

地铁引起建筑物振动评价量及限值实测与探讨

唐和生^{1,2}, 申道明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: 通过对临近地铁中心线 30 m 以内居民住宅内进行的室内振动实测结果统计, 分析室内振动的主要频率、 VL_{\max} 与 $VL_{z\max}$ 分布, 并对 VL_{\max} 与 $VL_{z\max}$ 大小进行了比较, 探讨了我国现行的不同标准关于室内振动标准限值高低及使用的评价量存在的不足。提出了在评价地铁引起建筑物室内振动时, 应考虑行车密度的影响的建议。

关键词: 振动评价量; 计权因子; 1/3 倍频程; 行车密度

中图分类号: TB52 文献标识码: A

Measurement & discussion for evaluation and limits of subway induced ground-borne vibration in buildings

TANG He-sheng^{1,2}, SHEN Dao-ming¹, XUE Song-tao^{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: With statistics of in-situ measurement results of ground-borne vibration in buildings within 30m range of subway line caused by subway operations, distribution of ground-borne vibration principal frequencies and VL_{\max} & $VL_{z\max}$ were analyzed, Magnitudes of VL_{\max} & $VL_{z\max}$ were compared. Limit values of different current standards in our country for room vibration and deficiency of the vibration assessment index were discussed. Suggestions were put forward for evaluating the index of vibration assessment of ground-borne vibration in buildings generated by subway operation, one of them was that the headway of trains should be considered.

Key words: vibration evaluation index; weighting factor; 1/3 octave band; train headway

随着我国国民经济的持续、快速、稳定发展, 城市化进程不断加快, 地下轨道交通成为了城市交通系统发展的重点。由于地铁均贯穿市中心, 在负担城市运输的主要交通任务同时, 也对沿线周围建筑物的居住环境产生影响。合理评估地铁运营引起的环境振动以及对周边环境的影响已经成为亟待解决的问题, 但是对于室内振动评价量的使用, 各国的标准并不统一。文献[1-2]推荐使用最大速度振级作为建筑物振动的评价量, 同时考虑到工程类型的不同及发生事件的频率。文献[3]规定用都市区域最大许可振动值评价轨道交通引起的建筑物内的振动。文献[4]指出: 评价轨道交通引起的建筑物室内振动应根据文献[5-6]提出的人类可察觉的建筑物室内振动及对于全身振动反映, 主要使用计权均方根加速度来评价振动对人的影响。在基本的评价方法可能会低估振动的影响(高的峰值因数、偶然性冲击、瞬态振动等)的情况下, 应采用

均方根值或者四次方根剂量值。文献[7]用最大振动加速度及最大振动速度来评价室内振动; 文献[8]用计权的振动加速度与计权的振动速度来评价室内振动。文献[9-10]预测评价使用铅垂向 Z 振级 VL_{z10} 与按照 Z 计权因子修正后得到的最大振动加速度级 ($VL_{z\max}$)。文献[11]用 1/3 倍频程中心频率上最大振动加速度级 (VL_{\max}), 文献[12-14]用的评价量为 $VL_{z\max}$ 。文献[15]测量值为频率 1~80Hz 范围内, 1/3 倍频程的铅垂向振动加速度级 La 。

地铁列车引起建筑物室内振动与诸多影响因素有关, 研究结果表明^[16-17]: 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, 导致数值计算地铁引起的室内振动非常困难。因此实测成为解决地铁引起室内振动问题的一个非常重要的手段。雷彬等^[18]提出以 $VL_{z\max}$ 作为城市轨道交通振动环境影响评价量, 忽略了行车密度对人的影响。万胜国等^[19]分析了不同标准中评价方法与评价指标的异同。本文通过对临近地铁中心线 30 米以内的居民住宅内进行的

