

地铁运行引起室内二次辐射噪声烦恼度阈值分析

申道明^{1,*} 唐和生^{1,2} 胡长远¹ 薛松涛^{1,3}

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 日本东北工业大学 建筑学科, 日本 仙台 982-8577)

摘要 通过对临近地铁居民现场问卷调查及住宅内进行的室内二次辐射噪声实测结果统计, 分析了不同因素对地铁引起室内二次辐射噪声对居民生活的影响。探讨了在不同噪声评价量下, 地铁引起室内二次辐射噪声的声压级随楼层及距离的衰减。根据室内噪声的实测结果与居民对室内噪声的烦恼度反应, 计算了现行标准中室内噪声的不同评价量的烦恼度阈值, 为今后更加深入和全面地研究地铁引起的二次辐射噪声烦恼度及其评价标准问题提供了基础资料。

关键词 地铁, 二次辐射噪声, 评价量, 问卷调查, 烦恼度阈值

Analysis on Annoying Threshold of Subway Induced Ground-borne Noise in Buildings

SHEN Daoming^{1,*} TANG Hesheng^{1,2} HU Changyuan¹ XUE Songtao^{1,3}

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji university, Shanghai 20092, China;
2. State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract Through statistical analyses on questionnaire and in-situ measure results of ground-borne noise in buildings caused by subway, effects on living condition of inhabitants under different factors were studied. Attenuation between sound pressure level of ground-borne noise and floor and distance from the tunnel center line was discussed. Based on measurement results and reaction of annoyance for inhabitant to ground-borne noise, the annoying threshold to different assessment value in current standard of ground-borne noise were calculated. It is the basis for ground-borne noise annoyance research and its evaluation criterion.

Keywords subway, ground-borne noise, assessment value, questionnaire, annoying threshold

随着城市轨道交通的快速发展, 地铁引起建筑物室内二次辐射噪声已经成为轨道交通管理部门面临的一个主要的环境问题, 地铁沿线居民对于二次辐射噪声影响的投诉也不断地增加。合理地评价二次辐射噪声对临近建筑物内居民生活的影响程度是采取治理二次辐射噪声有效措施的基础。目前国际上绝大多数关于轨道交通引起的噪声烦恼度调查是针对空气传播的噪声^[1,2], 空气传播的噪声主要集中在中高频段, Yano T. 等^[3]用相同的尺度比较铁路与道路交通噪声之间的剂量反应关系, 讨论 4 种范畴尺度在烦恼反应中的影

响, 得到铁路噪声公众调查的反应结果。关于二次辐射噪声的烦恼度调查很少^[4], G. M. Aasvang^[5]分析了地铁引起的二次辐射噪声与主观反应之间的相关性。二次辐射噪声主要是低频的嗡嗡声, 也可能伴随着窗户与家居振动产生的高频成分, 二次辐射噪声的频率范围在 20 ~ 200 Hz^[6], 使得居住区的声环境频率特征发生了较大变化。研究表明, 人们对噪声的主观的烦恼度不仅与声压的大小有关, 而且与噪声的频率特性显著相关, A 计权声级低估了低频噪声对人的影响。

对于噪声主观烦恼反应的研究, 现场问卷是

收稿日期: 2012-10-30

* 联系作者, Email: shendaoming@163.com

一种常用的方法。现场问卷通常是以调查问卷的方式,对暴露于所研究噪声的居民展开问卷调查,问卷的内容除了个人信息、噪声经历之外,更主要地还是了解居民对所暴露噪声的主观评价选项,这种评价既可以采用数值评价,也可以是语言描述量。目前,大部分的现场研究都采用语言描述量来调查居民对噪声的主观烦恼反应。

不同国家研究者使用不同的噪声指标来评价铁路噪声声级与主观烦恼度之间的关系^[7-9],并分别规定了不同时段的噪声排放允许值。由于轨道交通是分时段运行并属于间歇性的,评价方法应考虑这个特点,美国公共运输协会在《轨道运输设计指南》、英国伦敦地铁公司在《关于噪声与振动备忘录》^[10]中给出了有关建议标准,其评价量均采用 L_{max} 。我国城市轨道交通噪声评价环境标准,一般参照铁路标准进行监测与评价。

