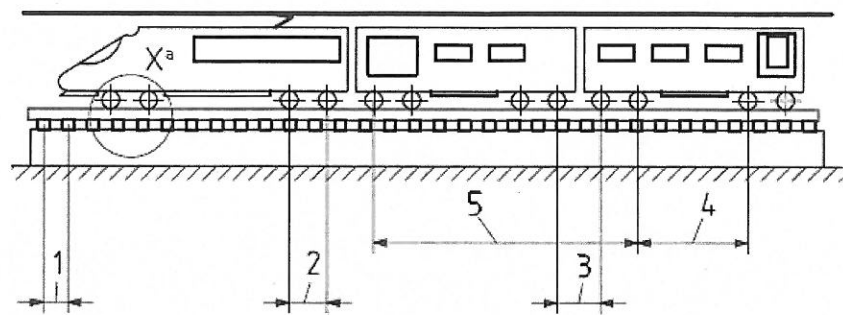
结构振动或结构噪声将对周围以居住为主要用途的居民区产生相当程度的环境影响。同时，对于敏感设备及进行敏感设备使用的房间也将产生相当的危害。在极端条件下，对于建筑物本身房屋结构还将产生破坏。

对于结构噪声与结构振动，本标准中主要研究其人体承受相关部分。此部分也是公众地下轨道交通环境影响关注及投诉焦点。对于人体而言，能够感受到的振动主要集中于 1~80Hz 频率范围内。此部分振动所引发的结构噪声主要由于振动激发了建筑物墙壁、地板、天花板，进而辐射噪声所致，该部分噪声主要集中于 16~250Hz 频率范围。在特殊情况下，结构噪声影响频率可能扩展至 500Hz 以下，但一般较少出现。

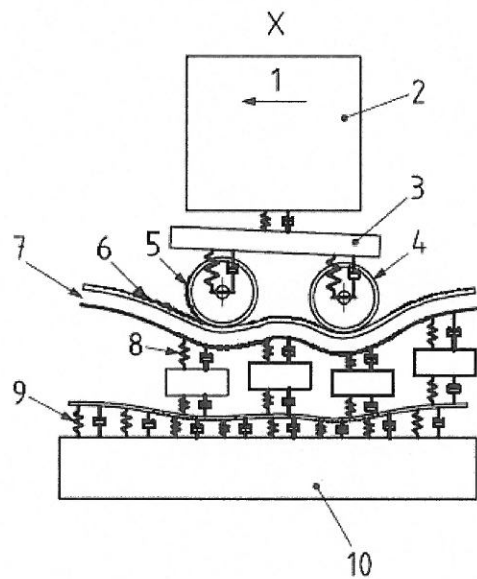
#### 5.3.2 污染产生及污染源

轨道系统是结构振动及结构噪声的主导污染源。振动的传播通过轮轨系统、基础设施结构、周边土层、邻近建筑物向外传播，最终导致结构振动或结构噪声。对于结构噪声及振动而言，必须说明的是从污染源最终影响至受声点的程度决定于非常多因素，不同的位置中，

有些因素相比于其他因素可能尤为重要。具体影响关系在本章 5.1 建筑物室内结构噪声基本规律研究部分已进行详细分析,在此不再重复。对于影响因素的各部分量化参数需通过经验、数据及相关测量仪器综合获得。列车及轮轨产生振动部分及决定参数示意,如图 6、7 所示。



图中：1.轨道支撑间距； 2. 内架轴距； 3. 转向架间距； 4. 车内轴距； 5.车间轴距  
图 6 列车振动模型及产生要素



图中：1. 车速；2.车厢载重质量；3. 转向架质量；4. 非簧载质量；5. 车轮粗糙度；6. 轨道粗糙度；7. 轨道阻抗；8. 典型轨道支撑结构；9. 典型构造；10. 大地阻抗  
图 7 轮轨振动模型及产生要素

### 5.3.3 激发机制

激发使得列车在轮轨上的运行过程产生大量振动，通常激发机制主要由移动载荷、轮轨不平顺、参数激励、轮轨瑕疵加成、轨道不连续、车辆悬架、钢材硬度、水平载荷、行车条件、极端环境因素几个方面。

移动载荷主要为装载的列车在轨道中行进引发轨道和支撑介质形变。在固定位置下，移动载荷将呈现时间动态特性，并伴随产生弯曲波，最终进入轨道及土质结构中。由于存在如边界条件、轨道类型不统一、土层振动传播特性不一等因素，这类激发在不同位置下并不统一。而对于在弱土质结构下运行的高速列车，其产生激发还将伴随产生瑞利波（平面波）。瑞利波的产生将类似于超音速飞机所产生的音爆一样，产生非常高等级的振动影响。这将对周边临近区域的稳定性造成显著影响。此类问题可通过布设轨道道床、强化混凝土板，并配



合垂直桩基进行控制。在隧道中，隧道衬砌和逆变板将提供一定的约束效果，可降低周围环境振动等级。

轮轨不平顺主要为接触面的随机不规则，铁轨和车轮在此条件下将产生受迫激发。对于轨道不平顺所引发的激励，在新建线路中比较明显。随着线路运行时间的增加以及日常的打磨维护，此类激励将随时间逐步削减。

参数激励主要是指由轨道各种独立部件（如嵌入式轨道中使用的碎石枕木、弹性底板等）引起的激励，车轮将由于这些位置的刚度变化产生动态力变化，这部分移动的动态力将进一步激励车辆和轨道。车速与支撑部件之间的间距将决定主激发频率。同时，车轴间距和转向架间距将伴随主频率产生其他谐波分量。当这些谐波频率与主频率相近时，将使得车辆轮轨系统及周边环境被大量激发。

轮轨瑕疵加成主要由列车大量运行过程中车轮磨损所致。对于轨道，变化波长的周期性不规则作用将导致粗糙程度的加剧，最终形成波纹。这种波纹将进一步影响车轮，导致车轮出现磨平、椭圆或不均匀，最终产生车轮表面粗糙或形成瑕疵。这种不规则将随着线路运行时间的增加发生变化。除此之外，对车轮进行不恰当或缺乏打磨也将产生相似效果。

除上述因素之外，诸如道岔间隙、钢轨接头及轨道下沉所产生的轨道不连续，包含锁定悬挂在内的车辆悬架系统，随机周期变化影响下刚度变化，小弯曲半径下产生的横向载荷，以及加速、减速时产生的动态作用力都将引发激励的产生。这些固定因素仅仅是大多轨道系统引发激励或振动的主要因素，由于运行列车设计中的不同以及实际线路间列车选型的差别，与车辆相关的激发机制还存在其他变化因素。在所关注的低频频率范围内，由非弹性质量决定的车轮间距阻抗将起决定性作用。

#### 5.3.4 传导途径

轨道交通系统对地面高层建筑的影响主要以地质结构所传导的表面波为主。而地下轨道交通系统所产生的振动主要通过压缩波和剪切波向外进行传导。对于距离隧道较远的位置，传导仍然表现为表面波形式。

通常经过传导的结构噪声频率范围集中于 250Hz 以下低频部分。只有隧道位于特定的地质条件（如岩层）、受影响建筑物直接与隧道或岩层土质相连接、隧道与建筑物之间间距非常小或建筑物与岩层结构间土质夹层很薄时才会产生高频影响。由轨道道床系统所产生的低通削减效应更多的作用于高于 250Hz 的中、高频范围噪声。由于地质结构的阻尼效应，随着距离的增加，振动源强频谱将发生一定变化，高频部分将被大量吸收，而低频部分则成为实际影响周边建筑物的主要因素。

对于如地铁上盖结构的建筑物，建筑结构成为了绝对的传播途径。对于这样结构的建筑物进行预测或评价时，需要重点考虑建筑结构的动态响应特性。此时的传导不再仅仅存在压缩和剪切波，还有可能出现弯曲波等情况。通过传导途径进行振动削减需要尽量避免人造结构产生传播特性。此外，传导途径中跨越的地表水也可以对削减产生一定的作用。

#### 5.3.5 受声点

对于受影响的敏感建筑物，正如 5.3.1 部分所述，受声点关注的焦点频率应为 1~250Hz 部分影响，只有特定结构下需要考虑高频部分。

受声点室内所再次辐射的结构噪声除了受结构振动影响之外还与房屋本身内表面的辐射效率相关，如果内表面辐射效率较高的频率与传导频率重合将产生一定的耦合作用。此点在本章 5.1 部分已进行分析，再次不做重复。

## 5.4 地下轨道交通结构噪声频率特性研究

### 5.4.1 现状调查试验

实际信访工作进行过程中常常出现依照现有方法进行监测，监测结果符合相关国家标准限值规定，但居民在实际生活中确实感觉到轨道交通的运行给生活带来了非常严重的影响，往往在信访工作进行过程中难以给公众合理解释。标准组结合日常信访任务进行现状调查测量，通过实际监测进行数据分析，列举三次测试结果如图 8 所示。

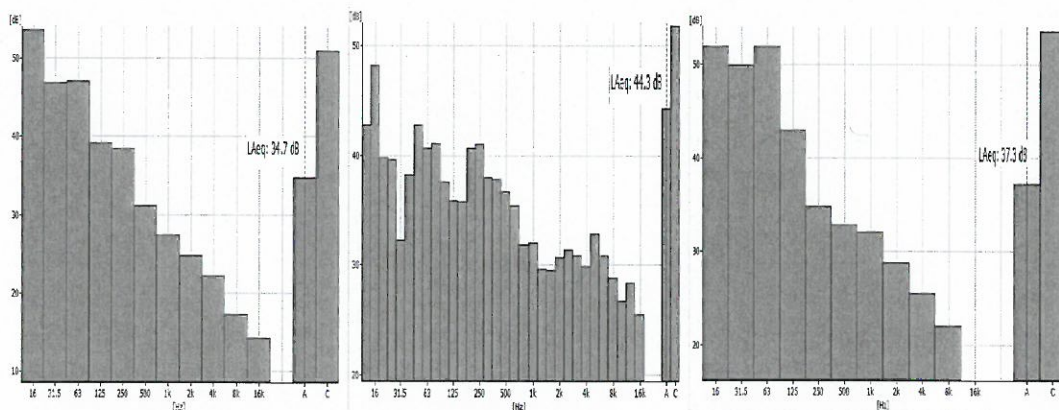


图 8 室内噪声实测现状

三次测量结果 A 声级事件等效均值分别为 34.7dB(A), 44.3dB(A), 37.3dB(A) 均达到国家标准 JGJ/T170-2009 昼间测量时段标准限值要求（其中第一组数据测点位于 1 类区，第二、第三组数据测点为 4 类区居民住宅室内）。当然，在上述三次的测量 A 计权结果中并未采用 JGJ/T170-2009 标准要求剔除 16Hz~200Hz 以外部分噪声，但如依照标准要求对 200Hz 以上声能进行剔除，将使得测量结果更低，不产生结论性变化。

现状调查测试过程中，我们在国标监测方法测量基础之外还进行了时间历程频程测量。通过测量结果，如图 9 所示，可以清晰表明，在列车通过时噪声的频率分布与背景噪声频率分布存在明显差异，其中以 63Hz 为代表的特征频率分别为 62.4dB 和 43.5dB，其差值相差近 20dB 之多。单就列车通过时间各频率相比较，500Hz 以上中高频部分其在噪声能量中所占比重微乎其微。

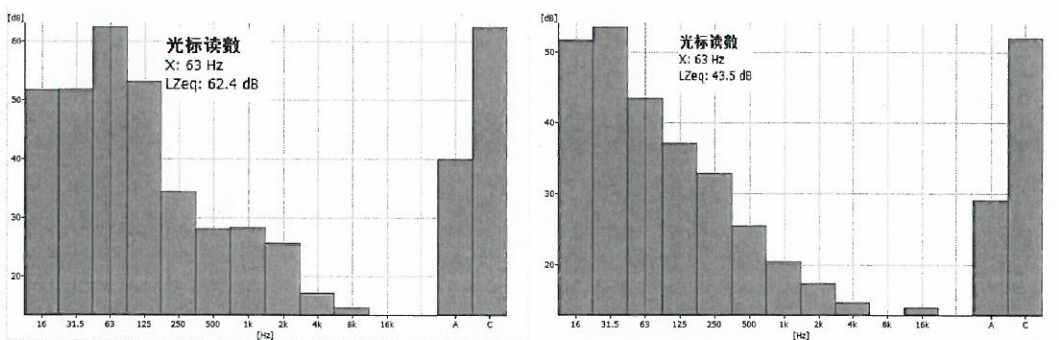


图 9 现状调查单频过车与背景比较

### 5.4.2 振动与结构噪声比对同步试验

在同一测点下进行噪声与振动同步时间历程测量实验，获取测量时间段内噪声与振动时间变化规律，并对比噪声与振动频率特性关系。

- (1) 监测仪器：B&K2250 噪声分析仪；AWA6256B+T 振动分析仪。
- (2) 测量频率范围：噪声，12.5~20KHz；振动，1~80Hz。
- (3) 时间历程记录单元：单位时间（1 秒）
- (4) 监测点位：某小区住户卧室内（一层），传声器靠近室内中央位置（不在中央位置），拾振器位于室内中央。测点及所处声环境示意图如图 10 所示。

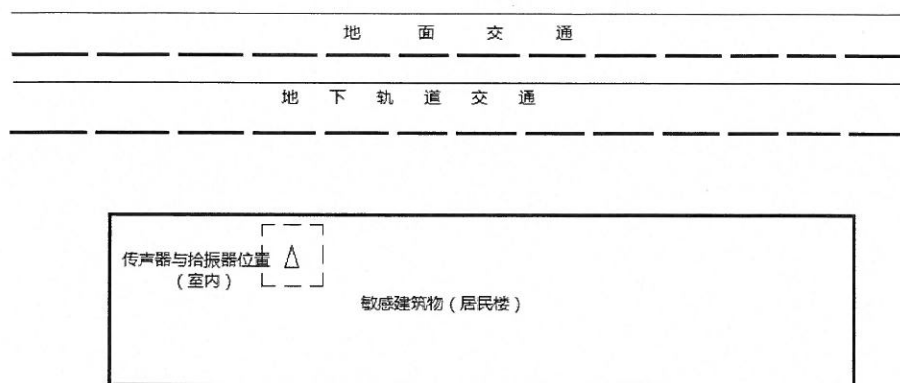


图 10 结构噪声与振动测点示意图

#### 5.4.3 测量数据比对结果

##### 1、测量数据采集

噪声数据采集采用 1/3 倍频程时间历程方式，以单位时间（1 秒）为记录单元测量全过程各频率线性噪声时间变化。测量前后进行 1KHz 声校准，并使用 125Hz、250Hz 低频校准器对测量仪器低频线性响应进行验证。振动数据采集采用 1/3 倍频程环境振动 Z 向方式进行，记录测量全过程加速度级时间变化。

测量过程中关闭被测房间全部声源，并紧闭门窗，移除书架中易受振动发声物品。

采集数据通过相应软件进行数据导出，并生成测量过程数据及图表。

##### 2、频率特性分析方法

通过标准方法进行噪声事件截取，记录对应持续时间。将对应时间段内振动数据作为列车通行事件结构振动结果。比较各次事件噪声与振动试验结果频率相关性，发现特征频率与振动对应关系。

##### 3、示例与结果分析

由于结构噪声存在低频特性，以源强产生机制及房屋结构理论分析基础，编制组首先对事件截取必须的特征频率进行确定。结合试验过程手工记录列车通行时间，编制组初步确定了 63Hz 为该试验房间对应结构噪声特征频率，并进行事件截取。结果中，各次噪声事件的相关性极强，不同方向、不同通过时间结构噪声最大值均出现于倍频程中心频率 63Hz 处。且 63Hz 满足标准 6.1 中所规定的相关内容，典型事件及全部事件平均值图像如图 11、图 12 所示。

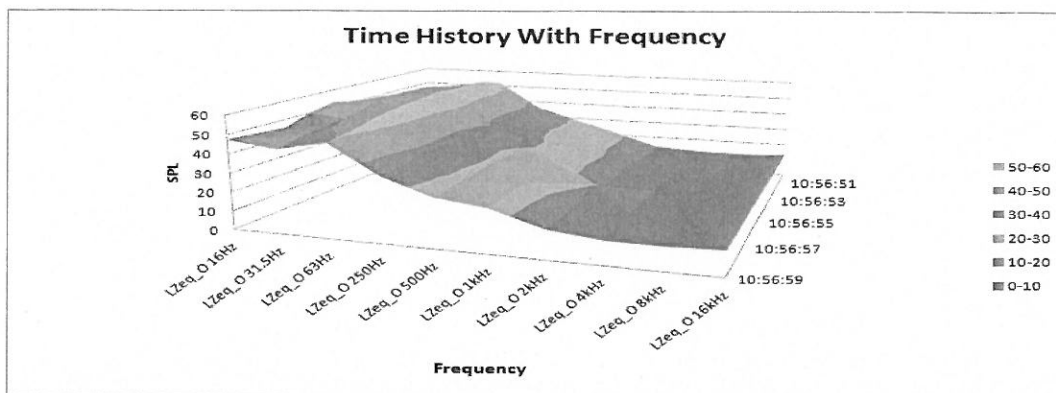


图 11 典型事件结构噪声频谱时间历程分布

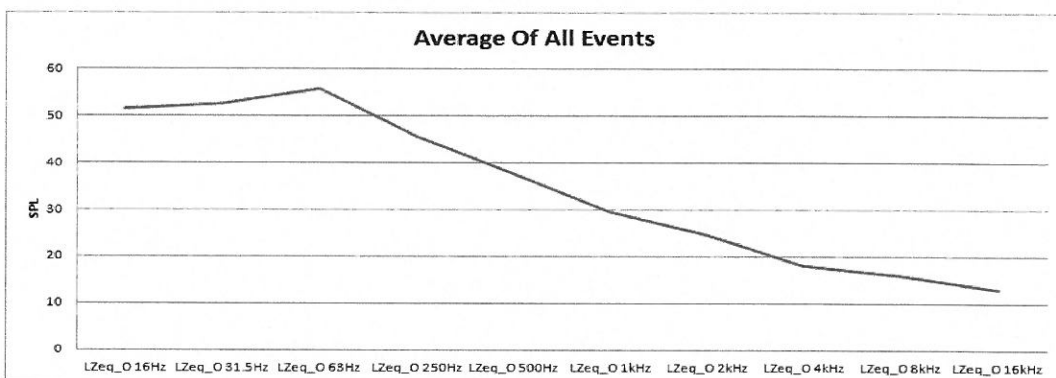


图 12 全部事件结构噪声频谱平均分布

正如 HJ 453-2008《环境影响评价技术导则-城市轨道交通》中对结构噪声与振动相互关系描述，编制组为验证结构噪声频率特性，选择各次事件 1/3 倍频程结构噪声与振动频谱比对其进行验证，如图 13、图 14 所示。从单次事件的噪声与振动结果图像可以清晰的发现，无论室内结构噪声或结构振动在 50Hz 附近均为极大峰值，此点验证了结构噪声与振动直接相关的理论。此外，从数据结果或噪声图像还可以发现，结构噪声声能量分布绝大部分为 250Hz 以下低频部分。而此频段也正是标准方法结构噪声实际测量部分，采用特殊频率范围进行测量、事件截取及评价符合由轨道交通引起的结构噪声的声学特性，同时也验证了标准方法中特征频率的合理性。