收稿日期: 2012-04-18 修改稿收到日期: 2012-05-25

第一作者 唐和生 男 副教授, 博士生导师, 1973 年生

室内振动的实测结果分析室内振动的频率分布,分析了 $V_{L_{max}}$ 与 $V_{L_{zmax}}$ 分布,并对它们大小进行了比较,探讨了我国现行的不同标准关于室内振动标准限值高低及我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室内振动的特性,为降低室内振动的影响及采取相对应措施提供有益的帮助并为将来新标准的修订提供一定的依据和建议。

1 地铁引起室内振动实测介绍

测试主要在上海地铁地下线附近的居民住宅中进行的,一般选择在卧室或者客厅内进行测量。测量位置一般选在离墙壁 1.5 m 处,加速度传感器与楼板之间要粘牢。在测量时关闭电冰箱、风扇等产生振动的振源,避免人为走动及其他振动对测量信号的干扰。振动实测使用美国 NI 公司生产的 PXI1042 多通道数据采集系统, PXI4472 数据采集模块, LC0132T 加速度传感器。采样频率选为 1 000 Hz,采用连续采样,每次测量时间定为 1 h。按文献 [13] 规定的方法进行测量,数据采集系统直接记录室内振动加速度时程。实际的场景见图 1。

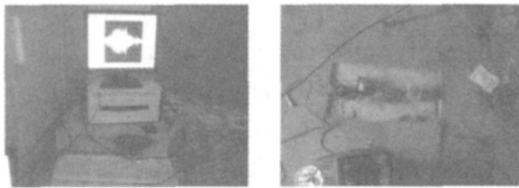


图 1 振动测试实景图 & 室内现场实测
Fig. 1 The experiment setup of the ground-borne vibration & In-situ measurement in building

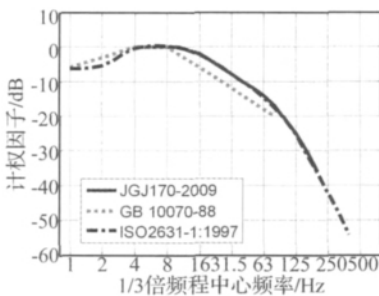


图 2 三种计权因子比较
Fig. 2 Compare of three weighting factors

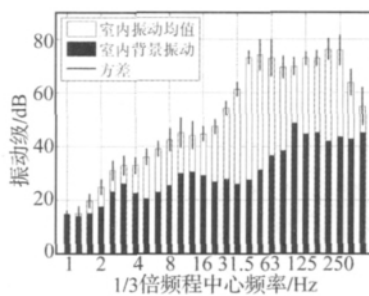


图 3 室内振动实测结果的未计权结果
Fig. 3 Unweighted results of ground-borne vibration

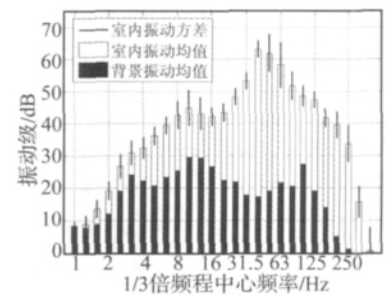


图 4 室内振动实测的 ISO2631-1 计权结果
Fig. 4 Results in ISO2631-1 weighting factor of ground-borne vibration

从室内振动 1/3 倍频程未计权结果(图 3)统计上看,室内振动频率主要分布在 31.5 ~ 250 Hz 范围内,其他频率段的振动级与 31.5 ~ 250 Hz 频段上的振动级相差 10 dB 以上。说明室内振动的主要能量分布在 31.5 ~ 250 Hz 范围内。

室内振动实测文献 [5] 计权结果(图 4)显示 80 Hz 以上的成分下降很快,室内振动的主要频率在 31.5 ~

2 数据分析

2.1 计权因子影响

《城市区域环境振动标准》在制定住宅建筑(包括商住楼)室内振动标准限值时,主要是以住宅室内振动对人居环境的影响为前提,采用的振动频率为 1 ~ 80 Hz,其中心频率以 1/3 倍频程划分。文献 [6] 对频率计权因子作了调整,并希望各国提供相关的数据,以继续积累研究资料,但我国有关人体振动感受的基础性标准(如 GB/T 13442-92; GB 10070-88 等)并未修改。因此,《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》中 1 ~ 80 Hz 各中心频率上的计权因子仍采用 GB/T13442-92《人体全身振动暴露的舒适性降低界限和评价准则》中所规定的 Z 向频率计权因子。