本研究主要是与接受长期地铁引起的二次噪声暴露下的居民进行面对面“一对一入户式”访谈,通过询问一些指定的问题来获得居民对其接受二次辐射噪声的评价。调查内容包括被调查者基本信息、对所处地点二次辐射噪声的认识、对接受调查时二次辐射噪声的评价。对于居民区住户,每个家庭自由选取一位家庭成员接受调查开展社会调查的同时将监测、记录居民所处声环境情况,分析调查者所受声级和噪声烦恼评价结果,得出适合我国人群的二次辐射噪声声级与烦恼度概率反应关系及烦恼阈值结果。这些研究工作为今后更加深入和全面地研究地铁引起的二次辐射噪声烦恼度及其评价标准问题提供基础资料。

1 问卷调查、现场实测及二次噪声评价量

为了降低其他噪声源对地铁引起二次辐射噪声的干扰,选择地铁从小区内部穿过的居民区作为研究对象,对距地铁隧道中心线 65 m 以内的住宅内居民进行问卷调查。采用问卷调查与现场实测相结合的方式来确定二次辐射噪声对居民生活的影响。

1.1 地铁引起二次噪声烦恼度调查

调查方法及问卷的设计参照 GB/Z 21233—2007《声学应用社会调查和社会声学调查评价噪声烦恼度》。问卷设计主要从定性角度分析地铁引起低频噪声对居民生理和心理的影响,定量角

度主要分析地铁引起二次辐射噪声的影响程度。采用语言描述量来调查居民对噪声的主观烦恼反应的 5 个等级分别为“毫不烦恼”,“有点烦恼”,“烦恼”,“非常烦恼”,“极为烦恼”。共发放 323 份问卷,回收 265 份有效问卷,回收率达到 82%,其中住 1 楼有 107 份,住 2 楼有 79 份,住 3 楼有 56 份,住 4 楼及 4 楼以上的有 21 份,男女比例为 126:139。信息不完整、烦恼度等信息缺失的为无效问卷。

调查中不要透露此次问卷调查是针对地铁运行的,这样保证居民填写问卷的客观性。二次噪声是房屋结构振动所产生的,所以调查人员应向被问卷居民说明他们填写问卷时主要反映的感受是房间中门窗关闭时的感受。调查的主要内容见表 1。

表 1 问卷调查的主要内容
Table 1 Main content of questionnaire

类别	问询项目
个人基本情况	年龄、目前与过去从事的职业、居住时间、健康状况、学历
对噪声的总体感受	听到噪声的时间、可疑声源、对噪声的描述、烦恼程度
噪声对生理的影响	常有呼吸不畅感、头痛或头重的感觉、感觉听力下降、感觉耳朵有压迫感
噪声对心理的影响	常感到焦虑和烦躁、摔东西的冲动
减轻噪声影响的措施	是否关窗、安装吸声装置、调整床的位置

1.2 噪声主观烦恼阈值计算方法

利用模糊数学原理进行主观烦恼度研究在国内外均有应用^[11,12],根据受调查者给出的不同烦恼度等级,按等间隔原则给出描述性等级量表的主观感觉烦恼度的隶属函数式:

$$F_{\text{描述性等级}} = \frac{0}{\mu_1} + \frac{0.25}{\mu_2} + \frac{0.50}{\mu_3} + \frac{0.75}{\mu_4} + \frac{1.0}{\mu_5} \quad (1)$$

式中, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 分别为对烦恼程度“一点没有”、“轻微”、“一般”、“严重”和“非常严重”的评价等级; 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 为各等级对应的隶属度。

$$P_i = \sum \mu_j n_{ij} / \sum n_{ij} \quad (2)$$

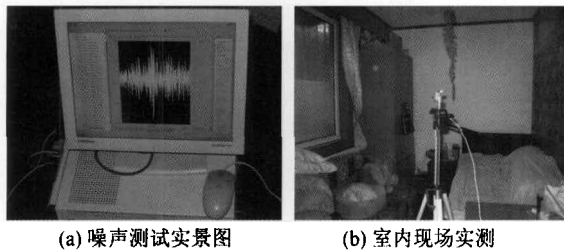
式中, P_i 为中心声级 L_i 的烦恼概率; n_{ij} 为 L_i 声级下第 j 评价等级出现的频数; μ_j 为第 j 评价等级烦恼度的隶属度,即隶属函数值。

环境噪声烦恼阈值 (EL) 函数式:

$$EL = \sum L_i P_i / \sum P_i \quad (3)$$

1.3 室内二次噪声的现场测量

测试主要在地铁地下线附近的居民住宅中进行的,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、风扇等产生振动的声源,避免人为走动、说话及其他噪声对测量信号的干扰。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。实际的场景可以参照图 1。



