

文章编号:1672-058X(2012)06-0071-08

环境振动舒适度评价指标及方法研究进展*

何强¹, 李斌¹, 葛勇²

(1. 重庆市江北区 城市建设有限公司, 重庆 400020; 2. 重庆市开县 城乡建设委员会, 重庆 405400)

摘要:通过对环境振动舒适度国内外研究成果的总结,阐述了振动舒适度研究的发展历程;介绍了环境振动舒适度的研究现状,并从振动舒适度评价指标和评价标准进行了总结,最后对环境振动舒适度评价的未来趋势进行了展望。

关键词:舒适度;环境振动;评价指标;评价方法

中图分类号:R126.9

文献标志码:A

环境振动舒适度是指生活或工作在某一环境中人群感受不到外界环境振动干扰的程度。受到外界环境振动干扰越大,环境振动舒适度越低;反之,环境振动舒适度就越高。近年来,随着列车速度的迅速提高,客运专线、高速铁路等相继建成并投入运行,加剧了对环境产生的振动影响。从而造成了环境的振动污染,这必然导致环境振动舒适度降低。

为了研究振动对生活与工作的影响,国内外学者运用模糊数学、生物学、结构工程学以及人机工程学等方法对振动舒适度问题做了大量的研究。通常情况下评定振动是否对人的舒适度造成影响,是通过加速度值是否超过某个振感阈值来界定。人可接受振动加速度值的上限值取决于振动的持续时间、特性以及性质等因素^[1],加速度振感阈值是大多数人感觉不可接受相对应的振动加速度水平的下限值。国际 ISO 标准以及各国标准,均给出了不同形式振感阈值和一定的振动持续时间下对应的振动加速度水平的限值,即舒适度下限。

振动舒适度评价是人机工程学角度来研究环境振动的影响,依据振动加速度水平的高低可分为:①影响人的生理健康相对应的振动加速度水平^[2];②影响人正常工作和操作相对应的振动加速度水平;③影响人的舒适感相对应的振动加速度水平。

1 振动舒适度研究现状

早在 1931 年,Reihe 和 Meiste^[3]对振动舒适度进行了试验研究,得到了振动频率对振动舒适度影响的近似规律,认为竖向振动加速度感觉阈值为 3 mm/s^2 。Hansen^[4]等根据实测统计研究结果,对满足高层建筑的风振舒适度的加速度水平为:以 6 年为重现期,在 20 min 最大风速下的振动水平不得超过 0.049 m/s^2 为振动阈值。Ellingwood^[5]研究了楼板的振动舒适度问题,给出了板跨和振动舒适度的关系。而 A. Pavic 等^[6]则对人行天桥振动舒适度进行了综述。Chang^[1]针对高层建筑的水平振动舒适度问题进行了研究,通过研究

收稿日期:2011-10-08;修回日期:2011-11-22.

* 基金项目:重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC,2010BB9207).

作者简介:何强(1969-),男,重庆潼南人,高级工程师,从事房屋建筑、市政工程项目管理及工程振动研究.

给出了水平振动的加速度阈值范围:小于 0.05 m/s^2 , 感觉不到; $0.05 \sim 0.15 \text{ m/s}^2$ 可以感觉到; $0.15 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$ 感觉到烦恼; $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$ 范围内则感觉非常烦恼; 当加速度大于 1.5 m/s^2 时则感觉无法忍受。宋永发^[7]应用动力可靠度理论, 分析了风荷载作用下高层建筑水平向振动舒适度的失效概率。

除了从加速度角度出发对振动舒适度进行研究外, 也有学者运用心理物理学方法, 从生理角度研究振动的舒适度问题。文献^[8,9]认为全身振动可能引起人的植物神经等系统的病变, 但局部振动会对人体的中枢神经系统功能、运动功能、末梢循环功能以及骨关节系统造成损伤, 还可能造成大脑皮质功能下降、交感神经功能亢进、免疫球蛋白增加和感觉功能减退等全身性不良反应。朱光汉^[10]认为振动可能对内分泌、前庭器官、植物神经、循环以及消化系统产生不良影响, 产生诸如焦虑、疲劳、劳动能力减退等不良心理效应, 影响人体的舒适度。何浩祥^[11]根据不同姿势下的竖向人体动力模型, 建立了具有非经典阻尼特征的人—结构耦合动力学方程, 提出了频带能量作为评价人体舒适度的方法, 研究认为在一定的振动加速度下, 坐姿下的舒适度最小, 而立姿下人体的振动舒适度次之。