文献 [11] 测量的铅垂向振动加速度按文献 [5] 规定的 Z 向频率计权因子进行数据处理,但二者并不完全相等。文献 [11] 考虑的 4 ~ 200 Hz 频段上,计权因子与文献 [5] 规定的竖向计权因子 W_k 基本相等。在 1 ~ 4 Hz 频段上,《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》中规定的计权因子 $W_i > W_k$; 在 4 ~ 8 Hz 频段 W_i 与 W_k 近似相等; 在 8 ~ 80 Hz 频段 $W_i < W_k$, 二者相差约 4 dB。

2.2 主频分布

文献 [5] 规定的 z 向计权因子的频率范围为 1 ~ 400 Hz,文献 [11] 认为轨道交通引起室内振动范围为 4 ~ 200 Hz,文献 [4, 6, 12] 均用 1 ~ 80 Hz 频率计权评价室内振动对人的影响。为了确定地铁运行引起室内振动影响的频率范围,对列车经过时段的实测室内振动 1/3 倍频程结果进行统计分析。

80 Hz 之间。说明文献 [11] 认为轨道交通引起室内振动频率分布在 4 ~ 200 Hz 的范围过宽。

从室内振动实测 GB 10070-88 计权结果(图 5)上看,室内振动的主要频率在 31.5 ~ 80 Hz 之间。说明地铁引起的室内振动对人的影响主要频率分布在 31.5 ~ 80 Hz 范围内,评价室内振动对人的影响频率范围设定在 1 ~ 80 Hz 是比较合理的。

2.3 VL_{max} 与 VL_{zmax} 实测结果比较

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

列车经过时段的时程结果进行 1/3 倍频程分析 , 在 4 ~ 200 Hz 频段上得到每一个中心频率上的加速度级 L_{ai}。对每一个 L_{ai} 进行计权后取最大值作为该次列车通过时的 VL_{max}。

《城市区域环境振动标准》与《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值和测量方法标准》中规定的评价量并不相同 , 为了比较 GB10071 中规定环

境振动测量方法计算 VL_{zmax} 与 JGJ170 - 2009 标准计算 VL_{max} 的大小 , 对室内振动的 VL_{zmax} 与 VL_{max} 实测结果进行统计分析(图 6)。

从图 6 中可以看出 , VL_{zmax} 分布在 63 ~ 76 dB 之间 , 主要分布在 65 ~ 72 dB ; VL_{max} 分布在 64 ~ 78 dB 之间 , 主要分布在 65 ~ 75 dB。

把各次测量的 VL_{max} - VL_{zmax} 值统计结果进行统计分析(图 7) , VL_{max} - VL_{zmax} 的分布主要在 -1 ~ 3.5 dB 之间 , 主要分布在 1 ~ 2.5 dB 范围内 , 从累计百分比上看 , 平均值为 1.613 dB , 标准差为 0.958 9 dB , 说明 VL_{max} 通常比 VL_{zmax} 大 1.6 dB 左右。从图 7 中可以看出 , 虽然有 90% 以上 VL_{max} - VL_{zmax} ≥ 0 , 但是 VL_{max} - VL_{zmax} < 0 还有 10% 左右。

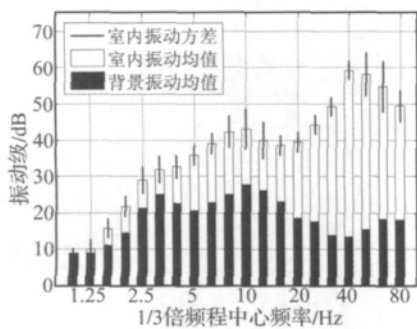


图 5 室内振动实测的 GB 10070 - 88 计权结果
Fig. 5 Results in GB 10070 - 88 weighting factor of ground-borne vibration

