

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.021

## 地铁引起二次噪声特性及评价量实测与探讨

申道明<sup>1,2</sup>, 张来栋<sup>3</sup>, 薛松涛<sup>2,4</sup>

(1. 新乡学院 土木工程与建筑系, 河南 新乡 453000; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;  
3. 新乡职业技术学院 建筑工程系, 河南 新乡 453000; 4. 日本东北工业大学 建筑学科, 日本 仙台 982-8577)

**摘要:**针对地铁列车引起的建筑物二次辐射噪声进行了现场试验研究和评价量的探讨分析。从多个角度对试验数据进行了分析,总结了运行列车引起的室内二次辐射噪声特性。从分析频谱宽度、分析时间长度和背景噪声等几个方面研究了影响建筑物室内二次辐射噪声评价量的若干因素,并探讨了不同评价量之间的相关性以及中国现行标准中使用的评价量存在的不足。

**关键词:**二次辐射噪声; 1/3 倍频程; 主频分布; 评价量

**中图分类号:** TB53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0133-06

## Experimental Investigation on Characteristics and Evaluation Indexes of Ground-borne Noise Induced by Subway

Shen Daoming<sup>1,2</sup>, Zhang Laidong<sup>3</sup>, Xue Songtao<sup>2,4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 453000 Henan, P. R. China;  
2. Reserch Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;  
3. Department of Architecture engineering, Xinxiang Polytechnic Collgeg, Xinxiang 453000 Henan, P. R. China;  
4. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, 982-8577, Janpan)

**Abstract:** In-situ experiments and investigation of evaluation indexes were performed to study the subway-induced ground-borne noise in buildings along the subway lines. The characteristics of ground-borne noise in buildings were summarized from various aspects by analyzing the experimental data. The factors such as the spectrum width, the analyzing time and background noise effect on the results of evaluation indexes, were further investigated. The correlation between different evaluation indexes was analyzed, and the deficiencies of the indexes of noise evaluation in the environmental noise control codes of China were discussed.

**Key words:** ground-borne noise; 1/3 octave band; principal frequencies distribution; evaluation indexes

地铁运营引起的临近建筑物内的二次辐射噪声已经成为噪声扰民的主要因素之一。有效的认识建筑物内的二次辐射噪声的特性是采取有效措施治理地铁引起室内二次辐射噪声的先决条件。目前国际上绝大多数关于噪声特性及噪声评价的研究是针对空气传播的噪声<sup>[1-4]</sup>,轨道列车引起二次辐射噪声的研究相对较少<sup>[5-6]</sup>,储益萍<sup>[7]</sup>对地铁引起的室内振动

与二次辐射噪声相关性进行了分析,杨碧君等<sup>[8]</sup>通过主观评价试验对地铁引起的室内噪声烦恼度评价量计权因子进行了修正。从各国现有的地铁引起二次辐射噪声的定义的范围看,对于二次辐射噪声频率范围的认定并不统一,欧洲大多数国家并没有明确提出地铁引起二次辐射噪声频率范围,而是根据等响曲线最小听力阈值来确定低频噪声的范围。德

收稿日期:2013-01-05

基金项目:河南省科技攻关项目(122102210139)

作者简介:申道明(1971-),男,博士,主要从事轨道交通振动与噪声研究,(E-mail)shendaoming@163.com。

国定义的低频噪声的频率范围主要根据其国家标准 DIN 45680 所定义低频噪声最小听力阈值作为基准, DIN 45680 定义的低频噪声的频率范围为 10~80 Hz, 它主要考虑了社会生活产生的噪声频率范围, 日本定义的低频噪声频率范围与德国相同; 瑞典的低频噪声频率范围定义为 31.5~200 Hz, 丹麦的低频噪声频率范围定义 10~160 Hz, 美国公共交通协会快速轨道交通设备设计(TPTA 指南)、美国联邦交通管理局<sup>[9]</sup>评价轨道交通与列车引起二次辐射噪声没有明确指出评价的频率范围, 在 ISO 14837-1:2005《机械振动—由轨道系统引起的二次辐射噪声和振动》<sup>[10]</sup>第 1 部分一般指南认为引起建筑物的二次辐射噪声在 16~250 Hz。中国现行标准对地铁运行引起的室内二次辐射噪声频率范围的规定差别也很大, 台湾没有专门规定轨道交通引起二次噪声的频率范围, 但是定义低频噪声的频率范围定义 20~200 Hz, JGJ/T 170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》中规定地铁引起的二次辐射噪声的频率为 16~200 Hz, 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》、HJ 453-2008《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》认为引起室内二次辐射噪声的频率范围为 20~20 kHz。