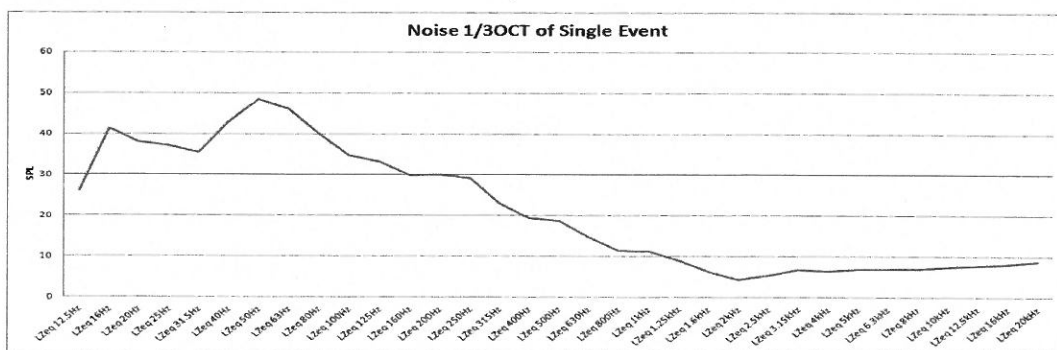


图 13 单次事件结构噪声频谱



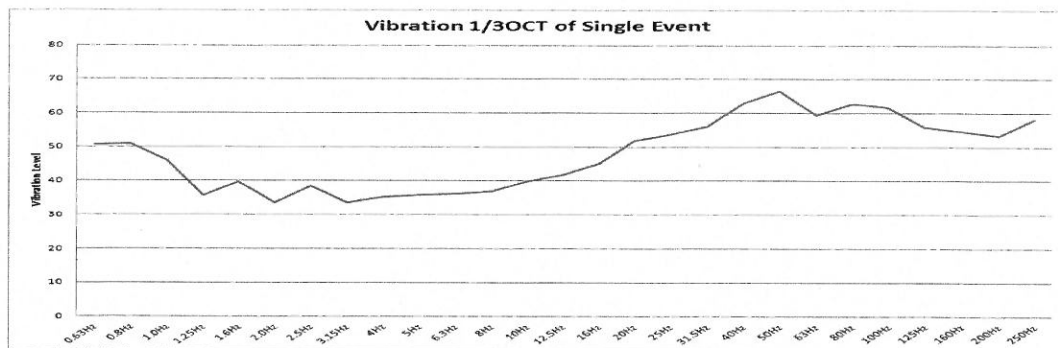


图 14 单次事件振动频率

### 5.4.3 结果讨论

通过以上数据分析，结合结构噪声产生、传播及房屋辐射理论分析结论，综合可知结构噪声影响频率范围为 250Hz 以下低频部分，进行事件截取所选择频率应和房屋本体结构相关。分频最大声压级大致集中于倍频程 63Hz 中心频带内，根据频带划分精度不同略有波动。总体而言，结构噪声低频特性明显且与结构振动频率密切相关，最大声压级频率与最大加速度级频率基本吻合。

因此，在地下轨道交通结构噪声排放监测方法中规定了相关条款：

- 1、时间历程测量数据应以 1s 为单位时间进行记录，记录应包含整个测量周期内各测量量在单位时间内变化，倍频程各中心频率噪声应为非加权线性噪声。
- 2、特征频率的选择需根据测量数据中各倍频程中心频率时间历程数据确定。应在满足事件截取条件的基础上，优先选择在各中心频率时间历程数据中平均峰值最高的频率为特征频率，对于平均峰高较接近的两个或几个频率，应选择列车不通过时噪声背景值较低的频率为特征频率。就编制组实验结果而言，地下轨道交通结构噪声特征频率通常为 63Hz，少数情况下为 31.5Hz，极少数情况下为 125Hz。
- 3、结构噪声事件应在选定的特征频率下对时间历程数据进行事件截取，即以各次通行事件所对应的最大声级  $L_{max,i}$  为基础，取  $L_{max,i}-10\text{dB}$  为判定条件，获得该取值范围内各次噪声事件的持续时间（秒），并获取所有事件各测量量声压级变化。

以上三点技术要求是保证数据采集、准确截取事件必要条件。通过上述规定采集的时间历程结构噪声数据将为进一步分析结构噪声频率分布以及后续测量评价量起到至关重要的作用。

## 5.5 特征频率选择分析

### 5.5.1 A 计权时间历程

当结构噪声测量时，记录下各单位时间内 A 声级平均值变化即为时间历程测量。传统的时间历程测量方式仅记录 A 声级时间变化，但由于地下轨道交通结构噪声的低频特性非常显著，中高频声能量所占比重极小，500Hz 以上声能占可听声范围比例小于 5%（线性计权下），A 计权时间历程图像如图 15 所示。

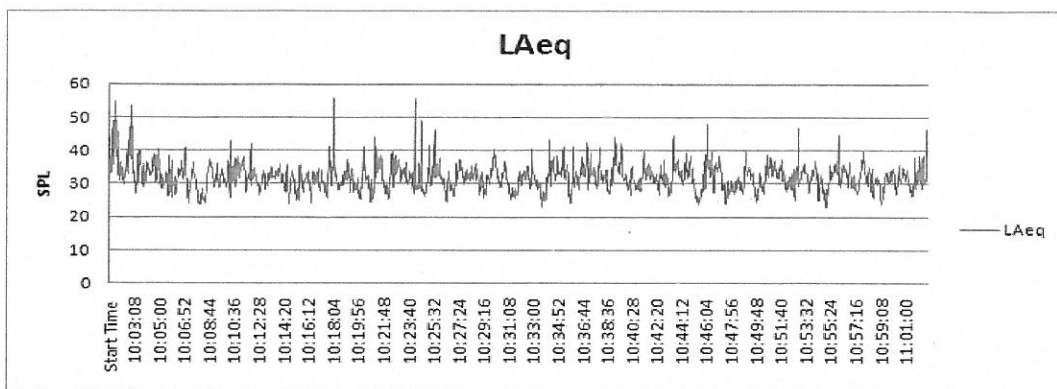


图 15 A 声级时间历程图像

当标准组尝试将 A 声级时间历程数据与现场记录列车通过时间进行比较时发现，A 声级时间历程所反映的高噪声等级对应时间与记录吻合程度较差。正如北京一样，国内众多城市地下轨道交通铺设常出现以现有地面交通为基础重叠假设的情况，地面交通的不确定性造成了声环境的复杂变换，致使在敏感建筑物室内进行监测时难以避免的受到地面交通等外部噪声源的干扰

### 5.5.2 单频与 A 计权时间历程比较

鉴于上述混合噪声问题，标准组决定对测量周期中各频率数据进行分析，得到测量过程中单一频率（低频）与全频率时间历程比较图，如图 16 所示。

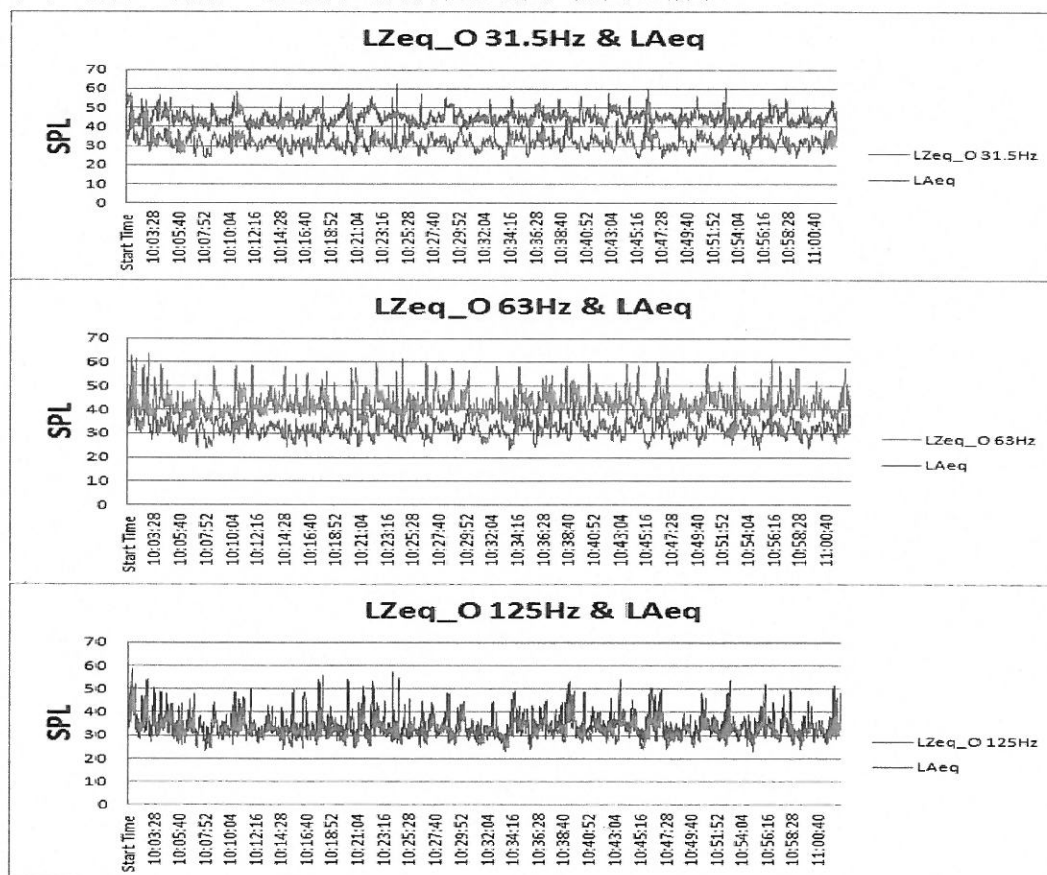


图 16 单一频率与 A 声级时间历程比较

通过对图像分析我们发现，63Hz 时间历程数据图像与测量时段列车通过时间记录吻合

程度非常好。且对于监测过程中背景噪声响应程度不高，列车通过时该频率下峰值明显与背景噪声差异较大，从而验证了结构噪声频率分布时使用倍频程测量中 63Hz 频率数据作为地下轨道交通结构噪声特征频率的预先判断。反观其他频率，31.5Hz 虽然类似 63Hz 具有峰值稳定，数据也较等效声级 LAeq 差别明显，说明受环境影响不大。但此频率峰值与背景差值不高，单次事件最大值与背景差值为 10dB 上下，对于事件截取不如 63Hz 准确。而 125Hz 则与等效声级 LAeq 图形区别不大，但峰值略高，说明在该测点下，125Hz 仍然受地下轨道交通影响，但同时其他背景噪声对该频率影响也不可忽视。

### 5.5.3 频率验证试验

通过上述研究，编制组发现，结构噪声在某些频率上，具有相当强的频率特性，在列车通过与不通过时某些频率变化十分明显。为验证此问题在不同声环境下实际效果，编制组选择相对声环境更为复杂的地下通道内进行频率验证试验。受测地点位于隧道正上方，但与建筑物敏感点环境相接近，监测位置布设于平面面积约 20 平米的半封闭空间内，测量结果如图 17 所示。

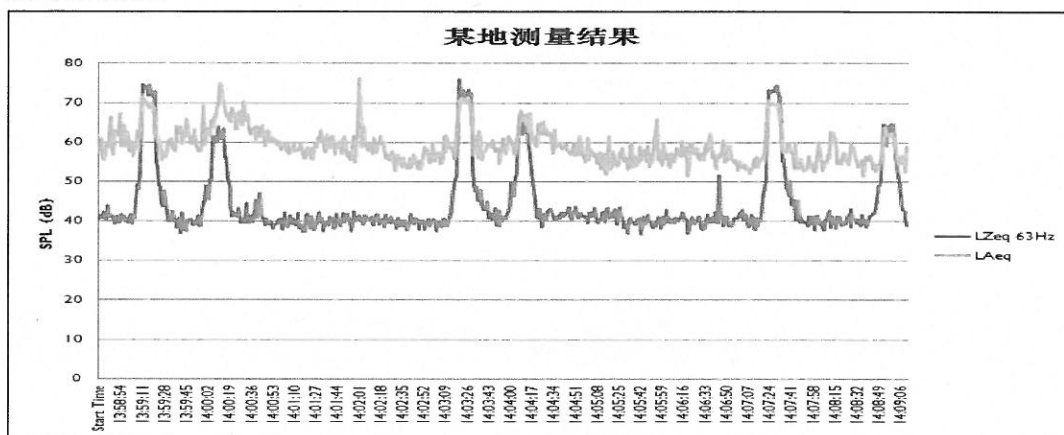


图 17 某地下通道内时间历程比较

将 63Hz 与 A 计权时间历程进行比较，可以明显看出，在 63Hz 中心频率下，时间历程随列车变化幅度极大，各次事件最大声压级与背景噪声差值达到 20dB 以上，且近、远轨影响十分明显。此外，尽管位于复杂声环境下，63Hz 时间历程在无列车通过时间内基本维持稳定，并未受到其他环境背景因素影响，而 A 声级则受到其他声源中、高频噪声影响巨大，未能如 63Hz 表现出规律性明显变化。通过分析，编制组认为，使用未计权的某些频率声压级进行事件截取相比 A 声级数据要更加方便也更加准确，对于选定的特征频率进行事件截取时不易受到复杂空气声影响。

### 5.5.4 特征频率事件截取

在尝试应用单频率数据以 Lmax-10dB 为标尺进行事件截取时，编制组发现 63Hz 单频数据与测量记录吻合程度相对较高，且其峰值变化明显。同时，63Hz 数据与 A 声级差别明显，说明该频率受其他声源影响较小。且 63Hz 中心频率点所代表的噪声频率范围刚好包含了噪声振动比对实验中 1/3 倍频程最大声能频率 50Hz。在本次编制组验证实验中，31.5Hz 与 125Hz 分别由于与记录时间对应关系不强、峰值变化幅度不满足事件截取要求、以及与全频段 A 声级差别不够明显（说明其他声源发出的高频噪声对测量存在一定影响）等原因未能较好的截取结构噪声事件。由此，编制组将倍频程 63Hz 选定为结构噪声事件截取主要特征频率，并对该频率下数据进行事件截取。但是，由于结构噪声频率与建筑物与房间相关，不同房间或房屋结构对结构噪声室内声场存在影响，故特征频率也将随房间不同产生一定差

异，实际中还应根据测量数据选择如 31.5Hz 或 125Hz 等相邻频率作为特征频率进行事件截取，而此类情况在编制组其他实验过程中也有出现。

## 5.6 事件截取方式与背景噪声关系研究

### 5.6.1 声暴露级与时间特性

作为环境监测数据是否准确的关键因素之一，测量代表性一直是环境监测工作的重点问题。对于地下轨道交通而言，其结构噪声在时间上通常呈现周期性、重复性以及短暂性特点。基于上述原因，编制组认为对于地下轨道交通的监测应当避免使用时间等效声级作为监测量。而应针对噪声特点，将测量过程中各次列车通过过程所造成的影响以事件为基础进行测量与评价。在声学上，事件截取往往采用声暴露级方式进行，正如飞机噪声标准 GB9661 中规定的那样。而标准组通过对结构噪声进行研究后发现，A 声级的时间历程数据往往与地下轨道交通相关性不高，易受测量过程中其他空气声影响，详见编制说明 5.4、5.5 章节。于是，标准方法确定了对特征频率时间历程应用  $L_{max}-10dB$  进行事件截取，以获取结构噪声事件的方法。

### 5.6.2 声暴露级与持续时间

为验证事件截取方法并了解事件时间特性，编制组对各次时间历程数据中包含事件个数及持续时间做进一步调查分析，结果例举如表 9 所示。

表 9 单个测量周期内声暴露级与等效声级比对列表

| 事件开始     | 持续时间 | 声暴露级值 (dBA) | 事件开始     | 持续时间 | 声暴露级值 (dBA) |
|----------|------|-------------|----------|------|-------------|
| 10:02:33 | 11s  | 46.3        | 10:34:28 | 10s  | 46.7        |
| 10:04:05 | 12s  | 46.3        | 10:40:30 | 10s  | 44.3        |
| 10:08:34 | 10s  | 42.9        | 10:44:36 | 13s  | 46.9        |
| 10:10:28 | 11s  | 45.0        | 10:46:18 | 12s  | 46.7        |
| 10:14:35 | 09s  | 43.0        | 10:50:35 | 09s  | 45.1        |
| 10:16:32 | 13s  | 43.6        | 10:56:50 | 10s  | 43.7        |
| 10:20:38 | 12s  | 42.4        | 10:58:19 | 12s  | 44.2        |
| 10:22:25 | 10s  | 46.8        | 11:02:19 | 13s  | 42.3        |
| 10:26:39 | 10s  | 42.4        |          |      |             |
| 10:28:48 | 11s  | 43.7        | 声暴露级小时均值 |      | 32.6        |
| 10:32:33 | 11s  | 44.4        | 小时等效声级   |      | 34.6        |