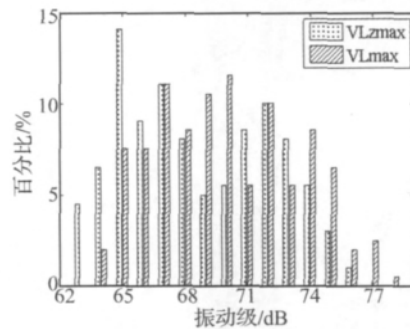


图 6 VL_{zmax} 与 VL_{max} 值统计分布
Fig. 6 Statistical distribution of VL_{zmax} & VL_{max}

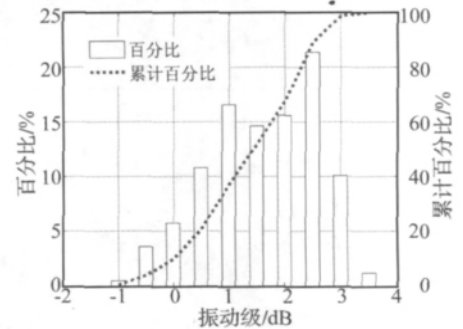


图 7 VL_{max} - VL_{zmax} 值统计结果
Fig. 7 Statistical results of VL_{max} - VL_{zmax}

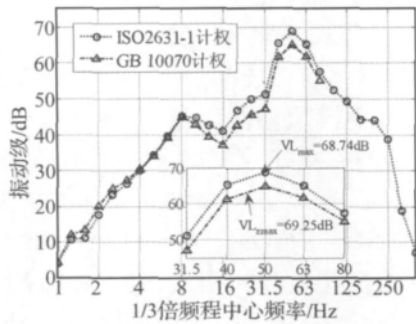


图 8 VL_{max} - VL_{zmax} < 0 时
实测 1/3 倍频程结果

Fig. 8 1/3 octave results as VL_{max} - VL_{zmax} < 0

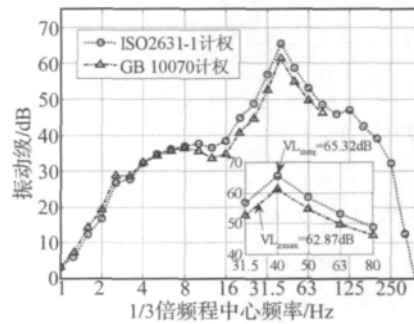


图 9 VL_{max} - VL_{zmax} > 0 时
实测 1/3 倍频程结果

Fig. 9 1/3 octave results as VL_{max} - VL_{zmax} > 0

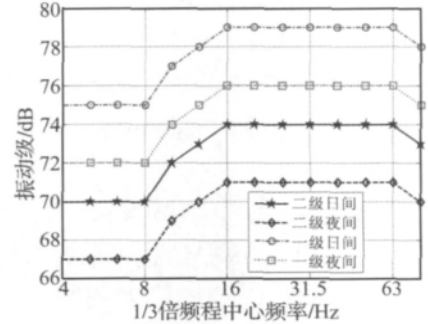


图 10 GB50335 限值经过 JGJ170 标准计权结果
Fig. 10 Results of GB50335 limits values by JGJ170 weighting factors

为了分析 VL_{zmax} 与 VL_{max} 的大小 , 对出现 VL_{max} - VL_{zmax} ≥ 0 (图 8) 与 VL_{max} - VL_{zmax} < 0 (图 9) 时实测 1/3 倍频程结果进行对比分析。

在 VL_{max} - VL_{zmax} ≥ 0 与 VL_{max} - VL_{zmax} < 0 时 1/3 倍频程计权的结果都只出现 1 个峰值。当 VL_{max} - VL_{zmax} < 0 时 , 1/3 倍频程计权振动级的最大值与其两边振动级相差较大 , 在峰值附近曲线比较尖锐 ; 当 VL_{max} - VL_{zmax} > 0 时 , 1/3 倍频程计权振动级的最大值与其两边振动级相差较小 , 在峰值附近曲线比较平缓。这是因为 VL_{zmax} 是 1 ~ 80 Hz 各频率段计权后能量相加计算出来的等效值 , VL_{max} 只与峰值有关 , 与峰值附近的振动