张宽权^[12]基于模糊数学理论, 对舒适度指标体系进行了分析与探讨。马泽升^[13]利用模糊综合和评价法, 提出了汽车振动舒适性指标评价体系, 对汽车振动舒适性进行综合评价。张晓春^[14]结合振动加速度和隶属度的对应关系, 建立了室内人体舒适度的烦恼率模型。宋志刚等^[15]从心理物理学和人机工程学的角度出发, 基于烦恼率方法, 得到了大跨度梁板结构振动舒适度计算方法和振动舒适度计算方法。同时运用 ISO2631 对同一研究对象进行评价表明, 两种评价结果有很大程度上的一致性; 但基于烦恼率舒适度评价方法可以对振动舒适度进行定量评价: 在一定振动强度下, 对不满人数占统计人数比例进行定量估计, 是目前唯一能够对振动舒适度进行量化评价方法。

丁洁民等^[16]对地铁振动引起的场地振动加速度进行了实测, 通过对实测数据的研究提出了基于烦恼率模型的振动舒适度量化评价方法。唐传茵等^[17]提出了基于烦恼率模型的列车振动舒适度评价方法, 通过建立车身振动的仿真模型, 得到了列车振动的烦恼率模型, 并与疲劳—效率降低界限进行比较, 验证了所提出的评价方法。范存新等^[18]研究了虑桩—土—结构耦合作用的对结构加速度响应和振动舒适度的影响。并认为在阻尼比在 $0.015 \sim 0.030$ 时, 考虑桩—土—结构耦合作用, 超高层钢结构的风振舒适度评价偏安全, 而对其他结构型式超高层结构的评价, 会过高估计其风振舒适度。周凌宇^[19]通过数值模拟, 研究了人行荷载激励下, 人行天桥的振动特性及舒适度。

2 振动舒适度评价指标

2.1 NASA 指数^[20]

NASA 指数法是专门针对车辆振动舒适度的。根据统计经验公式, 把空间的振动加速度转换成同主观评价相关的不舒适性指数; 然后按一定关系式求出单一不舒适性指数 NASA, 与容许的 NASA 指数比较, 从而达到对振动舒适度进行评价的目标。容许的单一不舒适性指数 NASA 是振动舒适度的最终评价指标。

2.2 平均吸收功率

21 世纪 60 年代 Pardko^[21]等对人体振动进行了试验研究, 认为可以将人体看作弹性阻尼系统, 对不同频率的振动输入有着不同的响应, 以被人体吸收的机械功率来表示人所受到的振动输入的大小。吸收功率等于输入力 $E(t)$ 与输入速度 $v(t)$ 的积, 平均吸收功率 P_{av} 为:

$$P_{av} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E(t) \cdot v(t) dt \quad (1)$$

2.3 RCL 系数

RCL 系数为振动值与基准曲线值之比值, 方法主要应用于车辆及其他交通工具乘坐舒适性的评价, 基

准容许临界曲线是该评价方法的基础。RCL系数与人体的感觉之间的关系详见表1。

表1 RCL系数

体位	舒适度主观评价结果	RCL系数
站立	好	<5
	没感觉不舒适	5~10
	长时间振动时,感觉痛苦	10~20
	短时间振动时,也感觉痛苦	>20
坐位	没感觉不舒适	<5
	长时间振动时,感觉痛苦	5~10
	短时间振动时,也感觉痛苦	>10

2.4 ISO加速度指标

ISO法采用加速度指标进行评价,是舒适度评价国际上较普遍采用的方法。加速度指标有峰值加速度、计权均方根、连续均方根、计权振动剂量等。

(1) 计权均方根。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (2)$$

式中, $a_w(t)$ 为计权加速度, T 为测量时间常数。波峰因素为加速度峰值与均方根值的比值,RMS法适用于波峰因素小于或等于9的振动评价。当在高的波峰因素可能会低估振动对舒适度的影响。