(a) 噪声测试实景图

(b) 室内现场实测

图 1 实际的场景图

Fig. 1 The experiment setup of the ground-borne noise (a) & In-situ measurement in building (b)

1.4 我国现行的二次辐射噪声评价量

目前我国的标准对于地铁引起的室内噪声的评价量并不统一。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

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{AE,i}} \quad (4)$$

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 $L_{AE,i}$ 是列车经过时段的等效声级,根据 JGJ/T 170—2009 计算的等效声级记为 L_{Aeq200} 。如果 $L_{AE,i}$ 是包括列车经过间隔时段(约 2 min)的等效声级,根据 JGJ/T 170—2009 计算的等效声级记为 $L_{Aeq200,2 \text{ min}}$ 。

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 GBJ118《民用建筑隔声设计规范》的规定,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》,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/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》,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(记为 L_{Amax})。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, HJ 453—2008 与 DB31/T470—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 $L_{Aeq20k,2 \text{ min}}$)。

2 数据分析处理

在数据统计检验中,先将描述性等级量表中的五个等级分别用等间隔数字(1, 2, 3, 4, 5)赋值。采用方差分析法对烦恼度进行显著性检验, $p < 0.05$ 视为统计具有显著性。通过问卷调查的结果分析室内噪声烦恼度随距离的衰减关系,楼层、不同性别及年龄对噪声烦恼度的影响。根据室内噪声的实测结果分析不同噪声评价量的烦恼度概率及烦恼度阈值。

2.1 调查结果分析

2.1.1 地铁引起室内噪声烦恼度与住宅距离地铁中心线位置间的关系

问卷的发放主要集中在距离地铁中心线 30 m 以内的区域,35 m 以外的问卷数量较少,这是由于在问卷调查的过程中,居住在距离地铁 35 m 以上的被调查者对地铁引起室内噪声影响的烦恼度很小。将所有问卷与有效问卷按照距离地铁的距离 0 ~ 5 m、5 ~ 10 m、10 ~ 15 m、15 ~ 20 m、20 ~ 25 m、25 ~ 30 m、30 ~ 35 m、35 ~ 40 m、40 ~ 50 m、50 ~ 65 m 及 65 m 以上进行分类,得到距离地铁中心线不同位置处的问卷数(图 2)。

根据住宅与地铁中心线距离的远近地铁各距离处居民的反应情况,对有效问卷内不同距离的居民烦恼度归类,统计出不同烦恼程度的居民数

量占有效问卷的百分比,根据式(2)计算出不同 距离的烦恼度概率(表 2)。

表 2 距离与烦恼度等级频率分布
Table 2 Frequency distributions of annoyance & distance

距离/m	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~50	50~65	≥65
极为烦恼/%	7.55	1.89	1.13	1.89	0.38	0.38	0	0	0	0	0
非常烦恼/%	8.68	6.42	1.89	3.40	2.26	1.13	0.38	0	0	0	0
烦恼/%	4.15	4.91	4.91	5.28	4.91	0.75	1.13	0	0	0.38	0
有点烦恼/%	0	3.02	2.64	4.91	3.40	2.26	1.13	1.89	0.75	0	0
毫不烦恼/%	0	0	0.75	1.51	2.26	1.51	4.15	2.64	1.51	1.51	2.26
合计频数/%	20.38	16.23	11.32	16.60	11.70	6.04	6.79	4.53	2.26	1.89	2.26
烦恼度概率	0.792	0.611	0.492	0.477	0.460	0.359	0.167	0.104	0.083	0.10	0

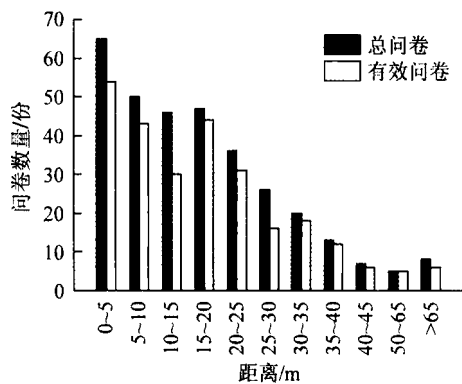


图 2 不同距离的问卷分布

Fig. 2 Questionnaire distribution at different distances

从表 2 中可以看出,0~5 m 的烦恼度概率在 0.75~1 之间,居民对地铁引起的噪声表现为非常烦恼;5~10 m 的烦恼度概率在 0.5~0.75 之间,居民对噪声的表现主要为烦恼;15~30 m 的烦恼度概率在 0.25~0.5 之间,居民对噪声的表现主要为轻微烦恼;30 m 以上的烦恼度在 0.25 以下,居民对地铁引起的室内噪声烦恼度反应很小。