通过比对可以明显看出，在试验测量周期内共有 19 次噪声事件产生，每次噪声事件持续约 10 秒。影响持续时间的主要因素为绝对振动等级、墙壁辐射效率以及建筑物室内混响时间等因素。表 9 中仅为单次试验周期内各事件持续时间汇总，通过课题组对全部测量数据进行总结（数据结果详见附录 A），结构噪声持续时间基本维持在 15 秒以内，仅有极个别事件持续 18 秒，但大都由于该次列车通过时特征频率最大声压级较低所致，且超出 15 秒以外声压级与该次事件最大声压级差值在 9dB 以上。

值的说明的是，由于 A 声级时间历程无法关联列车通过时间，故事件截取采用标准方法进行，即声暴露级值为标准方法所截取事件全频带 A 声级贡献。对于声暴露级值而言，各事件  $L_{AE}$  存在一定起伏，数值变化在 42dB(A)~47dB(A)之间，主要受计权量绝对值较小的中、高频影响。此外，由于测量点位为地铁沿线敏感建筑物户内，故由于存在远轨与近轨差距，这一变化也在一定程度上加剧了  $L_{AE}$  变化程度。



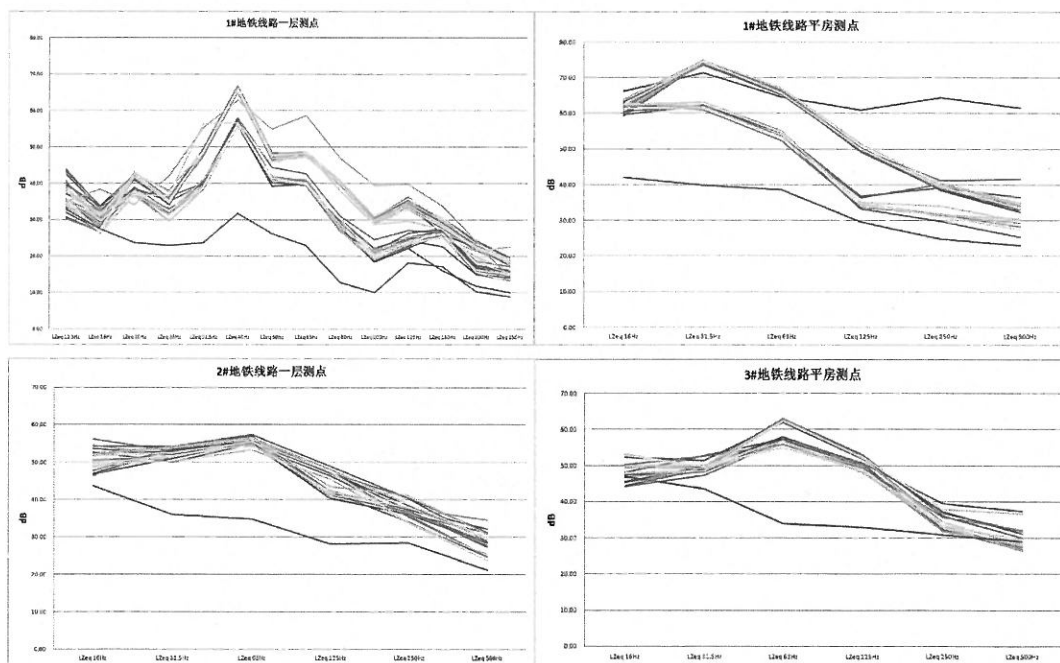
对于监测数据代表性,各事件平均声暴露级比等效声级更能反映结构噪声类周期性噪声实际影响。这主要由于声暴露级所反映的是列车通过时段噪声等级,受地面交通等其他复杂声环境影响较小。但声暴露级为全频带 A 声级在持续时间内能量平均,而由地铁所引发的结构噪声并非全频带噪声,而是有着明显的低频特性。此外,当测量位置靠近繁忙的交通干线时,用  $L_{Aeq,1s}$  并不能保证每次事件截取时的准确性,故单纯使用声暴露级评价结构噪声依然不够准确。

### 5.6.3 事件与背景噪声

作为环境噪声排放监测方法的重要部分,背景噪声测量一直是噪声监测难点。如何取得代表性时段、如何保证环境噪声和背景噪声监测所处声环境尽量一致、对于测量结果的修正等一直都是噪声监测中技术性较强的工作内容。日常监测中,对于如铁路噪声、内河航道等周期性声源的背景噪声测量一般选择两台或多台仪器同步测量的方式,其中一台在声源通过时手动暂定测量,以获取非被测声源影响下环境背景的噪声等级。

正如前文所述,单纯使用声暴露级评价结构噪声依然存在不足。编制组认为应对低频段结构噪声做分频处理,同时对结果与背景噪声关系进行了进一步分析。对于噪声结果的修正,随着 HJ706-2014《环境噪声监测技术规范 噪声背景值修正》标准的出台,有了更加明确而细化的要求。无论使用何种标准进行修正,单纯从声音的角度出发,排放噪声与背景噪声值相差 10dB 以上时认为背景噪声对噪声排放无影响,不进行修正。对于固定设备结构传播室内噪声修正则需对各倍频程分频进行修正。

由于标准中规定,事件截取以  $L_{max}-10dB$  为基础,故特征频率下已可满足背景修正差值 10dB 数据质量要求。对于其他频率(主要为标准涉及的低频部分),编制组将各次事件与平均背景声压级作图比较,如图 18 所示。



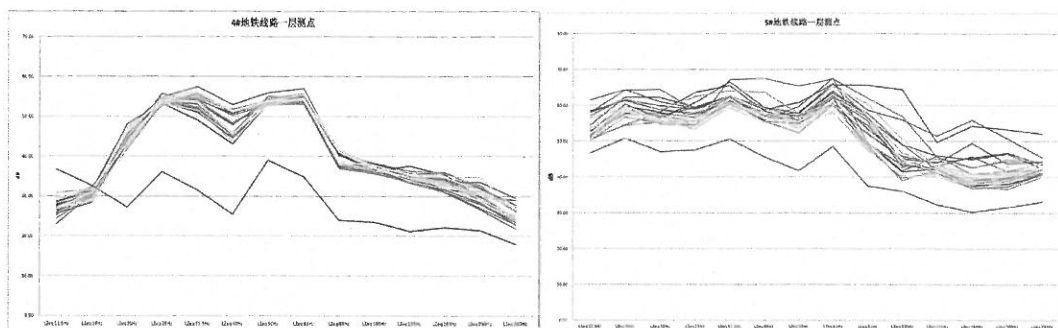


图 18 事件与背景噪声比较

通过图像比较,编制组发现出特征频率外其他低频中心频率并非均满足声压级与背景噪声相差 10dB 要求。但是将各事件做能量平均后,各测点单频事件能量均值与平均背景声压级相差最小为 4.29dB (如测量采用 1/3 倍频程则转换为倍频程结果),具体数值见表 10。

表 10 低频段事件平均与背景平均比对列表 (单位 dB)

| 编号及名称          | 类别   | 31.5Hz      | 63Hz  | 125Hz | 250Hz       |
|----------------|------|-------------|-------|-------|-------------|
| 1#地铁线路<br>测点 1 | 事件平均 | 72.11       | 64.00 | 50.79 | 51.60       |
|                | 背景平均 | 39.87       | 38.53 | 29.60 | 24.80       |
|                | 差值   | 32.24       | 25.47 | 21.19 | 26.80       |
| 1#地铁线路<br>测点 2 | 事件平均 | 63.89       | 50.59 | 35.40 | 23.13       |
|                | 背景平均 | 32.84       | 28.02 | 21.04 | 12.64       |
|                | 差值   | 31.05       | 22.57 | 14.35 | 10.49       |
| 2#地铁线路<br>测点 1 | 事件平均 | 51.98       | 55.07 | 42.36 | 39.33       |
|                | 背景平均 | 36.02       | 34.86 | 28.16 | 28.51       |
|                | 差值   | 15.96       | 20.21 | 14.20 | 10.81       |
| 2#地铁线路<br>测点 2 | 事件平均 | 50.98       | 54.10 | 45.74 | 41.74       |
|                | 背景平均 | 31.04       | 35.49 | 31.07 | 34.00       |
|                | 差值   | 19.94       | 18.61 | 14.67 | <b>7.74</b> |
| 3#地铁线路<br>测点 1 | 事件平均 | 55.83       | 59.05 | 54.74 | 39.35       |
|                | 背景平均 | 41.83       | 33.81 | 30.17 | 26.61       |
|                | 差值   | 14.00       | 25.24 | 24.58 | 12.74       |
| 3#地铁线路<br>测点 2 | 事件平均 | 49.96       | 60.16 | 50.99 | 35.13       |
|                | 背景平均 | 43.57       | 33.92 | 32.94 | 30.84       |
|                | 差值   | <b>6.39</b> | 26.24 | 18.06 | <b>4.29</b> |
| 4#地铁线路<br>测点 1 | 事件平均 | 65.16       | 65.12 | 53.83 | 47.16       |
|                | 背景平均 | 53.16       | 49.67 | 38.36 | 35.41       |
|                | 差值   | 12.00       | 15.45 | 15.48 | 11.75       |
| 4#地铁线路<br>测点 2 | 事件平均 | 54.68       | 63.60 | 42.59 | 35.72       |
|                | 背景平均 | 42.73       | 41.03 | 28.87 | 27.25       |
|                | 差值   | 11.95       | 22.57 | 13.72 | <b>8.46</b> |

|        |      |       |       |       |       |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| 5#地铁线路 | 事件平均 | 57.68 | 57.35 | 40.22 | 32.12 |
|        | 背景平均 | 37.64 | 40.56 | 27.15 | 22.95 |
|        | 差值   | 20.03 | 16.79 | 13.07 | 9.17  |

对此现象,编制组认为并不能说明标准方法缺乏准确性,或着说进行标准方法测量计算时仍需要引入背景测量并参与计算。理由如下:①对于特征频率在标准中有着非常清楚的描述,即选择测量过程中峰值最高且背景较低的单一频率为事件截取所使用。故在所有低频中心频率中,以特征频率进行事件截取所获得的事件持续时间最短。换言之,所得到的各事件在持续时间内声能最为集中,所以测量结果代表性较佳。②背景噪声平均值为非持续时间下声能均值,而非特征频率由于使用了特征频率的截取事件,将导致有一部分由地下轨道交通所引起的声能被包含在了背景噪声之中。表 10 中所列举的非特征频率背景噪声实质上包含了一部分事件的贡献,所以在某些测点的某些频率下产生了背景噪声较高的显现。这也直接导致了各中心频率事件均值与背景均值相差不足 10dB 的结果。③通过表 10 我们依然可以发现,绝大部分的事件与对应测点下背景噪声相差较大。仅有少数测点出现了差值不足 10dB 情况,其原因处前述两点外可能还与房间混响时间较长等原因所致。其中不满足数据质量要求的差值也基本在 6~9dB 范围。考虑到背景声能量中包含一部分事件贡献,编制组认为方法的测量结果基本可以表征地下轨道交通结构噪声低频噪声污染排放水平。

## 5.7 室内监测点位与楼层差异性研究

在环境噪声测量中,测量点位的不同将直接导致截然不同的测量结果。对于地下轨道交通结构噪声,如何布置合理的设置监测点位对于测量结构噪声排放具有十分重要的意义。编制组在查阅资料、研究实验数据的基础上对测量点位的选择进行了深入分析,并形成了标准中点位设置相关技术规定。

### 5.7.1 室内测点条件及传声器位置研究

无论固定设备通过建筑物结构传播亦或地下轨道交通引发的室内结构噪声都具有低频性特点。故在测量房间选择及房间条件部分的编制工作主要参照 GB12348-2008 及 GB22337-2008 相关标准内容进行。

由于地下轨道交通的污染范围较广、强度较大、而且频带范围较宽,故由列车-钢轨系统所传到的振动除引发房屋结构产生结构噪声还极有可能引起测量房间内质量较轻的物品产生振动并发出可听声。由于标准术语定义部分对结构噪声进行明确,仅为建筑物固体结构所辐射的可听声,故在测量房间选择时标准特别明确了应移除可能干扰测量的物品。同时,由于受测房间大多为沿线居住用房,故各家各户在室内陈设方面也不尽一致,去除不确定声源对测量的干扰对保证测量数据准确性及后续数据处理具有非常重要的意义。

同时,由于标准采用事件方式进行地下轨道交通结构噪声排放进行表征。在满足基本房间测量条件的前提下,还应满足事件截取的技术要求。通常,在无其他固定设备建筑结构传播室内噪声的环境下,满足特征频率最大值超过该频率背景噪声 10dB 的技术要求是比较可行的。但是,对于一些受长期开启或周期性工作的可疑固定设备声源影响的房间,其可疑声源所影响频率极有可能与特征频率重叠。故应避开此类房间进行测量,或在测量过程中关闭其他可能影响的声源。

传声器在室内的摆放位置也将影响测量结果。对于形状规则、体量合适的空房间,室内声场往往伴随着驻波效应的存在,这种现象使得室内声场在不同位置下产生波峰、波谷。如将测量传声器安放于该类位置下,将造成测量结果的不准确。在我国,以居住为主要目的房屋大部分为规则形状,正如前文 5.1.4 中分析,测量传声器应避免布设于驻波点。但房间各不相同,在实际中很难确定房间驻波位置,况且绝大部分的房间都存在家具、陈设等,这些

空间体的存在一定程度上也提高了室内声场规律的判断。在标准中规定室内中央为传声器位置以代表房间的平均噪声水平，但同时应尽量避免驻波效应的测量影响，故应接近但不在室内中央。此外，靠近地铁线路的房屋结构可能将受到更加剧烈的振动影响，故应将传声器指向地铁线路一侧。

### 5.7.2 结构噪声高度差异研究

距离源强越近，影响程度越剧烈是如噪声、振动等物理污染的普遍规律。由于结构噪声的影响因素相比于空气传播噪声更为复杂，受源强、传导途径、建筑结构影响，不同位置的建筑物室内受影响程度也不一样。对于平房区，在地铁线路一侧，结构噪声随距离增加将减小。通过编制组调研发现，一般距离地铁中心线路两侧 30 米之外区域，受影响程度基本较小，在此区域内居住的人群反映此类问题概率较低。

但是，对于高层建筑而言，究竟如何选择测量房间，结构噪声是否如地面交通一样存在高空拐点，亦或地下空间结构噪声是否由于距离更接近地铁线路而辐射强度更高，还需要进行试验加以验证。为此，编制组在进行标准试验的同时，对四条不同线路增加不同楼层差异试验以进行比较分析。编制组对结构噪声产生机理研究后决定将高度差异研究分为两种类型，分别为：①平房与高层建筑物差异研究；②高层建筑物内各楼层差异研究。

#### 5.7.2.1 平房与高层测点比较分析

由于结构噪声的产生与源强、传播途径及建筑物结构直接相关。编制组首先对单一地下轨道交通线路一侧相邻建筑物进行高度差异研究。实际中选取一层（平房）与二层测点（共三层的楼房），并以标准方法所截取事件为基础进行比较，比较结果如图 19、图 20 所示。

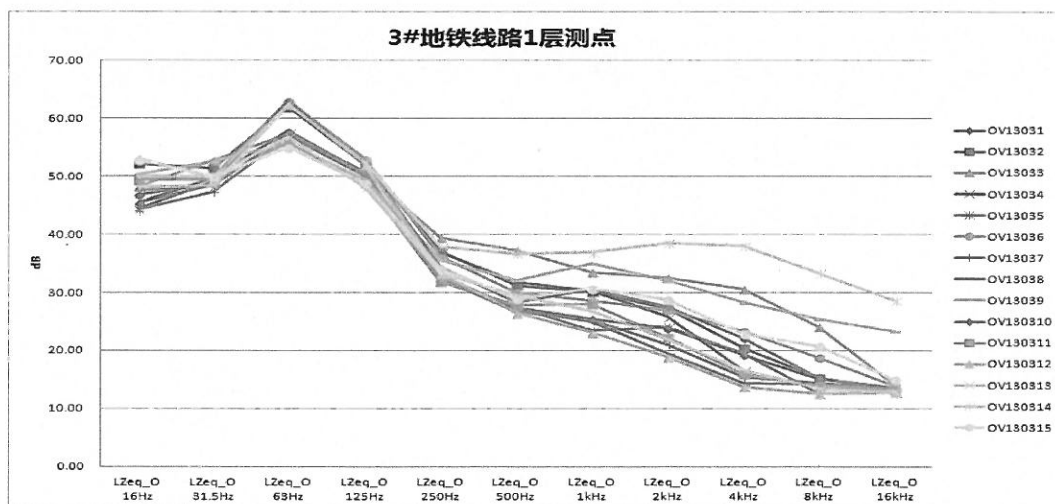


图 19 3#线路平房测点结果



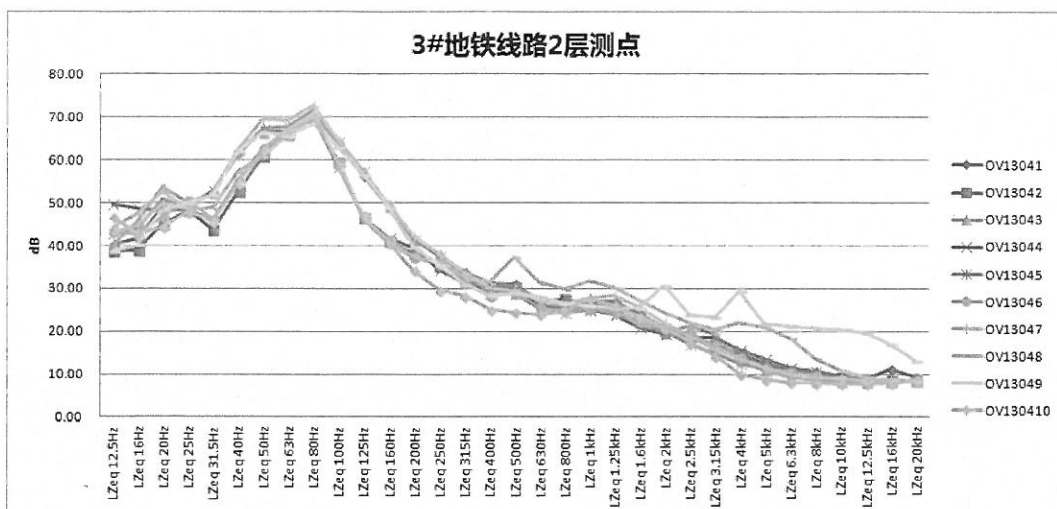


图 20 3#线路二层测点结果

通过图像可以发现，无论平房测点亦或二层测点，各点位下载取事件都具有非常良好的相关性。其中二层测点最大声能频率为 80Hz（二层采用 1/3OCT 进行测量），一层测点最大声能频率为 63Hz。在一层测点中，最大峰值出现两点间波动情况，主要与影响线路列车存在近、远轨道差异所致。比较绝对数值发现，位于二层的最大声压级（80Hz 频率处）约 70dB，而位于一层的最大声压级（63Hz 频率处）仅为 60dB 上下。由于二层房间所使用的天花板及地板厚度相较平房地面较薄，在受激发后可能更易辐射结构噪声，即辐射效率更高，故产生的 10dB 左右差异主要源自房屋结构因素。