级无关。

2.4 标准限值分析

2.4.1 GB/T 50335 限值与 JGJ170 - 2009 限值比较

GB/T 50335 与 JGJ170 - 2009 均采用分频限值 , 为了分析 GB/T 50335 与 JGJ170 - 2009 对室内振动评价的限值的高低 , 把 GB/T 50335 标准的一级与二级限值经过 JGJ170 - 2009 中定义的计权因子后的计权曲线与 JGJ170 - 2009 标准的一级与二级限值进行比较(图 10)。

从图 10 可以看出 , 从 16 ~ 63 Hz 范围内 , GB/T 50335 夜间二级的标准为 71 dB , 比 JGJ170 - 2009

中2类区域的夜间标准67 dB高4 dB; GB/T 50335 白天二级的标准为74 dB,比JGJ170-2009中2类区域的昼间标准70 dB高4 dB。

JGJ170-2009中2类区域(混合区、商业集中区)的昼间以及夜间限值减掉计权因子,得到2类区域未计权的各频率段上的限值。把每次列车通过时段的时程进行1/3倍频程分析结果分别与JGJ170-2009的2类区域未计权的各频率段上的限值标准进行比较(图11),从图中可以看出:在50 Hz附近约有2/3的结果超过了JGJ170-2009的2类区域的夜间标准,约1/2的测量结果超过JGJ170-2009的2类区域的昼间限值标准;实测结果均未超过GB/T 50335的二级限值。说明对于地铁引起的室内噪声来说,JGJ170-2009比GB/T 50335严格得多。

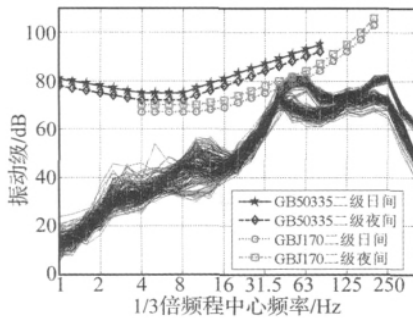


图 11 测量结果与 GB/T 50335-2005、JGJ170-2009 的 2 类区域限值比较

Fig. 11 Compare of in-situ measure results with GB50335 & JGJ170 limits values in regional 2

2.4.2 GB 10070-88、DB31/T470-2009 与 JGJ170-2009 限值比较

《城市区域环境振动标准》将适用地带范围分为6类,GB 10070-88是通过采取客观测量与主观反应相结合的方法确定的,即对我国五个典型城市的区域环境振动状况作广泛调查后,以克拉夫科夫分析方法结果为依据,并以S形曲线分析方法结果作为参考,进行常规环境物理参数分析而得出的结论。JGJ170-2009与城市区域环境噪声标准或振动标准适用的区域分类相同,遵循以人为本以及城市轨道交通线与区域环境协调匹配的原则将建筑区域分为五类。比《城市区域环境振动标准》中少“铁路干线两侧”,其他的适用地带范围是相同的。DB31/T470-2009的适用地带范围划分与JGJ170-2009完全相同。三个标准限值见表1。

DB31/T470-2009仅在2类区域比GB 10070-88的限值低3 dB,其他完全相同,说明DB31/T470-2009比GB 10070-88要求严格;JGJ170-2009标准与GB 10070-88使用的评价量不同,不能直接从它们的限值上直接进行比较,为了比较JGJ170-2009与DB31/T470-2009、GB 10070-88限值的高低,把实测的

VL_{zmax} 及 VL_{max} 累计百分比与三种标准的2类区域限值进行比较(图12)。

表 1 三种标准建筑物室内振动限值(dB)

Tab.1 Vibration limit values in building of three standards(dB)