对于评价低频噪声采用的评价指标, 各国的标准也是不统一的。德国、日本、瑞典采用分频多值的评价指标。美国公共交通协会快速轨道交通设备设计(TPTA 指南)、美国联邦交通管理局及 ISO 14837-1:2005 关于轨道交通与列车引起二次辐射噪声采用的评价量为列车经过时室内的慢挡最大噪声级(记为  $L_{A_{\max}}$ ); 瑞典 Boverket 铁路管理局、丹麦环境保护机构、世界卫生组织、JGJ/T 170-2009、DB31/T470-2009 均推荐使用等效声级及快挡最大声级(记为  $L_{A_{\max}}$ )作为评价量。

建筑物内二次辐射噪声与地铁列车振动传播的诸多影响因素有关, 研究结果表明<sup>[11-14]</sup>: 影响地铁列车振动传播的影响因素包括地铁车辆条件、轨道线路状况、地基地质条件、建筑物距地铁线路距离、建筑物特性等, 其中影响建筑物内的二次结构噪声的建筑物特性与建筑物整体质量刚度、地板质量刚度、质量分布、材料阻尼、地板和墙壁尺寸、建筑物内表面吸声条件、二次辐射噪声效率等参数有关, 使二次辐射噪声的研究比空气噪声复杂的多, 导致数值计算地铁引起的室内二次辐射噪声非常困难。因此实

测成为解决二次辐射噪声问题的一个非常重要的手段。通过对地铁中心线 30 m 以内的居民住宅室内二次辐射噪声进行现场实测并分析其基本特性。对室内噪声信号的分析工作主要包括: 实测噪声 A 声级与 C 声级的分布; 室内二次辐射噪声主要分布的频率范围; 不同的评价量对实测结果的影响及不同评价量之间的相关性, 中国现行标准中使用的评价量存在的不足。通过以上的的工作, 将有助于认识地铁运行引起的室内二次噪声的特性, 为降低室内二次辐射噪声的影响、采取相对应得措施及将来标准的修订提供有益的建议和帮助。

## 1 地铁引起建筑物二次辐射噪声的实测介绍

测试主要在上海地铁地下线附近的居民住宅中进行, 在测量前关闭好门窗, 一般选择在卧室或者客厅内进行测量。为了避免室内一阶驻波对测量信号的影响, 测量位置一般选在离墙壁 1.5 m 处, 声传感器离地板的高度控制在 1.2~1.5 m。在测量时室内保持安静, 关闭电冰箱、风扇等产生噪声的声源, 避免人为噪声及其他噪声对测量信号的干扰。噪声实测使用 SQLab II 数据采集系统, GR. A. S40AE 声传感器及 26CA 前置放大器。采样频率选为 44 kHz, 因为采样的频率较高, 数据存储量较大, 为了节约空间, 每次测量时间定为 2 min。按照 GB 3096-2008 中规定的测量方法进行测量, 数据采集系统直接记录室内声场的声压时程。

## 2 数据分析

### 2.1 室内噪声的频率范围判断

要分析地铁运行引起的建筑物室内二次辐射噪声的特性, 首先必须对地铁列车运行产生的室内噪声的频率的分布进行分析。根据德国 DIN 45680 提出的以  $L_{C_{eq}} - L_{A_{eq}} > 20$  dB 作为有无低频噪声判定依据, 将所测得的资料进一步整理分析, 对测得的数据结果计算列车经过时段的 16~20 kHz 频段范围等效 A 声级  $L_{A_{eq}}$  (记为  $L_{A_{eq}20k}$ )、16~20 kHz 频段范围的等效 C 声级  $L_{C_{eq}}$  (记为  $L_{C_{eq}20k}$ ) 以及  $L_{C_{eq}20k} - L_{A_{eq}20k}$  的值并进行统计分析, 相关统计结果如图 1、图 2 所示。