#### 5.7.2.2 高层楼房层间测点比较分析

经过平房与楼房比较后，编制组发现，由于房屋结构的差异，地下轨道交通结构噪声在声能量上存在一定的差异。但结构噪声频率特性未发生改变，在实际中应用标准进行事件截取也是适宜的。由于当下城市发展水平的提升，许多地下轨道交通线路两侧已由最初的平房区变成了楼房，为验证楼房测点标准方法的适用性以及研究楼房不同楼层间结构噪声差异，编制组分别对 1#线路、4#线路及 5#线路进行同楼内楼层差异验证试验，实验结果如图 21 所示。图中各楼层数据均为该测点下整个测量周期内所有事件能量平均值。

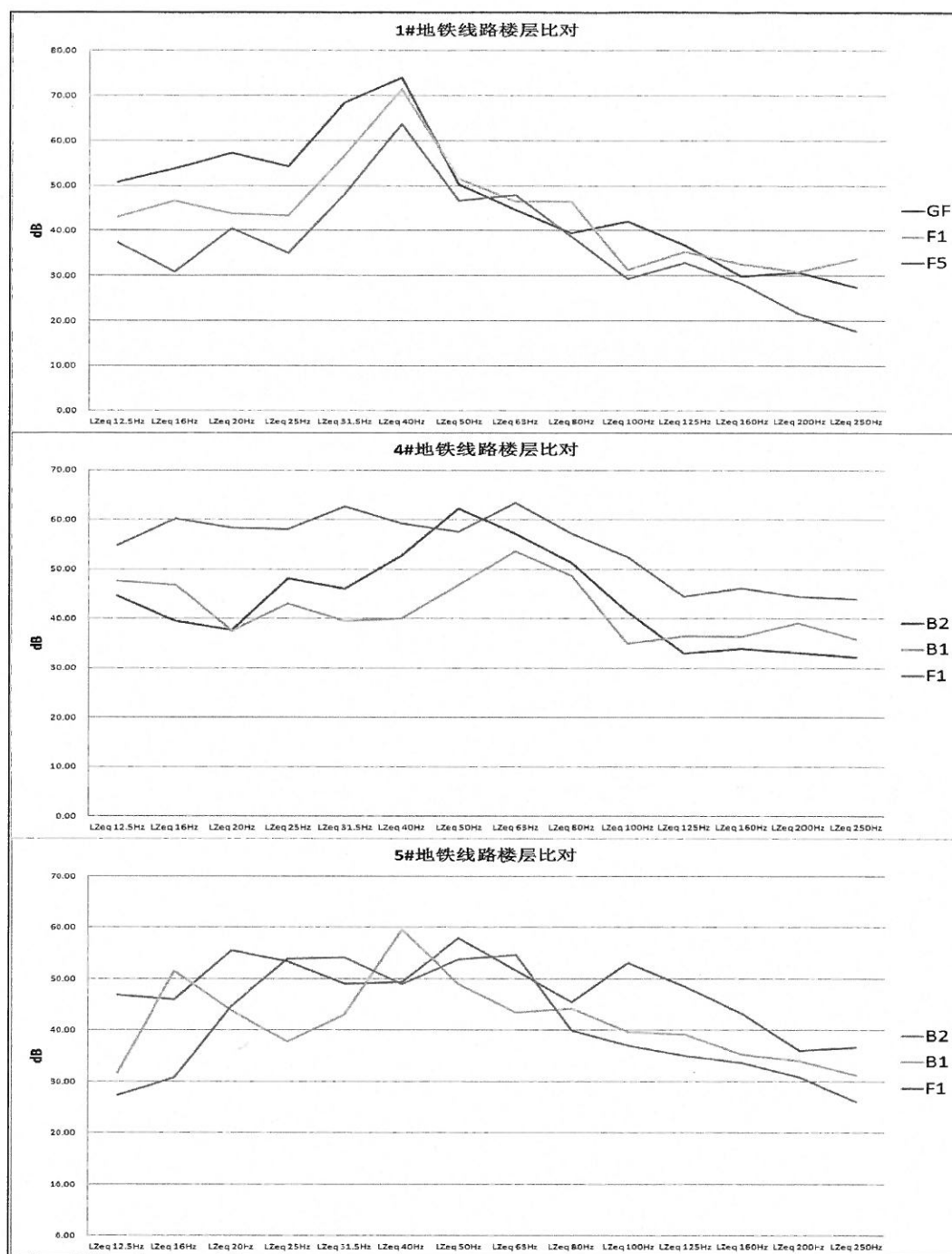


图 21 其他线路楼层差异比较

从数据结果分析,在同一楼层内靠近地面的 1 层测点相比高层(如 1#线路 5 层)及地下室声能较高。各个测点下结构噪声低频部分整体规律性比较一致,在不同楼层间特征频率可能产生一定程度波动。

正如前文所述,对于地下轨道系统,其振动在图层结构中传播主要以表面波形式存在,伴随有其他波形。所以,距离地面较近的一层房间受影响程度明显高于其他楼层。但是,对于地下室其规律性并不能够准确确定,可能和房屋与地下轨道系统结构距离、缓冲层厚度、房屋本身质量及桩基深度等原因有关。通过比较,编制组认为对于高层建筑物,应优先选择

一层房间为测量地点。当然,根据实际需要,在满足房间条件的前提下,选择高层房间或地下室进行地下轨道交通结构噪声排放监测也并非不可行。

### 5.7.3 结构噪声分布水平探讨

无论新开通地下轨道交通线路的地区或长期运行的地铁线路均可能需要对其结构噪声进行深入研究。而环境管理部门、环境科学研究可能需要更加详实的环境影响数据以支撑环境决策,仅通过单一测点的监测结果进行评价往往不能满足此类需求。对于如上的这类监测,其监测点位应当在一般性监测的基础上加密布设测点,以获取结构噪声实际影响水平分布及垂直分布等情况。

为获取可靠地静态数据结果,测量需要在相似的测量环境下进行一系列大量且重复的监测。结构噪声与振动的直接相关性决定了结构噪声在水平距离上衰减的程度与振动是相似的。编制组在结合调研走访的基础上认为,振动的实际影响范围基本在轨道两侧 30 米左右。但是随着土层结构硬度的提升,可能会存在更远距离的传到。故结构噪声在水平分布上可以参照振动的影响范围,在垂直于轨道的水平垂线上进行多点位布设。标准中推荐的水平距离间隔仅为推荐性点位布设方式,实际中应根据需要增加或减少水平测量点位。但是由于不同线路、不同土层结构使振动的传到范围及传到方式存在一定程度变化,故还应结合实际情况具体问题具体分析。结构振动垂直分布水平点位布设与水平分布测量大致相近。为了解一幢高层建筑各楼层间的垂直分布情况,应在同一垂线下进行不同楼层点位布设,以避免由于房屋本身建筑结构不一造成结构噪声存在差异。

### 5.8 数据结果及频带划分选择分析

在频带划分时,采用越细的划分方式,所得到的噪声频带结果越接近声能本身。但是根据不同的使用用途,选择适合自身需求的频带划分方式既可以满足实际需要,又能够节省成本。本次标准制修订工作主要针对由地下轨道交通列车运行引起的周边结构噪声进行监测。为较好的和现行环境保护噪声标准衔接,标准规定采用倍频程中心频率作为低频段频率划分方式对结果进行统计分析。

由于地下轨道交通结构噪声绝大部分声能频率集中于 250Hz 以下低频部分。当选择倍频程时,需要测量 31.5Hz、63Hz、125Hz、250Hz 四个中心频率。而选择 1/3 倍频程测量时,则需要测量 25Hz、31.5Hz、40Hz、50Hz、63Hz、80Hz、100Hz、125Hz、160Hz、200Hz、250Hz、315Hz 十二个中心频率,与倍频程相比数据量增加了四倍。对于环境监测而言,在保证准确度的前提下,更加便捷的数据处理有利于工作效率的提升。显然,1/3 倍频程测量的数据处理量相比较倍频程而言大大增加了特征频率判别、事件截取以及结果计算的工作量。

编制组为更加准确的了解地下轨道交通结构噪声排放特性,在试验测试中一部分采用了 1/3 倍频程进行。但是,由于采用了更加细化的频带划分方式,所以特征频率选择时产生了一定程度波动。在编制组进行的 5 条线路共 15 次监测过程中,特征频率分别出现于 40Hz、50Hz、63Hz、80Hz。其特征频率的波动原因已在前文中进行了分析,在此不再做赘述。单独对照频带划分方式而言,倍频程中心频率 63Hz 所对应的频带范围为 45Hz~90Hz,也就是说在 1/3 倍频程测量中出现的 50Hz、80Hz 特征频率现象,如应用倍频程测量将归结于 63Hz 中心频带范围。这种归纳合并很大程度上减缓了由于房屋结构、开间面积、列车运行状态等等不确定因素所引入的结构噪声频率不确定性。

在方法与现行标准体系相互协调上,由于现行噪声标准对于结构传播固定设备室内噪声采用倍频程方式进行评价。因此,本次监测方法中延续此种频带划分方式进行测量有助于不

同标准之间相互应用及日后方法理解与使用。

### 5.9 与现行标准测量结果比较分析

编制组在进行标准方法事件结果计算分析的同时,也参照现行国内相关监测方法进行测量结果比较分析。主要参考方法为住建部 JGJ/T170-2009《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》和上海市地方标准 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》,具体结果如表 11 所示。

表 11 制修订方法与现行其他标准结果比较 (单位: dBA)

| 标准名称<br><br>编号 | 本次制修订方法<br>(低频 A 声级) | JGJ/T170-2009<br>城市轨道交通引起建筑物振动与<br>二次辐射噪声限值及其测量方法 | DB31/T470-2009<br>城市轨道交通(地下段)列车运行<br>引起的住宅室内振动与结构噪声限<br>值及测量方法 |                    |
|----------------|----------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------|
|                |                      |                                                   | $L_{Aeq}$<br>(未修正)                                             | $L_{Amax}$<br>(昼间) |
| 1              | 33.79                | 31.13                                             | 34.67                                                          | 62.33              |
| 2              | 44.88                | 38.75                                             | 43.03                                                          | 80.26              |
| 3              | 37.80                | 31.13                                             | 37.26                                                          | 65.69              |
| 4              | 46.37                | 36.40                                             | 44.14                                                          | 72.19              |
| 5              | 50.51                | 39.18                                             | 47.29                                                          | 82.56              |
| 6              | 40.15                | 27.75                                             | 51.24                                                          | 88.00              |
| 7              | 30.75                | 23.08                                             | 28.36                                                          | 62.77              |
| 8              | 37.86                | 29.42                                             | 43.61                                                          | 65.09              |
| 9              | 32.55                | 27.68                                             | 42.44                                                          | 77.91              |
| 10             | 38.88                | 29.73                                             | 43.04                                                          | 75.02              |
| 11             | 31.85                | 26.97                                             | 34.11                                                          | 69.55              |
| 12             | 36.77                | 30.17                                             | 48.90                                                          | 66.96              |
| 13             | 43.28                | 37.87                                             | 47.73                                                          | 68.32              |
| 14             | 35.37                | 37.91                                             | 44.77                                                          | 81.05              |

由于试验过程大多需要入户测量,且晚间地铁线路车型密度较低,故测量结果均为昼间测量结果。其中 DB31/T740 标准中  $L_{Amax}$  为昼间最大声级,此点与原标准要求中测量时段存在一定差异。但考虑到外部声环境的复杂变化,实际最大声压级的主要源于中、高频环境噪声的贡献。诸如地面道路交通汽车鸣笛、测量过程中房间外部突发高噪声等情况的出现造成了最大声压级凸显的结果,由此编制组认为夜间测量与昼间测量在最大声级上均主要受中、高频突发高噪声事件做引起,而并非源于列车通过时引发的结构噪声,只有在外部声环境相对稳定且测量过程无突发情况时,最大声压级体现与地下轨道交通结构噪声较好的相关性,但此类情况在实际监测过程中很难得到保障。

通过比较,编制组发现在外部声环境较好的情况下,低频 A 声级与 DB31/T470-2009 方法  $L_{Aeq}$  结果比较接近,即  $L_{Aeq}$  主要由结构噪声贡献。当然,在 DB31/T470-2009 中明确规定需要对测量过程进行背景修正,仅通过未修正结果与事件低频 A 声级进行比较显然还不够准确,但中、高频噪声对全频带 A 计权结果的影响确实不容忽视。由于低频 A 声级为



所有结构噪声事件在持续时间内能量平均后经 A 计权网络所得的计权结果, 所以其数值主要反映持续时间内声能结果, 这与 JGJ/T170-2009 方法存在着较大差异, 并不能用绝对数值进行比较衡量。但是, JGJ/T170-2009 结果绝大部分低于其标准限值 38dB(A), 这与实际受影响人群感受性还是存在差距的, 此问题将在后续章节中结合烦恼度调查进行分析。

尽管低频 A 声级所反映的频带范围与时间区间直接与地下轨道交通所引发的结构噪声相关, 但由于现行环境保护噪声标准体系中还没有此类以分频段 A 计权声压级为测量量或评价量的标准出台, 故该测量结果目前还无法进行评价。但总体而言, 其结果从测量上避免了背景噪声在非过车时间和非主要频带范围内的影响。方法从根本上以事件作为基础, 但本次标准制修订仅为监测方法, 实际中可根据需要进行测量结果选择。在等效时间上, 将所有事件持续时间内声能量做平均可以体现结构噪声整体影响程度, 但为使得不同测量过程具有可比性也可以将所得结果在持续时间内进行时间等效计算。

### 5.10 烦恼度调查结果汇总

正如前文所述, 由于住建部 JGJ/T170-2009 方法测量结果绝大部分达到了相应标准限值。编制组在进行试验的同时, 在受测地点街道、社区的配合下在 1#线路、4#线路进行了烦恼度调查, 调查以问卷形式向附近居民进行发放, 并汇总得到了受访地区主观感受大致结果, 问卷调查表格详见附录 1。

1#线路调查样本 40 份, 受访者全部在此地区居住 3 年以上, 年龄范围在 44~61 周岁区间。经过统计分析, 1#线路沿线 100%的受访者确认听到地铁列车通过时产生的结构噪声; 有 2%的受访者认为家中的家具、门窗发生二次辐射噪声的频次相当频繁, 而 98%的受访者认为二次辐射噪声发生频次过于频繁; 100%的受访者在居住过程中被列车经过吵醒过, 且每周被吵醒的次数均在 5 次以上。与高烦恼度相比, 1#线路 JGJ/T170-2009 方法实验结果 (3 个测点) 分别为 27.75dBA、23.08dBA 和 29.42dBA, 均远低于该标准 1 类区昼间限值 38dBA。

4#线路调查样本 20 份, 受访者平均年龄 40 岁, 最长受访者 60 岁, 最幼受访者 25 岁。经统计分析, 4#线路沿线 60%受访者认为结构噪声有感觉, 40%认为无结构噪声影响, 影响程度上 30%认为几乎无影响, 20%认为影响程度较小, 20%认为影响程度一般, 25%认为影响程度较大, 5%认为影响程度非常严重; 对于家具、门窗发生的二次辐射噪声频次中, 相当频繁和非常频繁占比之和为 30%, 比较偶然和频繁度一般的占比之和为 70%, 影响程度一般及以下的比例之和为 75%, 影响程度较大和非常严重比例为 25%; 居住过程中曾被惊醒和未被惊醒比例各占 50%, 其中每周被惊醒 3 次以下比例占 68.75%, 4 次以上比例占 31.25%。4#线路 JGJ/T170-2009 方法实验结果 (3 个测点) 分别为 30.17dBA、37.87dBA、37.91dBA, 虽然结果仍低于标准限值, 但已比较接近。

值得说明的是, 由于地铁问题相对比较敏感, 故在实际烦恼度调查中存在很大程度困难, 致使调查结果样本量严重偏低。由于 1#线路受访者普遍年龄偏大, 故调查结果显示的影响程度比较严重, 4#线路年龄覆盖程度较好, 但样本量偏小。