2.1.2 楼层对地铁引起室内噪声烦恼度的影响

对有效问卷按 1 楼、2 楼、3 楼及 3 楼以上分类,根据各个楼层的居民烦恼程度统计出不同烦恼程度的居民数量占有效问卷的百分比,计算出各楼层的烦恼度概率(图 3)。

从图 3 中可以看出,1 楼的烦恼度概率在 0.5~0.75 之间,居民对室内噪声表现为非常烦恼;2~3 楼的烦恼度概率为 0.25~0.5 之间,居民对室内噪声的主要反应为烦恼;3 楼以上的烦恼度在 0.25 以下。这说明地铁引起的室内噪声对居民的影响主要集中在 1~3 楼,3 楼以上的影响很小。

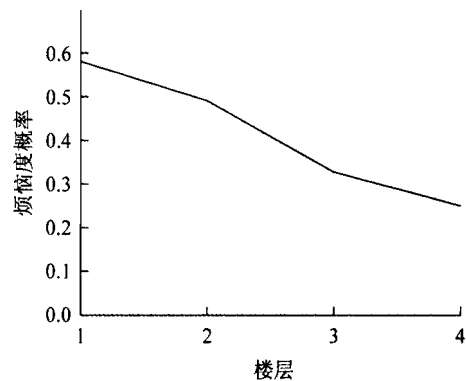


图 3 楼层数与噪声烦恼度分布

Fig. 3 Distributions of annoyance vs floor number

2.1.3 年龄对地铁引起室内噪声烦恼度的影响

将有效问卷按性别和 40 岁以下、40~45 岁、45~50 岁、50~60 岁、60~65 岁及 65 岁以上年龄段进行分类,统计出不同烦恼程度的居民数量占有效问卷的百分比,计算出不同性别与年龄段的烦恼度概率(图 4)。

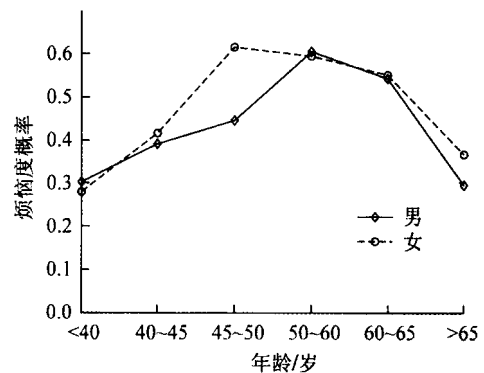


图 4 年龄与噪声烦恼度概率分布

Fig. 4 Distributions of annoyance & age

从图 4 中可以看出,女性对于地铁引起的室内噪声的烦恼度普遍比男性对于地铁引起的室内噪声烦恼度高;40 岁以下对于地铁引起的室内噪

声烦恼度较低,这可能是由于40岁以下的身体条件较好,大部分时间在忙于工作和学习,在家时间较短,地铁运行对他们的影响很小;女性在45~50岁年龄段的烦恼度最高,男性在50~60岁年龄段最高。

2.2 实测结果分析

为了分析不同评价量的对实测结果的评价效果,把室内噪声实测结果按楼层、测试敏感点与地铁隧道中心线之间的距离的不同进行统计分析。

2.2.1 不同评价量下声压级与距离的关系

把实测结果按0~5 m,5~10 m,10~15 m,15~20 m,20~25 m,25 m以上进行分类,通过统计分析得到不同距离下各评价量的声压级均值(图5)和标准差(表3)。

地铁引起的室内二次辐射噪声是低频噪声,主要频率分布在20~200 Hz。 L_{Aeq200} 分析的频率范围为20~200 Hz,该评价量主要反映了地铁列车引起的室内二次辐射噪声的大小。从图5中可以看出,在10 m以内 $L_{Aeq200,2 min}$ 的值比 L_{Aeq200} 小5~7 dB,在20 m以上的测点相差不大,这时因为评价量 $L_{Aeq200,2 min}$ 为包含110 s背景噪声及列车经过时段的室内二次噪声的20~200 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。