从图 1 中可以看出,  $L_{A_{eq}20k}$  分布比较集中, 主要分布在 34~43 dB 之间; 而  $L_{C_{eq}20k}$  分布则比较分散, 主要分布在 50~67 dB 之间。实测统计结果(图 2)显示, 近 90% 以上的测试结果满足  $L_{C_{eq}, 20k} - L_{A_{eq}20k}$

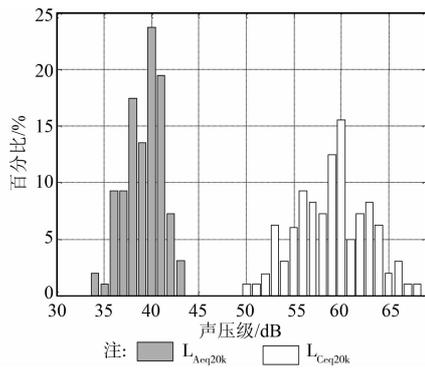


图 1  $L_{Aeq20k}$  与  $L_{Ceq20k}$  统计分布图

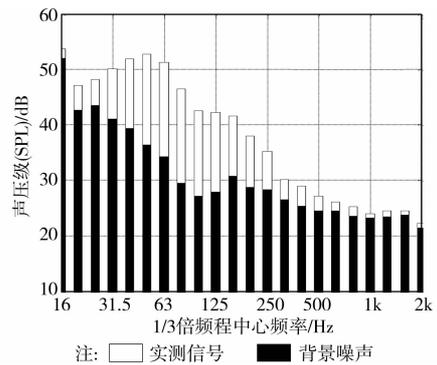


图 3 实测二次辐射噪声与背景噪声 1/3 倍频程图

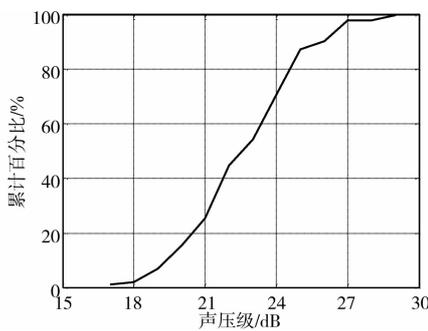


图 2  $L_{Aeq20k} - L_{Ceq20k}$  累计百分比

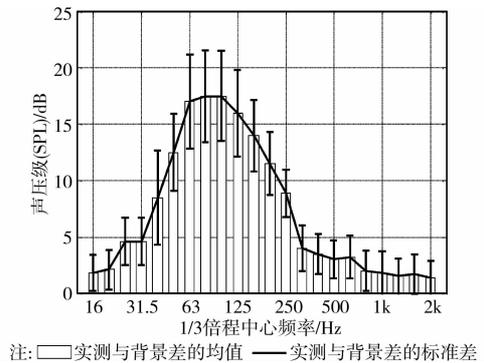


图 4 实测值与背景噪声之差分布

$\geq 20$  dB, 虽与德国 DIN 建议的 20 dB 以及荷兰调查结果略有不同, 可能的原因是测量时间都在白天, 加上居住人口密度及建筑物座落型态 (例如邻近马路、和营业场所为邻、建筑物相毗连) 等, 都会造成环境背景噪声声级较高, 和欧洲背景噪声较低不尽相同。现场测试结果统计分析说明地铁引起的室内二次辐射噪声具有明显的低频特性。

### 2.2 地铁运行引起的室内二次辐射噪声的主频分布

为了得到地铁运行引起的室内二次辐射噪声的主频分布, 对实测室内噪声数据结果进行统计分析, 计算出列车经过时段的实测信号的每个 1/3 倍频程中心频率对应的声压级的均值并及方差, 同时计算出对应的背景噪声的声压级的均值并及方差。

图 3 是一典型的实测二次噪声与背景噪声 1/3 倍频程图, 从图 3 我们可以看出, 在高频段 (1 000 Hz 以上) 两者基本重合, 这说明在这个频段范围实测信号主要是由于背景噪声引起, 二次辐射噪声对于信号的影响完全可以忽略不计。

实测二次噪声与背景噪声两者 1/3 倍频程之差的统计结果如图 4 所示, 从图 4 中可以看到, 在 25~250 Hz 之间, 实测信号声压级与背景噪声的声压级绝大多数都大于 6 dB 以上, 这说明在这个频率段内实测信号主要是二次辐射噪声, 背景噪声对于实测信号的影响很小。实测信号声压级的标准差较大,