烦恼度调查并不对本次监测方法标准制修订工作存在较大影响, 但所反映的实际感受性趋势却不容忽视。

## 6 标准实施建议

本标准应由县级以上人民政府环境保护行政主管部门负责组织实施, 并配合相应的其他环保标准进行评价量确定及测量结果评价。应在全国开通地下轨道交通较多的地区重点推广, 其他需要的城市和地区也可参照执行。为实施本标准, 各地环境监测部门应对造成测量

仪器及校准设备进行更新，并对测量结果进行准确评价，因地制宜改善地下轨道交通沿线两侧居民所处室内声环境质量。

## 7 标准使用经济成本

本标准的使用需要使用具备时间历程监测功能的噪声监测仪器及具备多频点的声校准器。当前国内、外主要环境噪声监测设备多数可实现时间历程监测，同时，随 HJ707-2014《环境噪声监测技术规范 结构传播固定设备室内噪声》的颁布实施，多点声校准器也已被广泛应用，故标准使用经济成本增长不大。

## 8 参考文献

- [1] Information No. 9/1997 (1997): “Orientering om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer ieksternt miljø.” Danish Environmental Protection Agency (Danish Ministry of the Environment).
- [2] ISO 2631, “Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration,” ISO 2631-1 (1997): “Part 1: General requirements,” ISO 2631-2 (2003): “Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 Hz to 80 Hz).”
- [3] SOSFS (1996) 7/E: “General guidelines issued by the Swedish National Board of Health and Welfare: 7/E Indoor Noise and High Sound-Levels.” Socialstyrelsen (Swedish National Board of Health and Welfare).
- [4] 辜小安, 谢咏梅等, 地铁列车运行引起建筑物二次辐射噪声执行标准探讨, [J], 现代城市轨道交通, 2012. 4, P56
- [5] 储益萍, 地铁引起的结构振动与噪声及其相关性分析, [J], 噪声与振动控制, 2011. 8, P85
- [6] 毛东兴, 杨碧君等, 地铁引起的二次辐射噪声烦恼度研究, [J], 2011
- [7] 申道明, 张来栋等, 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. 8, P133
- [8] 单涛涛, 楼梦麟等, 地铁引发地面振动分析中阻尼矩阵构成模式的探讨, [J], 力学季刊, 2013. 6, P207
- [9] 祝培生, 王季卿, 地铁噪声对建筑影响及控制策略的研究, [J], 噪声与振动控制, 2007. 11, P41
- [10] Ass.Prof.Konstantinos Vogiatzis, Groundborne Noise and Vibration Assessment form Metro operation in the New Athens Metro Extension to Piraeus, Recent Researches in Applied Mechanics, ISBN: 978-1-61804-078-7
- [11] Tim Preager, Ji Hyun Cho. et al., Subway Vibration Assessment Report Old Mill Drive/Traymore Crescent Area & Bloor Street West, Aercoustics Engineering limited, Vibration assessment report, project number: 12035.03

[12] Jeffrey A. Zapfe, Hugh Saurenman, Sanford Fidell, et al., Ground-Borne Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit, Contractor' s Final Report for TCRP Project D-12, 2009.12

附录 1:

地铁影响调查问卷

先生/女士您好，我们得知您家附近的地铁时常影响您的生活，如果方便我们想对此进行深入了解，感谢您的配合~

1. 请问您在此地居住约多久了？

A：少于半年      B：半年至一年      C：一年以上3年以下      D：3年以上

2. 您认为周边最影响您生活的活动是什么？

请您简述：\_\_\_\_\_

3. 在过去的时间内，您有感觉地面道路噪声对您有影响么？

A：几乎没有      B：一点点      C：一般      D：较大      E：非常严重

4. 当您在家中时，您感觉地铁列车通过时对您产生多大影响？

A：几乎没有      B：一点点      C：一般      D：较大      E：非常严重

5. 您是否有听到地铁列车通过时产生的隆隆声？

A：是      B：否（如果选否请直接看问题7）

6. 您如何评价您所听到的地铁列车通过时隆隆声对您的影响？

A：几乎没有      B：一点点      C：一般      D：较大      E：非常严重

7. 您是否听到列车通过时门窗、墙壁悬挂物、或其他摆放物品也发出颤动的声音？

A：是      B：否（如果选否请直接看问题9）

8. 您如何评价由门窗、墙壁悬挂物、或其他摆放物品所发出的颤动声音发生频次？

A：比较偶然      B：一般频繁      C：相当频繁      D：太频繁了

9. 您如何评价由门窗、墙壁悬挂物、或其他摆放物品所发出的颤动声音对您影响？

A：几乎没有      B：一点点      C：一般      D：较大      E：非常严重

10. 您是否感觉到地铁通过时您家的地板、墙壁、或家具产生振动？

A：是      B：否（如果选否请直接看问题13）

11. 您如何评价地板、墙壁、或家具振动发生频次？

A：比较偶然      B：一般频繁      C：相当频繁      D：太频繁了

12. 您如何评价地板、墙壁、或家具振动对您的影响？

A：几乎没有      B：一点点      C：一般      D：较大      E：非常严重

13. 在过去的时间内，您是否曾经被隆隆声、颤动声、颤动或振动吵醒过。

A：是      B：否

14. 在您居住的时间里，通常每周被这样的隆隆声、颤动声、颤动或振动吵醒过几次？

A：1-2次      B：2-3次      C：3-4次      D：4-5次      E：5次以上

方便的话请留下您的基本信息（如果方便，请至少留下您的年龄和性别）

姓名：\_\_\_\_\_ 性别：\_\_\_\_\_ 年龄：\_\_\_\_\_



## 附录 2:

## 试验数据汇总

注: GF 为平房、F1 为楼房 1 层、B1 为地下室 1 层依次类推

附表 2-1

| 1#地铁线路倍频程监测原始数据 |             |      |              |              |                |              |               |               |               | 单位: dB |  |  |
|-----------------|-------------|------|--------------|--------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------|--|--|
| 地点              | 持续时间<br>(s) | 测点楼层 | 特征频率<br>(Hz) | LZeq<br>16Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>500Hz |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 8           | GF   | 63.00        | 66.18        | 71.31          | 64.68        | 60.94         | 64.41         | 61.55         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 59.40        | 74.40          | 66.52        | 50.18         | 38.33         | 32.41         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 59.63        | 62.33          | 54.36        | 36.77         | 39.12         | 36.53         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 61.49        | 73.92          | 66.09        | 50.18         | 38.83         | 33.00         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 59.93        | 74.33          | 66.05        | 49.70         | 39.00         | 33.38         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 60.46        | 62.26          | 53.53        | 33.30         | 29.75         | 25.40         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 61.42        | 74.81          | 66.49        | 50.45         | 39.42         | 33.34         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 63.35        | 74.02          | 65.69        | 49.22         | 38.73         | 34.14         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 62.28        | 73.60          | 65.13        | 50.01         | 41.18         | 41.61         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 61.92        | 62.05          | 53.42        | 36.27         | 40.18         | 34.69         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 60.16        | 74.75          | 66.15        | 49.46         | 39.04         | 32.92         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 63.01        | 60.97          | 52.28        | 33.75         | 31.59         | 28.26         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 61.28        | 73.79          | 66.73        | 50.15         | 39.02         | 34.33         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 62.03        | 63.18          | 55.06        | 34.37         | 31.52         | 29.25         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 62.49        | 74.51          | 65.78        | 49.97         | 39.98         | 34.44         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 62.88        | 61.85          | 53.33        | 34.75         | 31.62         | 30.39         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 8           | GF   | 63.00        | 63.87        | 74.90          | 67.10        | 51.47         | 40.63         | 34.81         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 62.38        | 63.07          | 54.44        | 35.04         | 34.00         | 29.91         |        |  |  |
| 1#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 62.44        | 74.42          | 65.64        | 50.10         | 39.47         | 33.40         |        |  |  |

|          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1#地铁线路西侧 | 11    | GF    | 63.00 | 61.39 | 61.57 | 53.11 | 34.70 | 31.05 | 27.51 |
| 声能均值     | ----- | ----- | ----- | 62.21 | 72.11 | 64.00 | 50.79 | 51.60 | 48.69 |

附表 2-2

2#地铁线路倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点楼层  | 特征频率<br>(Hz) | LZeq<br>16Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>500Hz |
|----------|-------------|-------|--------------|--------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 2#地铁线路南侧 | 10          | F1    | 63.00        | 46.88        | 50.93          | 55.65        | 42.39         | 37.40         | 32.17         |
| 2#地铁线路南侧 | 11          | F1    | 63.00        | 52.47        | 52.92          | 55.79        | 47.10         | 38.40         | 29.42         |
| 2#地铁线路南侧 | 11          | F1    | 63.00        | 52.73        | 50.01          | 55.00        | 40.45         | 36.02         | 28.44         |
| 2#地铁线路南侧 | 10          | F1    | 63.00        | 47.02        | 53.33          | 55.86        | 47.26         | 37.09         | 27.36         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 53.62        | 52.11          | 55.45        | 40.30         | 36.25         | 31.18         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 54.27        | 54.16          | 57.37        | 49.06         | 40.39         | 28.91         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 46.66        | 53.69          | 57.05        | 42.18         | 34.04         | 24.78         |
| 2#地铁线路南侧 | 10          | F1    | 63.00        | 47.78        | 53.49          | 54.53        | 46.51         | 35.75         | 24.80         |
| 2#地铁线路南侧 | 10          | F1    | 63.00        | 50.63        | 51.11          | 55.39        | 41.32         | 36.86         | 28.75         |
| 2#地铁线路南侧 | 12          | F1    | 63.00        | 56.17        | 53.02          | 55.33        | 47.26         | 40.51         | 31.28         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 48.92        | 51.67          | 55.47        | 41.47         | 36.61         | 27.81         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 46.42        | 53.80          | 56.45        | 47.34         | 35.37         | 24.85         |
| 2#地铁线路南侧 | 12          | F1    | 63.00        | 54.64        | 51.66          | 55.50        | 42.18         | 37.63         | 34.61         |
| 2#地铁线路南侧 | 11          | F1    | 63.00        | 52.39        | 54.18          | 56.63        | 48.17         | 38.78         | 29.50         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 51.90        | 53.84          | 56.59        | 43.52         | 41.09         | 30.74         |
| 2#地铁线路南侧 | 13          | F1    | 63.00        | 49.76        | 50.24          | 53.43        | 45.59         | 33.80         | 25.33         |
| 2#地铁线路南侧 | 9           | F1    | 63.00        | 48.81        | 51.38          | 55.79        | 41.39         | 38.03         | 29.38         |
| 2#地铁线路南侧 | 11          | F1    | 63.00        | 51.62        | 52.62          | 55.58        | 47.62         | 33.84         | 23.76         |
| 2#地铁线路南侧 | 11          | F1    | 63.00        | 49.51        | 51.79          | 54.77        | 42.03         | 39.05         | 29.91         |
| 声能均值     | -----       | ----- | -----        | 49.51        | 51.98          | 55.07        | 42.36         | 39.33         | 30.18         |

附表 2-3

| 3#地铁线路倍频程监测原始数据 |             |      |              |              |                |              |               |               |               | 单位: dB |
|-----------------|-------------|------|--------------|--------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| 地点              | 持续时间<br>(s) | 测点楼层 | 特征频率<br>(Hz) | LZeq<br>16Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>500Hz |        |
| 3#地铁线路西侧        | 12          | GF   | 63.00        | 45.44        | 49.76          | 57.89        | 50.43         | 32.24         | 27.47         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 52.16        | 51.43          | 61.93        | 51.96         | 37.18         | 31.22         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 8           | GF   | 63.00        | 48.17        | 52.76          | 57.21        | 50.69         | 39.43         | 37.30         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 12          | GF   | 63.00        | 44.32        | 49.11          | 62.33        | 52.18         | 36.89         | 31.83         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 47.51        | 48.37          | 57.44        | 50.81         | 32.09         | 27.51         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 50.01        | 49.79          | 62.99        | 52.97         | 36.13         | 30.01         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 12          | GF   | 63.00        | 44.23        | 47.30          | 56.91        | 50.00         | 32.36         | 26.67         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 45.41        | 48.55          | 62.58        | 52.53         | 33.05         | 27.15         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 50.32        | 52.56          | 55.82        | 49.39         | 35.67         | 32.08         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 11          | GF   | 63.00        | 46.78        | 48.69          | 62.91        | 52.12         | 34.32         | 28.35         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 12          | GF   | 63.00        | 49.36        | 49.33          | 55.74        | 48.77         | 31.79         | 27.82         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 10          | GF   | 63.00        | 53.09        | 49.68          | 62.44        | 52.02         | 33.24         | 26.42         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 15          | GF   | 63.00        | 49.92        | 50.01          | 56.81        | 48.08         | 33.25         | 29.46         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 9           | GF   | 63.00        | 48.12        | 48.40          | 62.28        | 52.39         | 37.91         | 36.69         |        |
| 3#地铁线路西侧        | 12          | GF   | 63.00        | 52.84        | 49.84          | 55.00        | 48.84         | 34.15         | 28.92         |        |
| 声能均值            | ----        | ---- | ----         | 49.49        | 49.96          | 60.16        | 50.99         | 35.13         | 31.15         |        |

附表 2-4

3#地铁线路信频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点楼层 | 特征频率<br>(Hz) | LZeq<br>16Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>500Hz |
|----------|-------------|------|--------------|--------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 3#地铁线路西侧 | 12          | F1   | 63.00        | 45.78        | 53.09          | 56.72        | 50.79         | 32.80         | 23.33         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 45.60        | 51.86          | 71.32        | 64.69         | 39.72         | 29.32         |
| 3#地铁线路西侧 | 8           | F1   | 63.00        | 44.09        | 52.85          | 71.25        | 64.43         | 39.48         | 27.17         |
| 3#地铁线路西侧 | 15          | F1   | 63.00        | 43.96        | 54.06          | 54.88        | 48.76         | 30.91         | 26.10         |
| 3#地铁线路西侧 | 15          | F1   | 63.00        | 43.28        | 56.68          | 55.43        | 49.58         | 30.36         | 26.78         |
| 3#地铁线路西侧 | 10          | F1   | 63.00        | 45.16        | 57.23          | 70.13        | 63.04         | 39.64         | 32.76         |
| 3#地铁线路西侧 | 11          | F1   | 63.00        | 54.59        | 59.76          | 57.71        | 51.21         | 37.13         | 28.68         |
| 3#地铁线路西侧 | 8           | F1   | 63.00        | 47.77        | 59.72          | 71.84        | 64.88         | 41.30         | 31.36         |
| 3#地铁线路西侧 | 11          | F1   | 63.00        | 48.89        | 56.88          | 55.20        | 49.70         | 32.80         | 24.81         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 44.73        | 51.46          | 70.74        | 63.88         | 39.77         | 29.61         |
| 3#地铁线路西侧 | 10          | F1   | 63.00        | 44.29        | 51.60          | 70.33        | 63.52         | 39.21         | 31.12         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 50.21        | 52.14          | 71.30        | 64.46         | 40.19         | 32.15         |
| 3#地铁线路西侧 | 12          | F1   | 63.00        | 45.73        | 53.55          | 56.67        | 49.91         | 52.50         | 57.61         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 48.03        | 50.06          | 71.32        | 64.59         | 39.56         | 31.42         |
| 3#地铁线路西侧 | 10          | F1   | 63.00        | 50.13        | 53.18          | 58.67        | 50.45         | 35.56         | 37.22         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 46.76        | 49.76          | 71.23        | 64.72         | 41.15         | 40.66         |
| 3#地铁线路西侧 | 14          | F1   | 63.00        | 49.23        | 54.67          | 56.21        | 49.06         | 35.39         | 29.37         |
| 3#地铁线路西侧 | 12          | F1   | 63.00        | 52.45        | 52.60          | 57.07        | 36.26         | 31.49         | 30.01         |
| 3#地铁线路西侧 | 9           | F1   | 63.00        | 45.46        | 51.07          | 70.95        | 64.21         | 39.32         | 31.60         |
| 3#地铁线路西侧 | 10          | F1   | 63.00        | 46.15        | 50.96          | 58.49        | 51.87         | 35.37         | 37.92         |
| 声能均值     | ----        | ---- | ----         | 48.19        | 54.65          | 67.39        | 60.59         | 41.71         | 45.12         |

附表 2-5

| 1#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 |             |          |                  |               |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               | 单位: dB        |  |
|----------------------|-------------|----------|------------------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| 地点                   | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | 1/3 倍频程监测原始数据 |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               | 单位: dB        |  |
|                      |             |          |                  | LZeq<br>25Hz  | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 58.28         | 52.31          | 67.28        | 74.32        | 48.62        | 42.00        | 36.77         | 33.72         | 33.04         | 31.56         | 37.82         | 33.62         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 59.36         | 50.98          | 66.10        | 73.97        | 48.34        | 40.35        | 38.79         | 40.65         | 34.80         | 28.97         | 29.69         | 25.99         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 57.24         | 51.75          | 68.71        | 74.71        | 48.16        | 39.94        | 36.75         | 40.91         | 34.90         | 29.05         | 29.23         | 24.35         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 56.37         | 53.34          | 67.84        | 74.28        | 49.61        | 44.70        | 38.42         | 40.34         | 35.66         | 30.86         | 30.54         | 27.20         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 6           | GF       | 40.00            | 54.85         | 49.71          | 67.15        | 71.02        | 45.82        | 40.86        | 35.27         | 40.28         | 30.88         | 27.65         | 28.28         | 26.42         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 58.59         | 50.34          | 65.48        | 73.30        | 48.05        | 40.46        | 38.32         | 39.32         | 37.11         | 31.32         | 30.88         | 28.61         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 7           | GF       | 40.00            | 58.89         | 50.56          | 65.69        | 72.37        | 47.79        | 42.65        | 38.74         | 39.05         | 35.22         | 28.80         | 29.80         | 27.61         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 7           | GF       | 40.00            | 57.47         | 52.59          | 69.02        | 72.49        | 47.15        | 42.99        | 37.22         | 39.28         | 35.01         | 28.68         | 27.51         | 24.43         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 56.51         | 52.28          | 68.09        | 74.52        | 47.91        | 38.64        | 36.80         | 43.52         | 37.23         | 29.99         | 29.72         | 25.40         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 58.25         | 49.66          | 68.34        | 74.35        | 48.44        | 40.36        | 37.82         | 42.87         | 36.99         | 30.01         | 30.06         | 25.36         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 7           | GF       | 40.00            | 52.46         | 64.49          | 69.64        | 68.77        | 59.11        | 54.85        | 47.48         | 38.88         | 37.41         | 30.49         | 27.29         | 26.58         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 58.58         | 49.93          | 65.71        | 74.09        | 48.62        | 39.34        | 39.58         | 42.55         | 38.92         | 30.29         | 29.70         | 25.91         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 6           | GF       | 40.00            | 52.77         | 53.22          | 73.58        | 65.37        | 44.57        | 47.71        | 41.55         | 37.02         | 33.83         | 30.69         | 28.02         | 27.85         |  |
| 1#地铁线路西侧             | 5           | GF       | 40.00            | 56.69         | 50.95          | 68.61        | 74.23        | 49.50        | 42.12        | 38.90         | 44.08         | 37.73         | 30.40         | 30.98         | 29.81         |  |
| 声能均值                 | ----        | ----     | ----             | 57.32         | 54.26          | 68.46        | 73.97        | 50.29        | 44.68        | 39.44         | 42.05         | 36.69         | 29.82         | 30.79         | 27.44         |  |