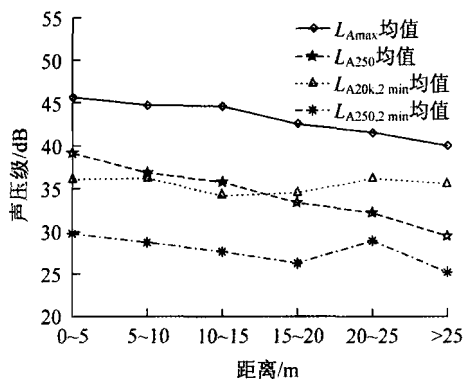


图5 不同评价量下实测声压级均值随距离的衰减

Fig. 5 Attenuation of measurement sound pressure level with distance in different assessment values

评价量 L_{Amax} 评价的频率范围是全频段,该评价量包含列车经过时段的背景噪声高频成分和突

发噪声。背景高频成分对于该评价量的影响很大,在不同的距离范围内,衰减并不明显。这是因为使用A计权时,低频成分的计权值很小,地铁引起的室内二次辐射噪声对 L_{Amax} 的贡献量很小,而背景噪声的高频成分计权值较大。因此使用 L_{Amax} 评价地铁运行引起室内二次辐射噪声时,背景噪声的高频成分掩盖了低频成分的对总声级的贡献。从表3中可以看到, L_{Amax} 的标准差明显高于 L_{Aeq200} 的标准差,这是由于 L_{Amax} 为列车经过时段内的最大声级,评价量采用的时间为1 s,容易受到突发噪声的影响。

表3 不同距离下各评价量的声压级标准差(dB)

Table 3 Sound pressure level standard deviation of assessment values in different distances

距离	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
L_{Amax}	3.15	2.24	2.42	2.26	1.62	1.89
L_{Aeq200}	2.18	2.19	2.22	3.57	1.69	1.44
$L_{Aeq20k,2 min}$	3.22	2.08	2.52	2.26	2.37	0.46
$L_{Aeq200,2 min}$	2.92	1.88	2.05	2.57	3.87	1.30

评价量 $L_{Aeq20k,2 min}$ 背景时间较长,该评价量实际上是反映了室内背景噪声的大小。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。在不同的距离范围内, $L_{Aeq20k,2 min}$ 的衰减并不明显。使用 $L_{Aeq20k,2 min}$ 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。

把不同距离时的声压级均值与不同距离时的烦恼度概率相比较,计算不同评价量下二者的相关性(表4)。

表4 不同距离时声压级均值与烦恼度概率的相关性

Table 4 Correlation of sound pressure level mean and probability of annoyance in different distances

评价量	L_{Amax}	L_{Aeq200}	$L_{Aeq20k,2 min}$	$L_{Aeq200,2 min}$
相关性	0.762 4	0.929 3	0.306 4	0.597 7

从表4中可以看出,不同距离时的声压级与烦恼度的相关性中, L_{Aeq200} 的相关性最高,为0.929 3, $L_{Aeq200,2 min}$ 、 $L_{Aeq20k,2 min}$ 与烦恼度的相关性很低。说明不同距离的 $L_{Aeq200,2 min}$ 、 $L_{Aeq20k,2 min}$ 的大小对居民对室内噪声烦恼度的影响很小。

2.2.2 不同评价量下声压级与楼层的关系

把实测结果按1楼、2楼、3楼与3楼以上进行分类,通过统计分析得到各楼层下各评价量的

声压级均值(图 6)和标准差(表 5)。

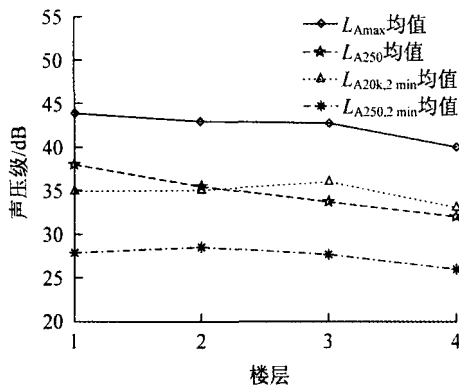


图 6 不同评价量下实测声压级均值随楼层的衰减
 Fig. 6 Attenuation of measurement sound pressure level with stairs in different assessment values