这时因为测量的敏感点离隧道中心线的位置不同, 二次辐射噪声的大小相差较大。在 315~500 Hz 频段内, 实测信号的声压级比背景噪声的声压级高 3 dB 左右, 说明在这个频段上背景噪声的声压级与二次辐射噪声的声压级相接近, 二次噪声的声压级应该是实测信号的声压级减去 3 dB 以后的结果; 在 500 Hz 以上的频段, 背景噪声与实测信号的声压级相差全部在 2 dB 以内, 该频段内的二次噪声的声压级应该是实测信号的声压级减去 6 dB。正如 Schaudinisichky<sup>[15]</sup> 指出, 若噪声的能量集中在低频的部分, 采用 A 声级进行测量不能充分显示出噪声的低频部分。因为背景噪声通常是高频成分较大, 所以分析室内二次辐射噪声的特性时, 必须消除背景噪声对实测信号的干扰。根据两种声源引起声压修正公式  $D = 10 \log_{10} (1 + 10^{0.1 \times (L_2 - L_1)})$  对实测信号进行修正。

为了分析不同频段声压级对 A 声级的贡献率, 根据 A 声级的计算方法:

$$L_a = 10 \times \log_{10} \left( \sum_{i=1}^n 10^{(L_{ai} + W_{ai})/10} \right) \quad (1)$$

其中:  $L_a$  表示所有频段的 A 声级,  $L_{ai}$  表示第  $i$  个中心频率上的声压级,  $W_{ai}$  表示第  $i$  个中心频率上的 A 声级计权因子,  $n$  表示需要计算的中心频率的

数量。

由式(1)可以得出第  $i$  个中心频率上的声压级  $L_{ai}$  对于  $L_a$  的贡献值  $C$  为:

$$C = \frac{10^{(L_{ai}+W_{ai})/10}}{\sum_{i=1}^n 10^{(L_{ai}+W_{ai})/10}} \times 100\% \quad (2)$$

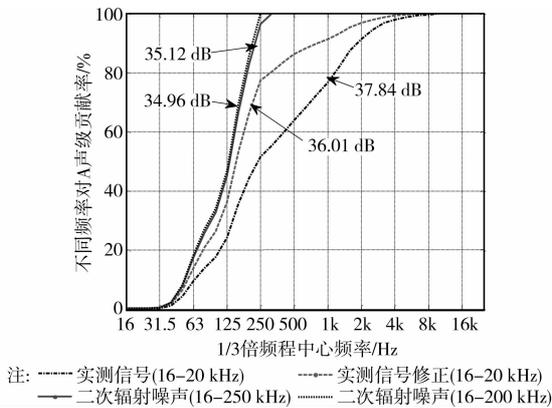


图 5 不同频段声压级对 A 声级的贡献率

从图 5 中可以看到,在实测信号(图中点划线所示)中,由于包含了背景噪声,250 Hz 以下频段上对 A 声级的贡献值都在 50% 左右,这时计算得到的 A 声级  $L_{Aeq20k}$  为 37.84 dB。根据背景噪声在不同频段上的声压级大小,对实测信号进行修正得到近似的室内二次噪声(图中虚线所示),近似的室内二次噪声的 250 Hz 频段上的贡献值在 80% 左右,二次辐射噪声的 A 声级主要是 250 Hz 以下的贡献的,这时计算的 A 声级为 36.01 dB。可见,测量信号中的高频成分对于二次辐射噪声 A 声级的影响比较大。

使用 250 Hz 以下声压级直接计算二次辐射噪声,这时得到的 A 声级  $L_{Aeq250}$  为 35.12 dB,与修正的二次辐射噪声的 A 声级仅差 0.89 dB,与真实的室内二次辐射噪声的 A 声级相差更小;使用 200 Hz 以下声压级直接计算二次辐射噪声,这时得到的 A 声级为 34.96 dB,与  $L_{Aeq250}$  相差 0.18 dB,因此,使用 16~250 Hz 频率段的 A 声级来评价地铁运行引起的室内二次辐射噪声的大小是比较准确的,可以认为地铁运行引起室内二次辐射噪声的主要频段在 16~250 Hz 范围内。