(2) 连续均方根。连续均方根法是通过使用一个短的时间常数 τ 来考虑偶然性冲击和瞬态振动。测量周期中的最大瞬时振动值 $\text{MTVV} = \max[a_w(t_0)]$ 。

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt} \quad (3)$$

式中, $a_w(t)$ 为瞬时频率计权加速度; τ 为运行平均积分时间, t 为时间(积分变量), t_0 为信号时长。

(3) 计权振动剂量(Vibration Dose Value,VDV)。对于波峰因素高的振动,可采用4次振动计量法。因振动剂量法采用4次方作为计算平均的基础,方法对峰值更加敏感。

$$\text{VDV} = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中, T 是振动信号的持续时间; $a_w(t)$ 为瞬时频率计权加速度。

除上述指标外,还有众多的其他指标,如德国标准采用 K_B 值和 K 值,日本和中国标准采用分贝等。

3 振动舒适度评价标准

3.1 峰值加速度标准

(1) AISC-11标准。美国钢结构协会AISC-11准则主要用于人类自身活动引起建筑物振动的舒适度评价。标准是在ISO基本曲线的基础上针对不同振动环境分别乘以一个因子(办公室和住宅10,室内步行桥和商业区30,室外步行天桥100),得到该环境的峰值加速度限值曲线。

(2) Ellingwood-Tallin准则。Ellingwood-Tallin准则常用于梁板体系舒适度的评价,标准以在2kN的集中荷载作用,结构最大挠度不超过0.5mm时,结构体系稳态和瞬态加速度振动限值,详见表2。

表 2 Ellingwood-Tallin 准则加速度限值

环境状态	稳态振动均 方根加速度/g	加速度限值 阻尼/%	瞬时振动加 速度峰值/g
医院、实验室	0.002	3	0.005
		6	0.010
		12	0.020
宾馆、办公室图书馆等	0.005	3	0.020
		6	0.050
		12	0.100
饭店、剧场	0.010	3	0.050
		6	0.100
		12	0.200
商业中心、仓库、走道和楼梯等	0.020	3	0.050
		6	0.100
		12	0.200

3.2 加权加速度振级标准

(1) 城市区域环境振动标准(GB10070-88)。GB10070-88 给出了垂向振动(Z)的振动舒适度标准,采用了 ISO2631 给出的频率计权,以振级 VAL(dB)作为评价指标,即:

$$VAL = 20\log_{10}(a/a_0) \quad (5)$$

式中, a_0 为参考加速度,取 10^{-6} m/s^2 ,GB10070-88 给出的容许振动强度见表 3。

表 3 容许振动强度

地区	容许强度/dB	
	昼	夜
适用地带		
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

(2) ISO2631/2-1985。ISO2631/2-1985 在研究振动时,定义了人体三维坐标系:以心脏为原点; x 轴为背—胸; y 轴为右侧—左侧; z 轴为脚—头部。各个方向的振动限值见表 4。

表 4 不同环境下振级指标限值

评价对象	评价时间	振级/dB					
		连续、间隙振动和重复性冲击			每天发生数次冲击振动		
		$x(y)$ 轴	z 轴	混合	$x(y)$ 轴	z 轴	混合轴
手术室	全天	71	74	71	71	74	71
住宅	白天	77	80	77~83	107~110	110~113	107~110
	夜间	74	77	74	74~97	77~110	74~97
办公室	全天	83	86	83	113	116	113
车间	全天	89	92	89	113	116	113

(3) 美国国家标准 ANSIS 329。美国标准 ANSIS 329 中规定的住宅类建筑物内振动限值见表 5,坐标定义与 ISO2631/2 - 1985 相同。

表 5 ANSIS329 住宅建筑振级指标限值

评价时间	振级/dB					
	连续、间隙振动和重复性冲击			每天发生数次冲击振动		
	x(y)轴	z 轴	混合轴	x(y)轴	z 轴	混合轴
7:00 ~ 22:00	74 ~ 83	77 ~ 86	74 ~ 83	110	110	110
22:00 ~ 7:00	71 ~ 74	74 ~ 77	71 ~ 74	74	77	74