适用地带范围	昼间			夜间		
	JG J170	GB 10070	DB31/ T470	JGJ170	GB 10070	DB31/ T470
0类(特殊住宅区)	65	65	-	62	65	-
1类(居民、文教区)	65	70	70	62	67	67
2类(混合区、商业中心区)	70	75	72	67	72	69
3类(工业集中区)	75	75	75	72	72	72
4类(交通干线两侧)	75	75	75	72	72	72
铁路干线两侧	-	80	-	-	80	-

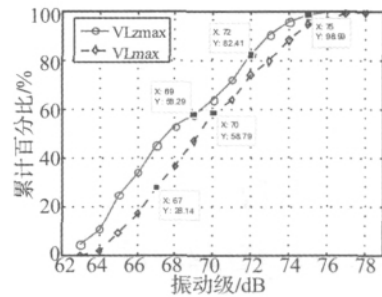


图 12 VL_{zmax} 、 VL_{max} 累计百分比

比与三种标准 2 类区域限值比较

Fig. 12 Compare of VL_{zmax} & VL_{max} cumulate percent with three standards limits values in regional 2

从图12中可以看出,实测的 VL_{max} 只有28.14%满足JGJ170-2009标准2类区域夜间限值,58.79%满足JGJ170-2009标准2类区域昼间限值;实测的 VL_{zmax} 只有58.29%满足DB31/T470-2009标准2类区域夜间限值,82.41%满足DB31/T470-2009标准2类区域的昼间限值,实测的 VL_{zmax} 有82.41%满足GB 10070-88标准2类区域夜间限值,98.99%满足GB 10070-88标准2类区域的昼间限值。说明JGJ170-2009标准中室内振动限值与GB 10070-88标准限值相比过于严格。

3 我国现有评价量存在的问题

GB/T 50355-2005中使用 L_a 与JGJ170-2009中使用 VL_{zmax} 均为分频限值, L_a 评价的范围是1~80 Hz内, VL_{max} 是在4~200 Hz,它们在4~80 Hz之间通过计权因子可以相互转化。GB/T 50355-2005中定义的未分频评价量 L_a 是用来评价室内振源引起的振动。室内振源往往引起的振动频率比较单一,通常是连续性的稳态振动,使用分频限值比较合理,地铁引起建筑物振动是在一个比较宽的频带内振动,对于某一固定的线路来说,基本上是周期性的振动,每次作用的时间只有10 s左右,相对于没有列车通过的时间是很短暂的,

使用它来评价地铁运营引起的室内振动还未得到环保部门的认可。

在 HJ453-2008 中明确规定了使用列车通过时段的 VL_{z10} 评价量,一般仪器在使用慢档时是 1 s 读一个数据,列车通过时间大约在 10 s,也就是说在列车通过时段大约会读出 10 个值,这样得到的 VL_{z10} 就相当于 VL_{zmax} 。 VL_{z10} 是一个随机过程的评价量,在室内进行测量时,一般仪器很难确定地铁经过的准确时间,把它作为地铁运营引起室内振动评价量也很难操作。

GB10070-1988 与 DB31/T470-2009 中把 VL_{zmax} 作为振动评价量,对于评价单次列车引起的室内振动的影响是比较准确的,采用 20 次结果的平均有利于消除地铁经过时突发振动造成的影响。

目前国内的标准都未对列车的行车密度进行规定。不论是 VL_{zmax} 还是作为专门评价轨道交通引起室内振动限值的评价量 VL_{max} 都能够评价单次列车对于室内居住环境的影响。但地铁运营引起的室内振动是间歇性的,单次的振动 VL_{zmax} 还是 VL_{max} 大小并不足以描述地铁运行引起室内振动对于居民生活的影响程度,例如对于同样一个敏感点来说,同样一个振动级每小时通过 10 次列车还是 30 次列车,对于居民的影响是不同的。由于 VL_{max} 是专门评价轨道交通引起的室内振动的评价量,因此建议使用该评价量来评价地铁引起的室内振动,同时必须考虑行车密度对于人的影响。