## 2.3 地铁运行引起的室内二次辐射噪声的评价量分析

2.3.1 实测信号与分频限值的比较 采用分频段限值的标准主要有德国国家标准 DIN45680、荷兰、日本、瑞典以及德国白天的低频噪声的限值,把实测的室内噪声的 1/3 倍频带的结果与采用分频段限值的国家标准进行了比较。图 6 给出与隧道中心

线不同距离的测点实测结果与各国分频限值的比较。图中圆圈表示距离隧道中心线不同位置处室内二次辐射噪声 1/3 倍频程结果。

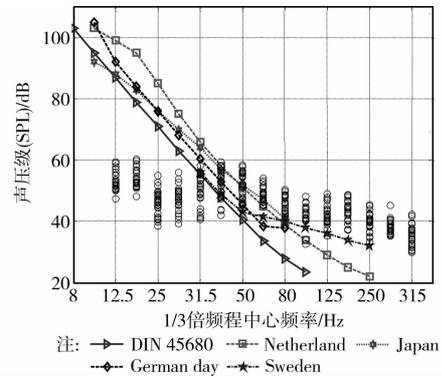


图 6 实测结果与各国分频限值的比较(1/3 倍频程)

从图 6 中可以看出在 31.5 Hz 以下的大多未超过各国的标准限值,但是在 31.5 Hz 以上的各频段内基本上都超过了其他各国的标准,这是由于欧洲国家和日本的标准主要低频噪声,而且对环境的要求较高。因此,对于中国目前的室内二次噪声现状来说,分频限值的评价方法存在一定的不足。

2.3.2 实测结果与单值计权结果的比较 从前面的分析可以看出,评价量  $L_{Aeq250}$  分析频段在 16~250 Hz,主要反映列车经过时引起的室内二次噪声的大小,它受到的外界条件干扰最小,是比较准确结果的一种评价量。在我国住房和城乡建设部发布的 JGJ/T 170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》中规定使用等效 A 声级来评价室内二次辐射噪声,该标准定义的等效 A 声级为:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{AE,i}} \quad (3)$$

但是该标准并未明确指出  $L_{AE,i}$  是第  $i$  列列车经过时的等效 A 声级,也未明确规定等效的时间长度。由于评价频率段在 16~200 Hz,如果  $L_{AE,i}$  是列车经过时段(约 10 s)的等效声级,根据 JGJ/T 170-2009 计算的  $L_{Aeq200}$  分析的频率范围为 16~200 Hz,地铁引起的临近建筑物室内二次辐射噪声的最大值一般在 150 Hz 以内,它包含在 200 Hz 以内,二者相差很小,说明对于地铁引起室内噪声来说,二者基本上是等价的。如果  $L_{AE,i}$  是包括列车经过间隔时段(约 2 min)的等效声级,与 16~250 Hz 范围内 2 min 等效声级(包括背景噪声)  $L_{Aeq250,2m}$  的值相近。

评价量  $L_{Aeq250,2m}$  为包含 110 s 背景噪声及列车经过时段(大约 10 s)的室内二次噪声的 16~250 Hz 范围内的等效声级,背景时间较长,背景对于

该评价量的影响较大。该评价量得出的结果主要反映了列车经过时低频背景噪声的水平,只有在背景噪声与列车经过引起的室内噪声相差非常明显的情况下,才能够反映出列车经过时室内二次辐射噪声的大小。

HJ 453—2008《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》中对于室内二次辐射噪声影响评价是根据 GBJ 118《民用建筑隔声设计规范》的规定,在 GBJ 118—88 中规定室内噪声的测量在开窗的条件下进行测量,用慢挡读 A 声级,取指针的中间值,并记录 0.5 h 内噪声的间隔时间,计算出该噪声所占的时间比例,按噪声特性不同与间歇时间对测量结果进行修正。住房和城乡建设部发布了 GB 50118—2010《民用建筑隔声设计规范》,废除了 GBJ 118—88,该标准指出对于室内噪声应在关窗的条件下进行,对于间歇性非稳态噪声,应测量噪声源密集发声时 20 min 的等效[连续 A 计权]声级。上海市质量技术监督局在 2009 发布了 DB31/T 470—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》,该标准规定室内噪声昼间的评价指标为列车通过时不小于 20 min 的 20~20 kHz 等效声级,夜间使用 20~20 kHz 等效声级和最大声级。考虑到上海地铁的实际运营情况及未来的发展,在高峰时段 2 min 内通过一对列车,这样 HJ 453—2008 与 DB31/T 470—2009 规定的 20 min 的 20~20 kHz 等效声级就可以等效为在 2 min 内通过一辆列车的等效声级(记为  $L_{Aeq20k,2m}$ ),评价量  $L_{Aeq20k,2m}$  背景时间较长,背景对于该评价量的影响很大。这是因为实测时得到的背景噪声的高频成分占的权值较大,导致在评价地铁运行引起室内噪声所占的权值比例很小,噪声的高频成分掩盖了低频成分的对总声级的贡献。因此对于地铁运行引起的建筑物室内噪声来说,使  $L_{Aeq20k,2m}$  来评价地铁运行引起的建筑物室内噪声受背景噪声的影响非常大,导致评价与实际情况偏差较大。