(4) 《住宅建筑室内振动限值标准(GB/T 50355 - 2005)》^[22]。GB/T50355 - 2005 规定住宅建筑室内垂向振动加速度级限制值,见表 6。表中 1 级限值为适宜达到的限值,2 级限值为不得超过的限值。

表 6 住宅建筑室内振动限值

		dB									
1/3 倍频程中心频率/Hz		1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8
1 级限值	昼间	76	75	74	73	72	71	70	70	70	70
	夜间	73	72	71	70	69	68	67	67	67	67
2 级限值	昼间	81	80	79	78	77	76	75	75	75	75
	夜间	78	77	76	75	74	73	72	72	72	72
1/3 倍频程中心频率/Hz		10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
1 级限值	昼间	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
	夜间	69	71	73	75	77	79	81	83	85	87
2 级限值	昼间	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95
	夜间	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92

(5) 日本标准。日本标准给出的振动限值按照振源划分为 3 类,即工厂、施工设备和交通。工厂对安静的住宅区造成的振动,其限值为 60 ~ 65 dB,工业与商业区为 65 ~ 70 dB;各限值在夜间比白天一般要低 5 dB。施工引起的振动限值为 70 或 75 dB。道路交通振动在住宅区的限值是 65 dB,工业与商业区是 70 dB,夜间要减少 5 dB。

3.3 综合评价标准^[23]

图 1 为 z 向振动加速度“疲劳 - 工作效率”降低限曲线,从图 1 可以看出,同一暴露时间对应的垂向(z)振动加速度限制曲线,由 3 段斜率不同的直线段组成。其中 1.0 ~ 4.0 Hz 段的斜率比 8.0 ~ 80 Hz 段的小,4.0 ~ 8.0 Hz 段为水平段。这主要考虑人体对低频振动(1.0 ~ 4.0 Hz)比高频振动(8.0 ~ 80 Hz)更为敏感,对 4.0 ~ 8.0 Hz 的振动最为敏感,因而对低频振动的加速度大小限制比高频振动的加速度大小限制更严格,对频率为 4.0 ~ 8.0 Hz 振动的加速度限制最严。疲劳 - 效率降低界限,超过界限,将引起人的疲劳,导致工作效率下降。疲劳 - 效率降低界限为舒适性降低界限的 3.15 倍,即它比相应的舒适度降低界限的振动级高 10 dB。暴露极限,人能够保持健康或安全,是人能够承受的上限。它是疲劳 - 效率降低界限的 2 倍,即高于相应的疲劳 - 效率降低界限的振动级 5 dB,是舒适度降低限的 7.3 倍,高于舒适度降低界限振动级高 15 dB(图 2)。