在 1~3 楼中 L_{Amax} , $L_{Aeq20k,2 min}$, $L_{Aeq200,2 min}$ 衰减并不明显, $L_{Aeq200,2 min}$, $L_{Aeq20k,2 min}$ 分别在 2 楼与 3 楼有略微放大的现象,这可能与测量的 2 楼和 3 楼测量样本较少有关。 L_{Amax} 在 3 楼以上有较为明显的衰减。 L_{Aeq200} 在相邻楼层之间的衰减大约为 2 dB。说明楼层对于二次辐射噪声的衰减很小。

表 5 各同楼层的不同评价量声压级标准差 (dB)
 Table 5 Sound pressure level standard deviation of assessment values in stairs

楼层	1 楼	2 楼	3 楼	3 楼以上
L_{Amax}	2.50	3.41	2.45	2.53
L_{Aeq200}	2.35	2.92	3.69	1.82
$L_{Aeq20k,2 min}$	1.95	3.05	2.68	2.48
$L_{Aeq200,2 min}$	2.12	2.81	2.44	1.54

从表 5 中可以看出,各评价量在各个楼层之间的声压级标准差相差不大。

把各楼层的声压级均值与各楼层的烦恼度概率相比较,计算不同评价量下二者的相关性(表 6)。

表 6 各同楼层声压级均值与烦恼度概率的相关性
 Table 6 Correlation of sound pressure level mean and probability of annoyance in stairs

评价量	L_{Amax}	L_{Aeq200}	$L_{Aeq20k,2 min}$	$L_{Aeq200,2 min}$
相关性	0.739 7	0.976 2	0.453 2	0.584 3

各楼层的声压级与烦恼度的相关性中, L_{Aeq200} 的相关性最高,为 0.976 2, $L_{Aeq200,2 min}$, $L_{Aeq20k,2 min}$ 与烦恼度的相关性很低。说明各楼层 $L_{Aeq200,2 min}$, $L_{Aeq20k,2 min}$ 的大小对居民对室内噪声烦恼度的影响很小。

2.3 不同噪声评价量下烦恼度阈值

根据室内实测噪声与对应的居民对噪声反应的情况,计算出各个评价量的不同声压级下的烦恼度概率(图 7)。

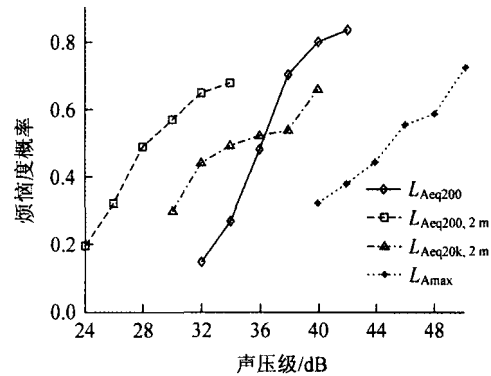


图 7 不同噪声评价量的烦恼度概率分布
 Fig. 7 Annoyance probability distribution of different noise assessment values

从图 7 中可以看到, L_{Aeq200} 的烦恼度概率的变化范围在 0.15~0.82 之间,包含了极为烦恼、非常烦恼、烦恼、轻微烦恼及毫不烦恼的烦恼度概率,很好地体现了居民对室内二次辐射噪声的烦恼度反应。 $L_{Aeq200,2 min}$ 与 $L_{Aeq20k,2 min}$ 的最大烦恼度概率都在 0.7 左右,未能反映出对地铁引起室内噪声极为烦恼和非常烦恼的居民的感受, L_{Amax} 的最小烦恼度概率在 0.3 左右,未能反映出对地铁引起室内噪声毫不烦恼与有点烦恼的居民的感受,使用 $L_{Aeq200,2 min}$, $L_{Aeq20k,2 min}$ 与 L_{Amax} 来评价居民对室内噪声的烦恼度是不准确的。

通过不同声压级下的烦恼度概率,根据式(3),得出各评价量的烦恼度阈值(表 7)。

表 7 不同评价量下噪声烦恼度阈值 (dB)
 Table 7 Noise annoying threshold of different noise assessment values

评价量	L_{Aeq200}	$L_{Aeq200,2 min}$	$L_{Aeq20k,2 min}$	L_{Amax}
烦恼度阈值	38.63	30.19	35.72	45.21