美国公共交通协会快速轨道交通设备设计(TPTA 指南)、美国联邦交通管理局关于轨道交通与列车引起二次辐射噪声采用的评价量为列车经过时室内的慢挡最大噪声级,瑞典 Boverket 铁路管理局、丹麦环境保护机构、世界卫生组织与 DB31/T 470—2009 夜间使用快挡的最大声级。

作为地铁列车经过时的最大声级  $L_{Amax}$  受到背景噪声及高频成分的影响外,还容易受到突发噪声及其他不确定因素的影响。当  $L_{Amax}$  作为列车经过时室内噪声的评价量时,应该选取背景噪声较低的

时间段、进行多次测量,取其平均值来消除背景噪声及突发噪声对测量结果的影响。表 1 给出了某居民楼内不同评价量下噪声实测结果。

从表 1 中可以看出  $L_{Aeq250}$  比  $L_{Aeq250,2m}$  高 7~10 dB,  $L_{Aeq20k}$  比  $L_{Aeq20k,2m}$  高 6~12 dB,说明考虑 20 min 内等效的评价量要比仅考虑列车经过时段的评价量低 6~12 dB,20 min 内等效的评价量主要反映了该测量点的背景噪声的大小,  $L_{Asmax}$  比  $L_{Afmmax}$  小 2 dB 左右,说明突发噪声对  $L_{Afmmax}$  的影响很大。

表 1 不同评价量计算结果比较

$L_{Aeq250}$	$L_{Aeq250,2m}$	$L_{Aeq20k}$	$L_{Aeq20k,2m}$	$L_{Afmmax}$	$L_{Asmax}$
45.55	35.25	46.63	38.18	49.40	47.29
43.54	33.29	45.84	37.53	49.03	47.04
41.55	33.80	42.69	36.66	47.12	45.90
41.70	33.06	43.15	37.16	47.57	45.60
44.02	34.53	45.44	37.85	49.33	47.50
44.87	35.56	46.77	37.82	49.58	48.23
44.74	34.26	45.00	35.41	49.35	47.41
44.92	34.41	45.24	35.45	49.79	47.84
44.02	33.97	45.38	35.15	51.47	48.86
44.71	34.19	46.96	37.44	48.74	48.65

#### 2.4 几种评价量之间的相关性分析

进行不同评价量之间的相关性分析的目的在于通过比较能够得到确切反映地铁运行引起室内二次辐射噪声的评价量和相应的计算方法。

表 2 评价量之间的相关性分析

评价量	$L_{Aeq250}$	$L_{Aeq250,2m}$	$L_{Aeq20k}$	$L_{Aeq20k,2m}$	$L_{Afmmax}$	$L_{Asmax}$
$L_{Aeq250}$	—	0.820 1	0.749 4	0.293 8	0.626 8	0.748 2
$L_{Aeq250,2m}$	0.820 1	—	0.601 8	0.683 9	0.208 9	0.487 5
$L_{Aeq20k}$	0.749 4	0.601 8	—	0.408 1	0.604 4	0.755 8
$L_{Aeq20k,2m}$	0.293 8	0.683 9	0.408 1	—	0.358 5	0.344 8
$L_{Afmmax}$	0.626 8	0.280 9	0.604 4	0.358 5	—	0.838 7
$L_{Asmax}$	0.748 2	0.487 5	0.755 8	0.344 8	0.838 7	—