附表 2-6

1#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 37.01        | 32.96          | 38.35        | 55.95        | 39.26        | 39.77        | 27.79         | 18.37         | 22.13         | 16.01         | 11.76         | 10.02         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 42.03        | 34.56          | 48.64        | 65.89        | 47.02        | 47.99        | 39.67         | 29.24         | 34.24         | 26.05         | 22.44         | 17.37         |
| 1#地铁线路西侧 | 11          | F1       | 40.00            | 38.17        | 31.56          | 39.37        | 56.70        | 41.18        | 41.00        | 28.97         | 20.82         | 24.28         | 22.68         | 15.02         | 13.25         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 41.36        | 34.15          | 48.72        | 65.90        | 47.57        | 48.30        | 40.30         | 30.50         | 34.95         | 29.48         | 23.81         | 18.43         |
| 1#地铁线路西侧 | 11          | F1       | 40.00            | 36.85        | 29.55          | 38.45        | 56.91        | 41.52        | 39.82        | 27.09         | 18.78         | 22.28         | 26.00         | 15.22         | 13.97         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 40.82        | 34.59          | 49.66        | 66.71        | 48.40        | 48.20        | 40.86         | 30.73         | 36.28         | 29.38         | 24.37         | 19.33         |
| 1#地铁线路西侧 | 11          | F1       | 40.00            | 37.92        | 31.76          | 38.82        | 55.97        | 41.54        | 40.25        | 29.67         | 22.01         | 24.74         | 27.48         | 17.31         | 15.85         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 42.91        | 35.93          | 49.24        | 66.00        | 47.43        | 48.06        | 40.38         | 30.25         | 35.18         | 29.55         | 23.42         | 18.91         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 37.90        | 31.63          | 38.71        | 56.05        | 40.09        | 39.49        | 26.86         | 21.32         | 23.98         | 27.50         | 17.54         | 16.22         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 42.29        | 35.65          | 48.52        | 65.83        | 47.79        | 48.13        | 40.76         | 30.87         | 35.15         | 30.43         | 24.27         | 19.61         |
| 1#地铁线路西侧 | 10          | F1       | 40.00            | 38.57        | 34.95          | 39.76        | 57.42        | 41.87        | 40.65        | 28.37         | 21.28         | 26.32         | 27.44         | 16.92         | 15.53         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 41.45        | 35.53          | 48.92        | 65.67        | 46.84        | 48.18        | 40.16         | 29.27         | 33.58         | 29.35         | 23.27         | 19.08         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 38.87        | 32.63          | 38.95        | 56.20        | 40.61        | 39.39        | 27.05         | 19.33         | 22.82         | 26.83         | 16.52         | 14.88         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 41.68        | 34.51          | 48.89        | 66.30        | 47.81        | 48.51        | 40.25         | 29.79         | 34.39         | 28.88         | 23.33         | 18.67         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 42.68        | 36.03          | 49.54        | 65.65        | 46.59        | 47.61        | 39.84         | 29.96         | 34.13         | 29.67         | 24.20         | 19.32         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 38.11        | 36.29          | 40.03        | 56.25        | 41.00        | 39.64        | 30.13         | 22.24         | 25.15         | 26.88         | 18.64         | 17.21         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 41.24        | 36.25          | 48.53        | 66.55        | 48.40        | 47.70        | 40.47         | 30.40         | 35.30         | 29.15         | 23.01         | 19.15         |
| 1#地铁线路西侧 | 10          | F1       | 40.00            | 36.70        | 31.36          | 40.60        | 58.05        | 44.41        | 42.62        | 30.95         | 24.51         | 27.08         | 26.49         | 16.73         | 14.24         |
| 1#地铁线路西侧 | 12          | F1       | 40.00            | 41.98        | 34.95          | 49.20        | 66.45        | 48.19        | 48.61        | 40.78         | 30.92         | 35.36         | 29.60         | 22.94         | 18.79         |
| 1#地铁线路西侧 | 14          | F1       | 40.00            | 41.75        | 34.57          | 48.14        | 65.34        | 47.76        | 48.42        | 39.78         | 29.65         | 35.33         | 28.57         | 22.78         | 18.49         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 41.38        | 35.09          | 47.34        | 65.12        | 46.71        | 47.90        | 39.45         | 28.84         | 32.91         | 27.71         | 21.60         | 18.01         |
| 1#地铁线路西侧 | 11          | F1       | 40.00            | 37.45        | 32.67          | 38.29        | 56.08        | 41.69        | 40.35        | 28.34         | 20.47         | 23.42         | 25.96         | 15.87         | 14.54         |
| 1#地铁线路西侧 | 13          | F1       | 40.00            | 42.46        | 37.98          | 48.92        | 65.85        | 47.28        | 48.19        | 40.08         | 29.53         | 33.59         | 28.44         | 22.55         | 18.72         |

|          |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1#地铁线路西侧 | 11   | F1   | 40.00 | 37.17 | 31.80 | 39.34 | 56.75 | 41.40 | 41.02 | 28.69 | 21.08 | 24.55 | 26.26 | 23.35 | 14.36 |
| 1#地铁线路西侧 | 13   | F1   | 40.00 | 41.82 | 35.90 | 48.21 | 65.20 | 46.25 | 47.34 | 39.77 | 28.73 | 33.09 | 27.90 | 22.06 | 18.43 |
| 1#地铁线路西侧 | 13   | F1   | 40.00 | 42.95 | 34.89 | 48.67 | 66.13 | 47.94 | 48.20 | 40.02 | 29.62 | 34.27 | 28.02 | 22.22 | 18.15 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F1   | 40.00 | 34.12 | 41.95 | 55.34 | 62.74 | 54.92 | 58.72 | 46.83 | 39.53 | 39.80 | 33.82 | 24.16 | 17.60 |
| 1#地铁线路西侧 | 12   | F1   | 40.00 | 41.92 | 34.81 | 48.73 | 66.26 | 48.19 | 48.14 | 40.54 | 29.97 | 35.13 | 29.54 | 23.62 | 18.80 |
| 1#地铁线路西侧 | 12   | F1   | 40.00 | 36.91 | 31.38 | 38.78 | 55.83 | 41.94 | 39.48 | 27.73 | 21.50 | 25.33 | 26.09 | 19.74 | 16.34 |
| 1#地铁线路西侧 | 11   | F1   | 40.00 | 43.02 | 35.12 | 48.74 | 66.14 | 47.57 | 48.42 | 40.16 | 29.78 | 33.89 | 28.87 | 22.74 | 18.78 |
| 1#地铁线路西侧 | 11   | F1   | 40.00 | 37.95 | 32.21 | 41.03 | 56.07 | 40.69 | 40.25 | 27.06 | 19.18 | 23.34 | 25.17 | 21.38 | 22.55 |
| 1#地铁线路西侧 | 12   | F1   | 40.00 | 41.76 | 34.61 | 48.99 | 66.27 | 47.53 | 48.20 | 40.07 | 29.09 | 34.02 | 28.59 | 22.36 | 19.31 |
| 1#地铁线路西侧 | 13   | F1   | 40.00 | 36.61 | 36.54 | 56.41 | 56.66 | 45.21 | 48.78 | 37.89 | 28.71 | 29.58 | 27.39 | 18.43 | 15.24 |
| 1#地铁线路西侧 | 13   | F1   | 40.00 | 42.59 | 37.60 | 48.98 | 65.97 | 47.71 | 48.39 | 40.99 | 30.87 | 35.95 | 30.42 | 23.41 | 19.04 |
| 1#地铁线路西侧 | 12   | F1   | 40.00 | 36.49 | 29.50 | 38.82 | 56.17 | 40.69 | 39.95 | 30.13 | 20.37 | 23.64 | 25.31 | 16.34 | 14.93 |
| 1#地铁线路西侧 | 13   | F1   | 40.00 | 42.44 | 35.24 | 48.52 | 65.59 | 46.89 | 47.47 | 39.88 | 28.62 | 33.05 | 28.07 | 22.40 | 18.52 |
| 1#地铁线路西侧 | 12   | F1   | 40.00 | 37.67 | 32.41 | 39.03 | 56.43 | 41.38 | 39.81 | 28.64 | 20.51 | 24.06 | 26.27 | 15.58 | 13.04 |
| 声能均值     | ---- | ---- | ----  | 40.51 | 35.05 | 48.15 | 63.76 | 46.59 | 47.89 | 38.73 | 29.25 | 32.90 | 28.27 | 21.63 | 17.76 |

附表 2-7

1#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间 (s) | 测点<br>楼层 | 特征频率 (Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|----------|----------|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1#地铁线路西侧 | 8        | F5       | 40.00     | 44.36        | 58.55          | 74.17        | 53.58        | 45.78        | 48.10        | 31.68         | 34.55         | 32.25         | 28.89         | 27.61         | 25.06         |
| 1#地铁线路西侧 | 10       | F5       | 40.00     | 40.62        | 43.72          | 59.70        | 44.04        | 41.65        | 35.83        | 27.62         | 33.43         | 31.81         | 30.47         | 35.02         | 29.94         |
| 1#地铁线路西侧 | 9        | F5       | 40.00     | 43.31        | 57.81          | 73.70        | 53.55        | 49.80        | 52.54        | 39.66         | 38.86         | 37.49         | 33.63         | 36.17         | 33.97         |
| 1#地铁线路西侧 | 9        | F5       | 40.00     | 44.39        | 43.89          | 60.68        | 45.14        | 39.57        | 34.38        | 26.12         | 32.10         | 29.56         | 27.34         | 30.12         | 26.69         |
| 1#地铁线路西侧 | 8        | F5       | 40.00     | 44.33        | 58.53          | 73.67        | 52.83        | 52.96        | 47.81        | 31.60         | 39.81         | 35.00         | 34.49         | 37.20         | 32.27         |

|          |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 37.97 | 43.64 | 59.82 | 43.73 | 43.27 | 43.81 | 30.09 | 36.52 | 33.01 | 32.19 | 36.87 | 28.97 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 41.15 | 57.31 | 73.14 | 52.86 | 45.17 | 46.63 | 30.33 | 35.42 | 32.74 | 30.10 | 29.88 | 25.41 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 42.42 | 58.60 | 73.52 | 52.10 | 44.23 | 49.68 | 31.62 | 34.96 | 31.74 | 30.63 | 31.31 | 26.71 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 41.25 | 44.54 | 59.99 | 46.09 | 43.84 | 42.34 | 29.18 | 35.22 | 32.91 | 31.95 | 35.57 | 32.07 |
| 1#地铁线路西侧 | 8    | F5   | 40.00 | 42.59 | 57.45 | 73.96 | 54.13 | 47.75 | 48.59 | 31.23 | 36.98 | 34.49 | 31.16 | 31.73 | 27.18 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 41.38 | 43.53 | 60.24 | 45.38 | 42.17 | 37.49 | 28.81 | 35.37 | 33.15 | 33.39 | 37.08 | 29.32 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 41.26 | 57.67 | 73.54 | 53.40 | 44.99 | 47.76 | 30.58 | 33.70 | 30.46 | 28.35 | 28.92 | 25.61 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 42.59 | 57.22 | 73.60 | 53.66 | 45.54 | 47.71 | 30.74 | 33.67 | 30.85 | 28.17 | 28.15 | 23.86 |
| 1#地铁线路西侧 | 8    | F5   | 40.00 | 42.86 | 57.39 | 73.30 | 52.95 | 44.36 | 47.09 | 30.19 | 33.91 | 30.20 | 28.44 | 28.49 | 24.83 |
| 1#地铁线路西侧 | 7    | F5   | 40.00 | 42.11 | 43.49 | 60.62 | 45.99 | 43.14 | 38.99 | 27.42 | 35.62 | 35.78 | 33.47 | 35.56 | 33.16 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 43.05 | 57.95 | 73.89 | 53.34 | 46.73 | 48.07 | 30.87 | 33.11 | 31.24 | 29.39 | 28.71 | 25.01 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 35.93 | 43.95 | 60.43 | 44.29 | 38.68 | 34.40 | 24.64 | 28.82 | 26.08 | 24.83 | 28.05 | 23.43 |
| 1#地铁线路西侧 | 8    | F5   | 40.00 | 43.54 | 58.08 | 73.39 | 52.73 | 45.83 | 48.08 | 30.74 | 34.59 | 33.05 | 29.35 | 30.32 | 27.93 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 41.02 | 57.08 | 72.85 | 52.65 | 46.28 | 46.66 | 30.44 | 34.89 | 31.84 | 31.66 | 34.02 | 29.72 |
| 1#地铁线路西侧 | 11   | F5   | 40.00 | 52.51 | 62.43 | 64.03 | 55.09 | 53.01 | 48.36 | 36.22 | 34.16 | 30.69 | 28.00 | 31.69 | 25.68 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 40.47 | 57.39 | 73.65 | 53.47 | 47.22 | 48.05 | 31.33 | 36.86 | 32.74 | 32.50 | 34.90 | 28.33 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 37.53 | 42.85 | 59.40 | 44.44 | 41.53 | 36.74 | 27.62 | 37.68 | 34.02 | 33.45 | 37.02 | 32.57 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 41.55 | 57.68 | 73.78 | 53.19 | 44.86 | 46.77 | 29.98 | 34.35 | 30.00 | 28.47 | 29.61 | 25.29 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 42.10 | 45.38 | 60.16 | 44.55 | 45.63 | 37.92 | 26.41 | 36.59 | 33.48 | 31.48 | 36.01 | 28.68 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 41.21 | 57.65 | 73.87 | 53.27 | 44.70 | 47.97 | 32.20 | 35.53 | 33.52 | 32.54 | 36.11 | 32.37 |
| 1#地铁线路西侧 | 14   | F5   | 40.00 | 40.93 | 62.60 | 59.57 | 45.24 | 48.40 | 39.90 | 29.69 | 33.86 | 31.09 | 29.80 | 33.28 | 27.01 |
| 1#地铁线路西侧 | 8    | F5   | 40.00 | 43.49 | 58.54 | 74.49 | 53.91 | 46.39 | 49.07 | 31.36 | 33.36 | 30.97 | 29.07 | 29.07 | 24.97 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 39.36 | 43.56 | 59.99 | 44.27 | 44.91 | 44.94 | 27.08 | 36.40 | 34.39 | 31.39 | 35.20 | 30.03 |
| 1#地铁线路西侧 | 9    | F5   | 40.00 | 44.22 | 57.92 | 73.80 | 52.93 | 45.09 | 47.34 | 29.88 | 32.76 | 28.73 | 27.79 | 28.94 | 25.54 |
| 1#地铁线路西侧 | 10   | F5   | 40.00 | 40.52 | 43.73 | 61.09 | 45.14 | 38.75 | 35.04 | 24.36 | 31.30 | 27.49 | 27.55 | 33.35 | 33.35 |
| 声能均值     | ---- | ---- | ----  | 43.31 | 56.75 | 71.38 | 51.54 | 46.48 | 46.55 | 31.32 | 35.34 | 32.64 | 30.91 | 33.68 | 29.32 |

附表 2-8

| 3#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 |             |          |                  |              |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               |               |
|----------------------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 单位: dB               |             |          |                  |              |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               |               |
| 地点                   | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 49.45        | 52.35          | 61.87        | 66.63        | 66.69        | 70.47        | 63.95         | 56.38         | 48.94         | 41.47         | 37.60         | 33.89         |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 48.19        | 43.71          | 52.67        | 60.88        | 66.10        | 69.93        | 59.62         | 46.66         | 40.91         | 38.05         | 35.17         | 32.19         |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 49.90        | 52.33          | 62.37        | 66.43        | 66.00        | 70.26        | 64.21         | 57.07         | 49.19         | 41.53         | 38.12         | 33.44         |
| 3#地铁线路东侧             | 9           | F2       | 63.00            | 48.38        | 45.72          | 55.21        | 61.62        | 66.17        | 69.73        | 58.49         | 46.48         | 41.72         | 39.54         | 34.32         | 31.27         |
| 3#地铁线路东侧             | 7           | F2       | 63.00            | 49.34        | 53.50          | 61.69        | 67.74        | 68.25        | 72.10        | 64.94         | 57.97         | 49.98         | 41.76         | 37.97         | 33.40         |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 50.43        | 46.09          | 54.92        | 62.73        | 66.45        | 69.87        | 59.41         | 46.43         | 41.21         | 37.34         | 35.68         | 31.25         |
| 3#地铁线路东侧             | 10          | F2       | 63.00            | 48.81        | 52.32          | 62.36        | 69.42        | 69.39        | 72.67        | 64.57         | 56.85         | 49.72         | 42.35         | 37.92         | 33.67         |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 48.35        | 48.82          | 57.46        | 60.81        | 66.04        | 70.16        | 59.15         | 46.31         | 40.62         | 37.32         | 36.12         | 32.50         |
| 3#地铁线路东侧             | 9           | F2       | 63.00            | 50.03        | 51.91          | 62.04        | 66.30        | 65.61        | 68.51        | 62.82         | 56.67         | 49.04         | 39.73         | 35.36         | 30.99         |
| 3#地铁线路东侧             | 8           | F2       | 63.00            | 47.88        | 45.66          | 54.63        | 62.47        | 67.12        | 70.88        | 58.51         | 47.21         | 40.78         | 34.21         | 29.67         | 28.26         |
| 声能均值                 | -----       | -----    | -----            | 49.15        | 50.43          | 59.93        | 65.58        | 66.98        | 70.62        | 62.32         | 54.39         | 47.01         | 39.98         | 36.31         | 32.36         |