4 结 论

地铁引起的室内振动对人的影响主要频率分布在 31.5~80 Hz 范围内, JGJ170-2009 认为轨道交通引起室内振动频率分布在 4~200 Hz 的范围过宽,评价室内振动对人的影响频率范围设定在 1~80 Hz 是比较合理的。

从实测结果的统计上看, VL_{z10} 通常比 VL_{zmax} 大 1.6 dB 左右。当 $VL_{z10} - VL_{zmax} < 0$ 时,计权振动级的最大值与其两边振动级相差较大,在峰值附近曲线比较尖锐;当 $VL_{z10} - VL_{zmax} > 0$ 时,计权振动级的最大值与其两边振动级相差较小,在峰值附近曲线比较平缓。从标准限值的比较看, JGJ170-2009 标准中室内振动限值比 GB/T 50355-2005、GB 10070-88 与 DB31/T470-2009 标准限值都严格。

VL_{z10} 是一个随机过程的评价量,在室内进行测量时,一般仪器很难确定地铁经过的准确时间,把它作为地铁运营引起室内振动评价量在操作上也很难。不论是 VL_{zmax} 还是 VL_{max} 对于评价连续振动或者一次列车通过时对居民生活造成的程度是比较客观的,地铁运营引起的室内振动是间歇性的,单次的振动 VL_{zmax} 还是 VL_{max} 大小并不足以描述对于居民生活的影响程度,对于同样一个敏感点来说,同样一个振动级每小时通过不同数量列车,对于居民的影响是不同的。因此在评

价地铁引起的室内振动时,必须考虑行车密度对于人的影响。实验分析结果对开展建筑物中的振动评价研究有借鉴作用,还可为降低室内环境振动影响的隔振技术研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] ANSI S3.29-1983, American national standards institute [S]. Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in buildings.
- [2] FTA-VA-90-1003-06, Transit noise and vibration impact assessment [S]. Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration.
- [3] DIN 4150 Part 2, Vibration in buildings [R]. Effects on Persons in Buildings, Berlin, 1992.
- [4] ISO 14837-1, Mechanical vibration ground-borne noise and vibration arising from rail system-part 1: general guidance [S].
- [5] ISO2631-1:1997, Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements [S].
- [6] ISO2631-2:2003, Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [S].
- [7] DEPA. (2202A), Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration [S].
- [8] BVPO 724.001, BV(1997), Buller och vibrationer fr n sp rburen linjetrafik. Riktlinjer och tillmpning [S].
- [9] HJ/T403-2007, 建设项目竣工环境保护验收技术规范—城市轨道交通 [S].
- [10] HJ453-2008, 环境影响评价技术导则—城市轨道交通 [S].
- [11] JGJ/T 170-2009, 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准 [S].
- [12] GB 10070-88, 城市区域环境振动标准 [S].
- [13] GB 10071-88, 城市区域环境振动测量方法 [S].
- [14] DB31/T470-2009, 城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅室内振动与结构噪声限值及测量方法 [S].
- [15] GBT 50355-2005, 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准 [S].
- [16] Eitzenberger A. Train-induced vibrations in tunnels-a review [R]. 2008.
- [17] Francois S, Pyl L, Masoumi H R, et al. The influence of dynamic soil-structure interaction on traffic induced vibrations in buildings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007 27(7): 655-674.
- [18] 雷彬, 王毅. 城市轨道交通振动环境影响评价量选择的理论与实践分析 [J]. 铁道勘测与设计, 2007(1): 18-23. LEI Bin, WANG Yi. Analysis on theory and practice of environmental vibration evaluation value selection in urban rail traffic [J]. Railway Survey and Design, 2007(1): 18-23.
- [19] 万胜国, 梁晖, 周华杰. 地铁运行引起环境振动的评价方法 [J]. 武汉工程大学学报, 2009 31(5): 25-28. WAN Sheng-guo, LIANG Hui, ZHOU Hua-jie. Study on evaluation approach of subway-induced environmental vibration [J]. Journal of Wuhan Engineering University, 2009 31(5): 25-28.