从表 2 中可以看出,  $L_{Afmmax}$  与  $L_{Asmax}$  的相关性最大,为 0.838 7,说明使用快挡和慢挡计算  $L_{Amax}$  的差别不大。  $L_{Aeq20k,2m}$  与  $L_{Aeq250}$  的相关性最小,为 0.293 8,这说明背景噪声的高频成分对各评价量之间的相关性影响很大,  $L_{Afmmax}$ 、 $L_{Asmax}$  与  $L_{Aeq250}$  的相关性低于  $L_{Aeq250}$  与  $L_{Aeq20k}$  的相关性,说明  $L_{Afmmax}$ 、 $L_{Asmax}$  比  $L_{Aeq20k}$  更容易受到突发噪声的影响。因此,对于地铁引起的室内二次噪声来说,由于背景噪声高频成分对于真实的二次噪声影响很大,应采用 16~250 Hz 范围

的等效声级  $L_{Aeq250}$  或者 16~250 Hz 范围内的最大声级,不宜采用全频段的等效声级或者最大声级作为评价指标。

## 4 结 论

通过对地铁运营引起的室内二次辐射噪声特性实测结果的分析,可以得出以下结论:对于地铁引起室内二次辐射噪声来说,90%左右的测点其  $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20$  dB,说明地铁引起的室内二次辐射噪声是低频噪声;地铁运行引起室内二次辐射噪声的主要频段在 16~250 Hz 范围内;使用 16~250 Hz 频率段的 A 声级来评价地铁运行引起的室内二次辐射噪声的大小是比较准确的;对于地铁引起的室内二次噪声来说,由于背景噪声高频成分对于真实的二次噪声影响很大,应采用 16~250 Hz 范围的等效声级  $L_{Aeq250}$  或者 16~250 Hz 范围内的最大声级,不宜采用全频段的等效声级或者最大声级作为评价指标。

### 参考文献:

- [1] Ryota S, Yoshiharu S. Characteristics of train noise in above-ground and underground stations with side and island platforms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8):1621-1633
- [2] 张海滨, 蒋伟康, 万泉. 城市轨道交通列车噪声辐射特性的试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11), 83-86.  
Zhang H B, Jiang W K, Wan Q. Experimental investigation on noise radiation characteristics of an urban transit train at moderate and low speeds [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11), 83-86.
- [3] 周灿平. 城市轨道交通噪声评价方法及其限值的研究 [J]. 中国环境监测, 2009, 25(4): 91-94.  
Zhou C P. Study on the method of evaluation and its limited value on environment influence to noise caused by urban railway traffic [J]. Environmental Monitoring of China, 2009, 25(4): 91-94.
- [4] Afeni T B, Osasan S K. Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine—A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19 :420-424.
- [5] Hood R A R. The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnel [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 215-225.
- [6] Andreas Eitzenberger. Train-induced vibrations in tunnels -A review (technical report) [R], 2008
- [7] 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(4):85-88.  
Chu Y P. Measurement and correlation analysis of ground-borne vibration and noise induced by underground railway [J]. Noise and Vibration Control, 2011(4):85-88.
- [8] 杨碧君, 张硕, 刘加华等. 地铁运行引起室内结构噪声的评价指标研究[J]. 声学技术, 2010, 29(6):264-265.  
Yang B J, Zhang S, Liu J H, et al. Study on the evaluation index of structure borne noise induced by underground railway operations [J]. Technical Acoustics, 2010, 29(6):264-265.
- [9] FTA. Report number: FTA-VA-90-1003-06, Transit noise and vibration impact assessment [R]. 2006.
- [10] SS-ISO 14837-1. Mechanical vibration- Ground-borne noise and vibration arising from rail systems- Part 1: General guidance [R]. 2005.
- [11] Gupta S, Degrande G, Lombaert G. Experimental validation of a numerical model for subway induced vibrations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321:786-812.
- [12] Kurzweil L G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3):363-370.
- [13] Nagy A B, Fiala P, Marki F F, et al. Prediction of interior noise in buildings, generated by underground rail traffic [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(35):680-690.
- [14] Fiala P, Degrande G, Augusztinovicz F. Numerical modeling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301:718-738.
- [15] L. H. 肖丁尼斯基, 声音·人·建筑[M]. 林达悃、李冲理, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

(编辑 胡 玲)