附表 2-9

| 4#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 |             |          |                  |              |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               |               |
|----------------------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 单位: dB               |             |          |                  |              |                |              |              |              |              |               |               |               |               |               |               |
| 地点                   | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
| 4#地铁线路北侧             | 7           | B2       | 50.00            | 51.58        | 49.44          | 52.25        | 63.02        | 57.26        | 46.37        | 36.32         | 30.90         | 30.47         | 30.02         | 33.27         | 30.78         |
| 4#地铁线路北侧             | 8           | B2       | 50.00            | 48.88        | 48.37          | 51.72        | 59.73        | 57.25        | 50.22        | 37.73         | 32.15         | 33.04         | 33.19         | 35.02         | 36.87         |
| 4#地铁线路北侧             | 11          | B2       | 50.00            | 49.04        | 46.22          | 55.00        | 61.90        | 56.50        | 44.65        | 33.01         | 31.16         | 31.25         | 30.88         | 31.61         | 32.06         |
| 4#地铁线路北侧             | 10          | B2       | 50.00            | 45.93        | 44.37          | 49.89        | 58.76        | 57.62        | 61.54        | 52.67         | 37.20         | 36.89         | 35.33         | 34.09         | 32.69         |
| 4#地铁线路北侧             | 10          | B2       | 50.00            | 50.97        | 49.06          | 54.78        | 65.90        | 61.72        | 51.53        | 39.35         | 34.19         | 34.98         | 34.50         | 30.77         | 34.58         |



|          |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 48.68 | 44.34 | 52.00 | 62.23 | 57.05 | 47.15 | 35.96 | 32.43 | 36.39 | 32.06 | 30.41 | 32.51 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 45.94 | 45.02 | 49.80 | 59.10 | 54.70 | 48.89 | 37.80 | 32.92 | 33.83 | 32.65 | 34.60 | 32.76 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 51.07 | 43.92 | 49.90 | 61.55 | 57.41 | 48.33 | 35.42 | 32.65 | 34.57 | 32.49 | 29.52 | 31.18 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 47.18 | 43.80 | 46.58 | 57.96 | 53.82 | 48.83 | 36.89 | 30.68 | 31.63 | 30.00 | 28.82 | 30.63 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 47.72 | 43.20 | 49.30 | 60.48 | 56.20 | 43.95 | 31.87 | 31.37 | 32.76 | 33.25 | 31.31 | 32.08 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 46.92 | 43.41 | 49.35 | 61.44 | 57.35 | 51.93 | 40.69 | 33.71 | 33.89 | 32.60 | 30.79 | 31.23 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 47.36 | 44.98 | 52.82 | 61.68 | 56.98 | 51.45 | 38.25 | 33.50 | 37.99 | 33.58 | 32.57 | 35.38 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 45.21 | 49.27 | 60.45 | 69.44 | 59.40 | 54.42 | 47.83 | 37.04 | 35.90 | 34.48 | 31.23 | 33.86 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 45.95 | 43.42 | 51.08 | 62.10 | 56.18 | 44.96 | 32.58 | 31.90 | 32.45 | 33.56 | 30.01 | 33.04 |
| 4#地铁线路北侧 | 7    | B2   | 50.00 | 46.53 | 45.39 | 52.20 | 61.68 | 56.41 | 49.48 | 35.94 | 32.20 | 32.04 | 32.77 | 32.83 | 30.27 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 44.22 | 42.78 | 50.93 | 62.54 | 57.25 | 46.46 | 32.80 | 31.21 | 30.50 | 31.60 | 29.55 | 30.65 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 46.65 | 45.34 | 51.44 | 60.64 | 55.65 | 50.18 | 37.04 | 31.08 | 31.74 | 31.76 | 30.62 | 30.68 |
| 4#地铁线路北侧 | 10   | B2   | 50.00 | 50.05 | 44.89 | 52.25 | 61.57 | 55.66 | 44.69 | 31.68 | 28.86 | 29.94 | 31.21 | 30.35 | 31.14 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 48.13 | 48.20 | 55.76 | 61.08 | 57.16 | 51.38 | 39.36 | 34.23 | 34.02 | 35.27 | 33.29 | 33.01 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 46.25 | 48.12 | 49.93 | 60.74 | 55.26 | 44.66 | 32.67 | 29.69 | 32.07 | 33.48 | 31.71 | 32.13 |
| 4#地铁线路北侧 | 8    | B2   | 50.00 | 44.19 | 45.57 | 50.02 | 61.56 | 56.97 | 51.81 | 39.47 | 34.30 | 34.30 | 34.99 | 32.07 | 32.87 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 45.10 | 46.29 | 55.27 | 61.38 | 55.44 | 44.89 | 33.50 | 31.16 | 33.82 | 32.27 | 32.39 | 32.19 |
| 4#地铁线路北侧 | 10   | B2   | 50.00 | 48.56 | 43.49 | 48.87 | 58.34 | 54.15 | 48.54 | 36.93 | 31.55 | 32.45 | 33.10 | 34.78 | 32.52 |
| 4#地铁线路北侧 | 10   | B2   | 50.00 | 51.20 | 45.42 | 51.82 | 61.10 | 56.42 | 46.42 | 34.26 | 32.68 | 33.83 | 32.15 | 30.98 | 31.28 |
| 4#地铁线路北侧 | 9    | B2   | 50.00 | 48.63 | 46.48 | 49.96 | 60.09 | 55.22 | 50.14 | 37.54 | 31.01 | 30.14 | 31.64 | 30.43 | 30.82 |
| 声能均值     | ---- | ---- | ----  | 48.15 | 46.03 | 52.75 | 62.16 | 57.08 | 51.30 | 41.37 | 33.00 | 33.85 | 33.16 | 32.21 | 32.68 |

附表 2-10



4#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 4#地铁线路北侧 | 13          | F1       | 63.00            | 63.59        | 65.46          | 58.50        | 55.88        | 61.89        | 49.61        | 41.51         | 42.34         | 37.62         | 38.04         | 40.77         | 37.26         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | F1       | 63.00            | 60.78        | 66.52          | 59.55        | 56.44        | 63.91        | 57.16        | 44.70         | 42.25         | 39.20         | 39.70         | 42.02         | 38.85         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | F1       | 63.00            | 59.45        | 62.33          | 56.11        | 56.85        | 60.29        | 49.46        | 43.41         | 42.45         | 37.86         | 38.02         | 40.72         | 38.73         |
| 4#地铁线路北侧 | 7           | F1       | 63.00            | 59.54        | 62.60          | 59.61        | 57.75        | 65.63        | 65.55        | 64.37         | 49.71         | 54.28         | 53.32         | 52.07         | 45.19         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 56.52        | 62.76          | 58.95        | 60.73        | 65.95        | 56.42        | 49.02         | 45.98         | 45.02         | 46.56         | 42.47         | 42.35         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | F1       | 63.00            | 58.89        | 61.56          | 55.56        | 54.97        | 59.97        | 52.16        | 45.20         | 43.88         | 49.46         | 43.69         | 44.35         | 39.47         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | F1       | 63.00            | 54.46        | 61.04          | 55.63        | 52.40        | 60.32        | 54.49        | 44.17         | 41.18         | 37.00         | 37.32         | 40.79         | 36.85         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 57.88        | 60.91          | 56.76        | 56.73        | 62.59        | 53.47        | 45.76         | 44.07         | 45.38         | 46.83         | 43.50         | 39.57         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | F1       | 63.00            | 59.22        | 62.29          | 57.08        | 58.00        | 66.05        | 58.70        | 55.97         | 51.45         | 55.95         | 50.74         | 45.49         | 40.96         |
| 4#地铁线路北侧 | 7           | F1       | 63.00            | 57.43        | 60.78          | 55.91        | 59.69        | 67.56        | 49.81        | 41.80         | 45.91         | 40.75         | 41.65         | 42.09         | 38.95         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | F1       | 63.00            | 54.52        | 60.54          | 57.91        | 57.20        | 63.36        | 57.86        | 49.08         | 42.03         | 38.19         | 39.21         | 41.19         | 37.51         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 58.89        | 62.41          | 57.27        | 56.61        | 62.13        | 55.69        | 42.95         | 43.08         | 45.75         | 41.59         | 43.97         | 38.99         |
| 4#地铁线路北侧 | 7           | F1       | 63.00            | 54.47        | 67.13          | 67.50        | 65.39        | 67.37        | 62.03        | 56.92         | 45.65         | 42.78         | 44.50         | 44.20         | 37.33         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 55.91        | 61.32          | 56.68        | 55.35        | 60.55        | 48.27        | 39.75         | 41.24         | 38.21         | 39.09         | 40.86         | 37.04         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 55.91        | 62.32          | 57.73        | 55.74        | 62.64        | 57.18        | 44.11         | 41.20         | 38.14         | 38.92         | 42.01         | 37.46         |
| 4#地铁线路北侧 | 10          | F1       | 63.00            | 55.60        | 60.60          | 56.82        | 55.54        | 60.51        | 49.07        | 39.01         | 42.09         | 37.49         | 36.71         | 40.11         | 35.98         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | F1       | 63.00            | 57.41        | 62.17          | 58.01        | 55.79        | 62.36        | 56.60        | 43.82         | 42.54         | 38.66         | 39.37         | 42.00         | 37.38         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 62.49        | 64.10          | 63.71        | 57.70        | 60.42        | 49.61        | 42.59         | 45.23         | 42.67         | 45.02         | 44.51         | 41.43         |
| 4#地铁线路北侧 | 14          | F1       | 63.00            | 54.91        | 60.19          | 56.63        | 55.24        | 65.71        | 57.34        | 46.74         | 43.32         | 40.88         | 40.61         | 42.32         | 37.58         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | F1       | 63.00            | 58.26        | 62.72          | 59.27        | 54.54        | 58.08        | 48.33        | 40.11         | 40.25         | 36.91         | 38.53         | 41.82         | 38.81         |
| 4#地铁线路北侧 | 8           | F1       | 63.00            | 53.31        | 60.23          | 57.93        | 56.55        | 65.20        | 60.51        | 50.59         | 42.87         | 39.69         | 41.86         | 43.78         | 38.94         |
| 4#地铁线路北侧 | 14          | F1       | 63.00            | 53.80        | 59.23          | 57.74        | 53.89        | 58.27        | 47.43        | 40.27         | 41.00         | 40.75         | 40.98         | 42.97         | 38.54         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | F1       | 63.00            | 54.93        | 59.19          | 55.50        | 52.19        | 60.03        | 55.13        | 44.88         | 41.38         | 38.37         | 40.21         | 42.38         | 38.57         |
| 4#地铁线路北侧 | 13          | F1       | 63.00            | 55.49        | 61.74          | 56.29        | 55.61        | 59.85        | 50.13        | 40.08         | 40.15         | 37.98         | 39.26         | 42.70         | 37.25         |

|          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4#地铁线路北侧 | 11    | F1    | 63.00 | 56.01 | 60.88 | 56.98 | 53.43 | 61.79 | 57.39 | 45.12 | 42.30 | 39.19 | 42.90 | 43.34 | 38.34 |
| 声能均值     | ----- | ----- | ----- | 58.08 | 62.56 | 59.22 | 57.53 | 63.37 | 57.09 | 52.38 | 44.46 | 46.11 | 44.40 | 43.89 | 39.33 |

附表 2-11

4#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据

单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 4#地铁线路北侧 | 8           | B1       | 63.00            | 48.19        | 44.13          | 36.79        | 44.74        | 55.89        | 51.35        | 30.99         | 33.42         | 33.29         | 31.27         | 31.02         | 32.28         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | B1       | 63.00            | 45.03        | 42.36          | 43.14        | 46.68        | 53.63        | 45.13        | 33.05         | 35.37         | 33.42         | 32.52         | 34.01         | 33.83         |
| 4#地铁线路北侧 | 5           | B1       | 63.00            | 43.56        | 39.76          | 38.12        | 41.59        | 57.45        | 51.51        | 32.87         | 35.79         | 33.24         | 31.73         | 33.04         | 31.07         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | B1       | 63.00            | 44.13        | 41.69          | 42.47        | 51.97        | 58.11        | 50.10        | 36.04         | 33.55         | 33.02         | 29.98         | 29.03         | 28.90         |
| 4#地铁线路北侧 | 14          | B1       | 63.00            | 39.96        | 39.84          | 38.98        | 44.59        | 51.55        | 45.81        | 30.76         | 31.72         | 35.49         | 31.10         | 29.60         | 27.72         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | B1       | 63.00            | 44.13        | 38.71          | 38.60        | 47.14        | 54.15        | 48.24        | 32.27         | 31.89         | 34.07         | 30.12         | 28.21         | 27.51         |
| 4#地铁线路北侧 | 14          | B1       | 63.00            | 44.13        | 37.78          | 35.73        | 43.48        | 50.97        | 44.12        | 29.31         | 32.68         | 31.84         | 32.47         | 32.16         | 35.18         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | B1       | 63.00            | 41.00        | 34.29          | 37.72        | 47.64        | 53.67        | 50.76        | 36.08         | 31.70         | 30.78         | 30.77         | 29.86         | 28.18         |
| 4#地铁线路北侧 | 15          | B1       | 63.00            | 41.75        | 41.65          | 46.50        | 52.76        | 54.00        | 50.82        | 41.34         | 35.78         | 32.76         | 31.92         | 31.07         | 29.42         |
| 4#地铁线路北侧 | 13          | B1       | 63.00            | 37.72        | 35.94          | 36.58        | 44.28        | 50.79        | 42.69        | 28.03         | 29.94         | 29.97         | 30.15         | 28.92         | 28.10         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | B1       | 63.00            | 40.17        | 38.53          | 38.20        | 46.01        | 51.77        | 48.13        | 32.28         | 29.63         | 28.83         | 29.59         | 30.55         | 25.95         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | B1       | 63.00            | 41.16        | 37.12          | 36.31        | 39.60        | 55.22        | 52.38        | 30.41         | 35.77         | 34.18         | 31.62         | 30.05         | 26.28         |
| 4#地铁线路北侧 | 9           | B1       | 63.00            | 44.83        | 38.74          | 39.30        | 45.07        | 51.31        | 45.12        | 28.99         | 28.89         | 29.19         | 29.84         | 27.65         | 25.61         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | B1       | 63.00            | 39.92        | 35.97          | 36.92        | 44.31        | 50.63        | 43.54        | 29.09         | 31.38         | 30.01         | 30.26         | 30.62         | 27.99         |
| 4#地铁线路北侧 | 11          | B1       | 63.00            | 39.40        | 38.56          | 39.50        | 46.34        | 53.10        | 51.08        | 41.13         | 46.06         | 46.08         | 50.68         | 46.68         | 47.31         |
| 4#地铁线路北侧 | 5           | B1       | 63.00            | 39.66        | 33.98          | 33.93        | 35.11        | 53.40        | 47.05        | 28.48         | 36.36         | 36.58         | 34.53         | 31.90         | 34.98         |
| 4#地铁线路北侧 | 12          | B1       | 63.00            | 44.92        | 39.66          | 38.30        | 44.89        | 51.51        | 44.97        | 29.87         | 32.06         | 33.13         | 30.92         | 29.45         | 28.87         |
| 4#地铁线路北侧 | 8           | B1       | 63.00            | 42.63        | 39.93          | 37.26        | 39.70        | 52.51        | 44.34        | 30.00         | 36.75         | 31.18         | 33.16         | 33.50         | 29.42         |
| 声能均值     | -----       | -----    | -----            | 43.08        | 39.53          | 40.05        | 46.82        | 53.62        | 48.59        | 34.91         | 36.53         | 36.32         | 39.08         | 35.85         | 36.15         |