L_{Aeq200} 的烦恼度阈值为 38.63 dB,与 JGJ/T 170—2009 标准中 0 类与 1 类区域的昼间限值、2 类区域的夜间限值 38 dB 相接近,比 2 类区昼间限值低,说明居民对地铁引起的室内二次辐射噪声烦恼度阈值比 JGJ/T 170—2009 标准中的限值低。美国公共运输协会在《轨道运输设计指南》、英国伦敦地铁公司在《关于噪声与振动备忘录》中给出了有关建议标准,其中,英国建议标准对于

居民集中建筑物内的限值为 $L_{\max} \leq 40$ dB(A); 美国调查结果表明: 当 $L_{\max} > 45$ dB(A) 时, 居民主观反应影响较大。 $L_{A\max}$ 的烦恼度阈值为 45.21 dB, 比美国的调查结果略高, 说明美国公众对噪声的烦恼度比我国居民对二次辐射噪声的烦恼度高。

3 结 论

从问卷调查的结果分析中可以看出, 居民对地铁引起的室内二次辐射噪声的烦恼主要集中在距离地铁隧道中心线 10 m 以内, 10~25 m 的居民对噪声的表现主要为轻微烦恼; 30 m 以上居民对地铁引起的室内噪声烦恼度反应很小; 地铁引起的室内噪声对居民的影响主要集中在 1~3 楼, 4 楼及 4 楼以上的影响很小; 地铁运行对 40 岁以下的居民影响较小; 女性在 45~50 岁年龄段的烦恼度最高, 男性在 50~60 岁年龄段最高。

室内噪声实测结果显示, 评价量 L_{Aeq200} 能够很好地反映室内二次辐射噪声随距离与楼层的衰减; 评价量 $L_{Aeq200,2\min}$ 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; $L_{A\max}$ 评价地铁运行引起室内二次辐射噪声时, 背景噪声的高频成分掩盖了低频成分对总声级的贡献, 容易受到突发噪声的影响; 评价量 $L_{Aeq200k,2\min}$ 背景时间较长, 该评价量实际上是反映了室内背景噪声的大小。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。

L_{Aeq200} 的烦恼度阈值为 38.63 dB, 与 JGJ/T 170—2009 标准中 0 类与 1 类区域的昼间限值、2 类区域的夜间限值相接近, 说明居民对地铁引起的室内二次辐射噪声烦恼度阈值比 JGJ/T 170—2009 标准中的限值低; $L_{A\max}$ 的烦恼度阈值为 45.21 dB, 比美国的调查结果略高, 说明美国公众对噪声的烦恼度比我国居民对二次辐射噪声的烦恼度高。

参考文献

[1] E. Öhrström, Lars Barregård, Eva Andersson, et al. Annoyance due to single and combined sound exposure from railway and road traffic[J]. *Acoustical So-*

- ciety of America, 2007, 122(5): 2642-2652.
- [2] 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 Canping. Study on the method of evaluation and its limited value on environment influence to noise caused by urban railway traffic[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(4): 91-94. (in Chinese)
- [3] Yano T, Yamashita T, Izumi K. Comparison of community annoyance from railway noise evaluated by different category scales[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 205(4): 505-511.
- [4] Vadillo E G, Herreros J, Walker J G. Subjective reaction to structurally radiation sound from underground railways: field results[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1): 65-74.
- [5] Aasvang G M, Engdahl B, Rothschild K. Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels[J]. *Applied Acoustics*, 2007, 68: 970 - 981.
- [6] Walker J G, Chan M K F. Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1): 49-63.
- [7] Schultz T J. Synthesis of social surveys on noise annoyance[J]. *Acoustical Society of America*, 1978, 64(2): 337-405.
- [8] Henk M E M, Henk V. Exposure-response relationships for transportation noise[J]. *Acoustical Society of America*, 1998, 104(6): 3432-3445.
- [9] Levenin N. The development of an annoyance scale for community noise assessment[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 74(2): 265-279
- [10] FTA (2006). Transit noise and vibration impact assessment. Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration [R]. Report Number: FTA-VA-90-1003-06.
- [11] Saekitetal. A method for predicting psychological response to meaningless random noise based on fuzzy system model[J]. *Applied Acoustics*, 2002, 63(3): 323-331.
- [12] 贾丽. 用社会声学调查方法研究居住区噪声烦恼阈值[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(10): 955-960.
Jia Li. Investigation on the noise annoyance threshold in residential areas by socio-acoustic surveys [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(10): 955-960. (in Chinese)