附表 2-12

5#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 47.96        | 42.22          | 57.34        | 48.20        | 41.03        | 38.74        | 36.03         | 37.54         | 32.83         | 29.83         | 24.21         | 20.44         |
| 5#地铁线路南侧 | 15          | B1       | 50.00            | 31.59        | 41.99          | 58.81        | 47.38        | 42.19        | 43.49        | 36.73         | 36.35         | 29.42         | 26.90         | 24.17         | 27.20         |
| 5#地铁线路南侧 | 13          | B1       | 50.00            | 35.34        | 43.65          | 58.52        | 48.66        | 42.19        | 41.87        | 39.19         | 41.51         | 36.27         | 32.13         | 28.82         | 26.90         |
| 5#地铁线路南侧 | 15          | B1       | 50.00            | 36.84        | 42.95          | 57.75        | 48.86        | 43.82        | 43.42        | 40.31         | 39.81         | 35.95         | 32.61         | 27.70         | 24.25         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 34.43        | 45.44          | 59.58        | 50.22        | 45.32        | 43.42        | 42.39         | 41.35         | 38.60         | 36.74         | 34.97         | 39.79         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B1       | 50.00            | 38.59        | 44.22          | 59.97        | 48.32        | 44.44        | 45.14        | 38.65         | 37.35         | 31.05         | 29.02         | 24.99         | 25.17         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 36.29        | 40.56          | 57.95        | 49.98        | 42.09        | 43.96        | 40.97         | 40.77         | 40.44         | 41.37         | 37.03         | 37.20         |
| 5#地铁线路南侧 | 15          | B1       | 50.00            | 35.87        | 47.40          | 61.14        | 49.99        | 45.68        | 48.74        | 41.51         | 40.08         | 36.40         | 34.33         | 28.65         | 29.03         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B1       | 50.00            | 34.27        | 42.72          | 58.50        | 48.77        | 41.43        | 39.66        | 38.53         | 38.69         | 35.06         | 32.59         | 28.08         | 25.45         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B1       | 50.00            | 38.85        | 42.72          | 60.79        | 49.02        | 45.41        | 47.22        | 42.65         | 43.85         | 36.88         | 37.24         | 35.75         | 36.69         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 33.39        | 42.51          | 58.58        | 49.02        | 40.85        | 38.95        | 36.78         | 37.64         | 34.20         | 32.80         | 26.35         | 23.12         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 32.44        | 43.11          | 60.22        | 48.62        | 44.09        | 45.05        | 39.75         | 38.06         | 35.84         | 34.15         | 30.87         | 35.30         |
| 5#地铁线路南侧 | 8           | B1       | 50.00            | 32.10        | 45.63          | 57.65        | 48.74        | 43.09        | 41.42        | 39.62         | 40.10         | 36.41         | 35.21         | 32.81         | 37.41         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B1       | 50.00            | 36.38        | 43.58          | 61.41        | 49.09        | 43.88        | 45.82        | 41.69         | 38.58         | 32.45         | 28.57         | 27.02         | 25.27         |
| 5#地铁线路南侧 | 8           | B1       | 50.00            | 34.98        | 42.99          | 60.05        | 50.00        | 42.99        | 42.25        | 39.21         | 39.70         | 35.29         | 30.83         | 25.71         | 22.84         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 33.91        | 42.38          | 61.38        | 48.96        | 43.91        | 44.44        | 39.79         | 37.95         | 32.51         | 38.82         | 34.96         | 33.67         |
| 5#地铁线路南侧 | 5           | B1       | 50.00            | 36.09        | 43.37          | 60.92        | 50.71        | 44.36        | 42.84        | 39.27         | 39.62         | 35.84         | 32.33         | 26.58         | 21.43         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B1       | 50.00            | 38.63        | 40.59          | 58.80        | 47.13        | 41.97        | 44.16        | 38.33         | 37.94         | 30.80         | 28.22         | 27.48         | 27.31         |
| 5#地铁线路南侧 | 6           | B1       | 50.00            | 34.84        | 42.72          | 60.99        | 50.76        | 43.17        | 39.81        | 37.47         | 39.02         | 34.79         | 31.73         | 26.81         | 22.53         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B1       | 50.00            | 33.26        | 42.58          | 60.47        | 48.51        | 43.24        | 45.25        | 39.40         | 39.48         | 31.02         | 27.10         | 28.02         | 25.86         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B1       | 50.00            | 39.17        | 42.59          | 59.18        | 49.43        | 41.74        | 43.73        | 39.33         | 38.27         | 34.83         | 32.33         | 30.22         | 25.72         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B1       | 50.00            | 35.41        | 41.90          | 60.76        | 48.27        | 42.79        | 43.54        | 39.11         | 37.30         | 31.72         | 30.81         | 31.97         | 26.67         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B1       | 50.00            | 32.80        | 41.72          | 58.46        | 48.97        | 40.92        | 38.91        | 38.10         | 37.32         | 33.69         | 29.85         | 28.87         | 25.40         |
| 声能均值     | ----        | ----     | ----             | 37.78        | 43.11          | 59.58        | 49.02        | 43.41        | 44.16        | 39.62         | 39.22         | 35.30         | 34.07         | 31.20         | 31.94         |

附表 2-13

5#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据

单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 5#地铁线路南侧 | 8           | B2       | 50.00            | 48.51        | 43.58          | 47.90        | 58.98        | 51.12        | 47.00        | 55.76         | 51.07         | 42.04         | 34.77         | 37.58         | 31.97         |
| 5#地铁线路南侧 | 9           | B2       | 50.00            | 51.54        | 45.42          | 47.97        | 57.93        | 52.00        | 41.95        | 48.43         | 46.32         | 45.28         | 39.98         | 39.93         | 34.33         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 49.67        | 45.27          | 49.91        | 57.95        | 50.03        | 46.84        | 54.48         | 49.15         | 39.96         | 30.49         | 29.08         | 26.17         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 52.69        | 43.05          | 46.33        | 55.10        | 54.24        | 41.47        | 47.29         | 44.78         | 43.21         | 36.70         | 38.12         | 32.30         |
| 5#地铁线路南侧 | 8           | B2       | 50.00            | 49.92        | 43.87          | 48.71        | 60.17        | 49.95        | 46.69        | 55.15         | 50.14         | 41.82         | 33.57         | 32.48         | 30.27         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 53.43        | 46.03          | 48.21        | 56.26        | 50.84        | 42.94        | 48.57         | 46.21         | 44.78         | 37.91         | 39.21         | 34.11         |
| 5#地铁线路南侧 | 9           | B2       | 50.00            | 48.71        | 44.35          | 49.62        | 58.13        | 49.56        | 46.51        | 55.12         | 49.93         | 40.89         | 30.19         | 27.94         | 25.02         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 51.51        | 43.98          | 48.40        | 56.46        | 52.98        | 43.39        | 49.40         | 47.11         | 45.96         | 38.77         | 39.74         | 34.22         |
| 5#地铁线路南侧 | 8           | B2       | 50.00            | 50.58        | 45.60          | 50.95        | 59.79        | 49.85        | 47.88        | 55.86         | 50.23         | 41.66         | 29.83         | 27.86         | 26.30         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 52.06        | 45.33          | 48.87        | 56.55        | 53.10        | 44.71        | 50.63         | 47.33         | 46.49         | 39.43         | 40.11         | 35.88         |
| 5#地铁线路南侧 | 10          | B2       | 50.00            | 49.69        | 45.02          | 50.80        | 59.40        | 51.38        | 47.74        | 55.31         | 49.79         | 40.83         | 34.35         | 31.82         | 31.29         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 50.51        | 42.17          | 46.35        | 56.24        | 54.30        | 41.36        | 46.89         | 45.57         | 43.49         | 37.51         | 38.94         | 34.24         |
| 5#地铁线路南侧 | 9           | B2       | 50.00            | 50.58        | 48.96          | 51.46        | 59.11        | 51.79        | 48.10        | 55.93         | 50.60         | 41.34         | 31.42         | 28.90         | 26.38         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 51.49        | 44.63          | 47.42        | 56.82        | 50.57        | 41.44        | 47.54         | 45.73         | 44.10         | 37.32         | 38.59         | 33.34         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 59.20        | 48.71          | 49.22        | 58.47        | 50.18        | 47.19        | 55.12         | 49.26         | 40.97         | 30.63         | 28.86         | 26.05         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B2       | 50.00            | 62.09        | 44.55          | 47.57        | 56.49        | 51.21        | 41.40        | 47.99         | 46.02         | 44.24         | 37.64         | 38.37         | 33.22         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 49.48        | 45.54          | 50.08        | 58.01        | 50.48        | 46.39        | 54.19         | 48.81         | 40.40         | 30.10         | 27.44         | 25.16         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | B2       | 50.00            | 52.72        | 58.93          | 52.62        | 55.55        | 54.21        | 41.50        | 46.99         | 45.13         | 43.97         | 37.27         | 38.09         | 32.05         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B2       | 50.00            | 49.55        | 44.53          | 50.64        | 58.71        | 50.03        | 47.04        | 54.81         | 49.52         | 40.98         | 31.11         | 29.46         | 27.65         |
| 5#地铁线路南侧 | 13          | B2       | 50.00            | 52.10        | 42.78          | 48.07        | 55.79        | 52.07        | 43.36        | 48.98         | 46.51         | 45.43         | 38.32         | 39.24         | 35.32         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | B2       | 50.00            | 49.17        | 44.72          | 49.98        | 58.95        | 51.07        | 46.89        | 54.83         | 49.70         | 41.13         | 32.02         | 29.15         | 27.77         |



|          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5#地铁线路南侧 | 12    | B2    | 50.00 | 52.73 | 43.97 | 48.16 | 56.33 | 51.97 | 42.25 | 48.16 | 46.09 | 45.00 | 38.39 | 39.64 | 34.71 |
| 5#地铁线路南侧 | 7     | B2    | 50.00 | 53.60 | 48.59 | 49.17 | 60.73 | 50.97 | 47.18 | 55.92 | 50.43 | 41.24 | 33.85 | 32.32 | 30.52 |
| 5#地铁线路南侧 | 12    | B2    | 50.00 | 51.80 | 56.57 | 50.24 | 56.04 | 53.65 | 41.53 | 47.68 | 45.82 | 44.07 | 37.40 | 37.99 | 32.47 |
| 5#地铁线路南侧 | 10    | B2    | 50.00 | 49.28 | 45.70 | 50.23 | 58.66 | 49.94 | 47.39 | 55.72 | 50.43 | 42.37 | 35.93 | 34.63 | 34.29 |
| 5#地铁线路南侧 | 10    | B2    | 50.00 | 54.99 | 45.29 | 47.74 | 56.40 | 51.15 | 41.60 | 47.70 | 45.86 | 43.94 | 37.30 | 38.16 | 32.56 |
| 5#地铁线路南侧 | 12    | B2    | 50.00 | 49.58 | 45.10 | 49.90 | 58.05 | 49.66 | 46.66 | 54.94 | 49.11 | 40.78 | 30.55 | 29.31 | 26.94 |
| 声能均值     | ----- | ----- | ----- | 53.38 | 48.92 | 49.39 | 57.93 | 51.68 | 45.45 | 53.15 | 48.48 | 43.25 | 36.06 | 36.60 | 32.10 |

附表 2-14

5#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 单位: dB

| 地点       | 持续时间<br>(s) | 测点<br>楼层 | 特征频<br>率<br>(Hz) | LZeq<br>25Hz | LZeq<br>31.5Hz | LZeq<br>40Hz | LZeq<br>50Hz | LZeq<br>63Hz | LZeq<br>80Hz | LZeq<br>100Hz | LZeq<br>125Hz | LZeq<br>160Hz | LZeq<br>200Hz | LZeq<br>250Hz | LZeq<br>315Hz |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 5#地铁线路南侧 | 13          | F1       | 63.00            | 53.26        | 49.01          | 43.08        | 53.16        | 54.47        | 40.40        | 36.35         | 37.62         | 35.42         | 29.75         | 28.94         | 24.63         |
| 5#地铁线路南侧 | 9           | F1       | 63.00            | 53.72        | 54.69          | 51.66        | 53.90        | 53.28        | 38.43        | 37.20         | 34.56         | 34.21         | 29.93         | 24.56         | 22.03         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 53.49        | 51.09          | 44.50        | 53.27        | 54.80        | 41.12        | 37.85         | 34.81         | 31.85         | 30.37         | 27.36         | 30.20         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | F1       | 63.00            | 53.72        | 54.04          | 50.70        | 53.69        | 54.39        | 40.31        | 38.14         | 35.55         | 35.57         | 32.53         | 26.81         | 28.30         |
| 5#地铁线路南侧 | 9           | F1       | 63.00            | 54.11        | 52.04          | 45.22        | 53.18        | 54.39        | 41.13        | 36.92         | 34.79         | 30.97         | 27.98         | 23.41         | 21.18         |
| 5#地铁线路南侧 | 7           | F1       | 63.00            | 54.80        | 57.46          | 52.88        | 55.89        | 56.98        | 40.16        | 38.30         | 36.28         | 35.90         | 32.04         | 27.72         | 26.08         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 54.01        | 51.62          | 45.38        | 54.22        | 55.32        | 41.46        | 37.54         | 34.88         | 33.56         | 33.50         | 29.53         | 30.73         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 52.83        | 53.37          | 48.32        | 52.85        | 53.62        | 37.63        | 36.99         | 34.73         | 34.45         | 31.81         | 26.36         | 24.92         |
| 5#地铁线路南侧 | 15          | F1       | 63.00            | 55.68        | 53.45          | 47.80        | 54.37        | 55.64        | 40.79        | 36.59         | 33.57         | 31.62         | 28.44         | 22.85         | 20.31         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 53.31        | 55.52          | 50.82        | 53.60        | 53.72        | 37.35        | 36.28         | 34.38         | 34.45         | 32.72         | 26.19         | 23.72         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 54.63        | 52.27          | 45.28        | 53.82        | 54.94        | 41.29        | 36.76         | 34.25         | 31.23         | 26.98         | 22.88         | 21.13         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 53.62        | 54.41          | 50.31        | 53.08        | 53.02        | 37.28        | 35.93         | 34.43         | 33.68         | 28.93         | 24.32         | 20.88         |
| 5#地铁线路南侧 | 11          | F1       | 63.00            | 54.55        | 52.95          | 45.77        | 54.99        | 54.62        | 40.89        | 36.24         | 34.25         | 30.94         | 26.66         | 21.75         | 20.96         |
| 5#地铁线路南侧 | 12          | F1       | 63.00            | 52.65        | 53.97          | 48.43        | 53.25        | 53.14        | 36.97        | 35.55         | 33.63         | 33.89         | 31.70         | 26.22         | 23.67         |



|          |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 53.91 | 52.42 | 45.01 | 53.97 | 55.14 | 41.29 | 36.31 | 33.23 | 31.10 | 28.10 | 23.89 | 20.62 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 54.56 | 54.64 | 51.23 | 53.05 | 54.70 | 38.16 | 36.41 | 36.38 | 35.64 | 32.54 | 26.93 | 25.20 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 54.70 | 53.58 | 45.61 | 54.36 | 55.50 | 41.06 | 37.78 | 35.06 | 32.81 | 29.62 | 24.04 | 23.92 |
| 5#地铁线路南侧 | 12   | F1   | 63.00 | 53.09 | 55.13 | 51.30 | 53.11 | 54.43 | 38.33 | 36.41 | 34.93 | 33.77 | 30.28 | 24.51 | 22.93 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 53.25 | 51.47 | 43.74 | 53.52 | 55.52 | 41.25 | 36.92 | 36.18 | 32.48 | 31.03 | 26.52 | 24.53 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 53.25 | 55.98 | 51.11 | 53.89 | 54.03 | 38.13 | 37.05 | 34.59 | 33.36 | 29.41 | 24.43 | 23.09 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 54.08 | 53.48 | 45.61 | 53.77 | 55.68 | 41.68 | 37.27 | 33.71 | 32.00 | 28.97 | 25.26 | 25.91 |
| 5#地铁线路南侧 | 10   | F1   | 63.00 | 54.65 | 56.30 | 51.41 | 53.55 | 54.43 | 38.62 | 37.68 | 35.45 | 34.88 | 34.73 | 26.76 | 25.96 |
| 5#地铁线路南侧 | 11   | F1   | 63.00 | 53.80 | 53.85 | 45.51 | 52.76 | 54.38 | 41.14 | 36.98 | 34.48 | 32.49 | 30.28 | 27.46 | 28.15 |
| 5#地铁线路南侧 | 10   | F1   | 63.00 | 53.66 | 56.42 | 51.50 | 53.90 | 54.38 | 38.41 | 37.68 | 35.54 | 34.70 | 31.52 | 26.97 | 28.87 |
| 声能均值     | ---- | ---- | ----  | 53.95 | 54.12 | 49.01 | 53.77 | 54.70 | 39.99 | 37.02 | 35.01 | 33.65 | 30.88 | 26.08 | 25.61 |

附表 2-15

| 6#地铁线路 1/3 倍频程监测原始数据 |          |      |           |           |             |           |           |           |           |            |            |            | 单位: dB     |            |            |
|----------------------|----------|------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 地点                   | 持续时间 (s) | 测点楼层 | 特征频率 (Hz) | LZeq 25Hz | LZeq 31.5Hz | LZeq 40Hz | LZeq 50Hz | LZeq 63Hz | LZeq 80Hz | LZeq 100Hz | LZeq 125Hz | LZeq 160Hz | LZeq 200Hz | LZeq 250Hz | LZeq 315Hz |
| 6#地铁线路西侧             | 11       | B1   | 63.00     | 69.05     | 61.69       | 64.16     | 68.33     | 72.95     | 70.38     | 64.82      | 70.87      | 69.63      | 68.61      | 67.15      | 66.92      |
| 6#地铁线路西侧             | 9        | B1   | 63.00     | 69.46     | 59.74       | 60.84     | 62.29     | 61.54     | 61.85     | 61.17      | 63.30      | 62.92      | 61.37      | 59.67      | 59.64      |
| 6#地铁线路西侧             | 10       | B1   | 63.00     | 68.50     | 63.18       | 64.24     | 65.66     | 72.58     | 70.19     | 65.44      | 70.96      | 69.40      | 68.88      | 67.56      | 67.27      |
| 6#地铁线路西侧             | 10       | B1   | 63.00     | 69.45     | 60.20       | 61.83     | 61.31     | 62.68     | 62.82     | 60.94      | 64.15      | 61.95      | 62.18      | 61.50      | 60.32      |
| 6#地铁线路西侧             | 11       | B1   | 63.00     | 68.24     | 62.51       | 66.37     | 68.87     | 72.37     | 66.68     | 64.05      | 70.69      | 68.40      | 67.58      | 66.52      | 66.68      |
| 6#地铁线路西侧             | 10       | B1   | 63.00     | 68.86     | 59.59       | 62.20     | 61.64     | 62.84     | 62.35     | 62.59      | 64.79      | 63.66      | 61.53      | 59.32      | 58.13      |
| 声能均值                 | ----     | ---- | ----      | 68.93     | 61.42       | 63.77     | 65.93     | 70.18     | 67.27     | 63.56      | 68.80      | 67.19      | 66.34      | 65.02      | 64.79      |