3.4 基于烦恼率的振动舒适度评价

结构振动烦恼率是指某一振动强度下产生烦恼反应的人数占振动强度下所统计的总人数的比例,反映

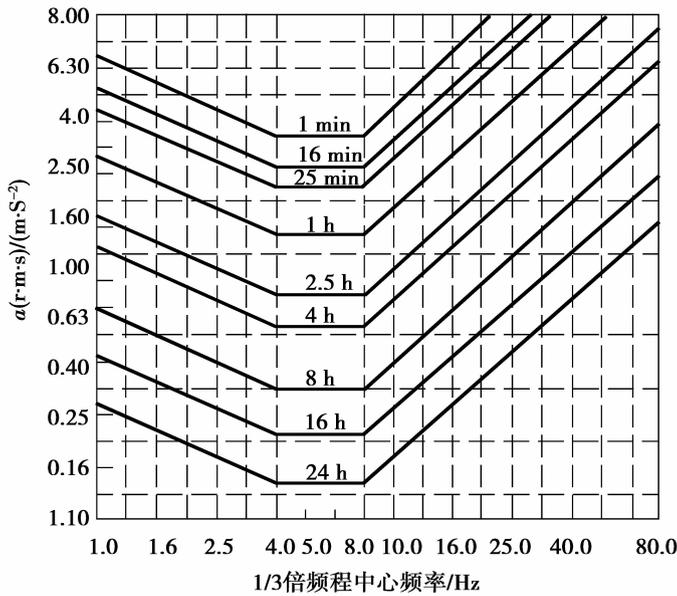


图 1 z 向振动加速度“疲劳 - 工作效率”降低限曲线

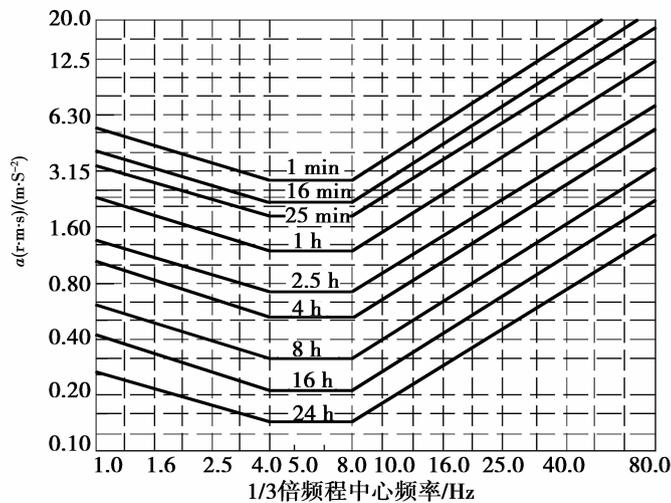


图 2 铅垂向振动加速度暴露极限曲线

了在一定振动环境和强度下产生烦恼或认为振动“不可接受”的人的比例^[24]。烦恼率评价方法就是把量化的容许烦恼率指标作为舒适度评价的方法。烦恼率是振动舒适度标准确定烦恼阈限的依据,所谓烦恼阈限即为保证舒适感所不能超过的振动加速度限值。由于振动主观反应判断的模糊性和随机性,根据集值统计方法和心理学烦恼率计算方法,提出结构振动烦恼率计算方法^[3,24-26]。因人对振动的感受存在差异性,差异性可以用对数正态分布来描述^[27,28],即:

$$f(x|u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}u\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln(u) - u_{\ln(u)})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中, x 和 σ 分别是 u 的期望值和变异系数, σ 取值范围为 0.1 ~ 0.5。

考虑到模糊性和随机性的分布特点,振动加速度为 x 时,连续分布的烦恼率计算式为:

$$A(x) = \int_{u_{\min}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{\ln}} \exp\left(-\frac{(\ln(u/x) - 0.5\sigma_{\ln}^2)^2}{2\sigma_{\ln}^2}\right) \nu(u) du \quad (7)$$

式中, x 为经频率计权后的振动强度; $\sigma_{\ln} = (\ln(1 + \sigma^2))^{0.5}$; $v(u)$ 为振动强度模糊隶属度函数。

根据 ISO2631-2(1989)等振动舒适度评价标准,建筑结构振动加速度在标准给出的振动限值 r_1 以下时,居住在建筑物中的人产生抱怨的可能性是很低的;而当振动加速度达到 $2r_1$ 时,将有相当一部分人表示不满;而当振动加速度达到 $4r_1$ 时,对振动不满的人数比例非常的高。相应加速度水平下的容许烦恼率见表7。

表7 基于容许烦恼率的竖向振动舒适度评价标准(Z向)

评价区域	评价时间	容许烦恼率		
		r_1 下的	$2r_1$ 下的	$4r_1$ 下的
严格要求地区	白天	0.066 7	0.469 4	0.899 4
	夜间	0.066 7	0.469 4	0.899 4
住宅区	白天	0.069 6	0.469 6	0.899 2
	夜间	0.068 3	0.469 6	0.899 3
办公区	白天	0.069 7	0.469 6	0.899 2
	夜间	0.069 7	0.469 6	0.899 2
车间	白天	0.069 8	0.469 6	0.899 1
	夜间	0.069 8	0.469 6	0.899 1

4 结 论

就振动舒适度的研究现状、振动舒适度评价指标与评价标准进行了系统的综述和讨论。振动舒适度评价研究涉及力学、结构工程、统计学和心理物理学等学科的交叉,需要整合科研力量,解决振源问题、土动力问题和轨道—路基—地基—建筑耦合振动的研究等。受轨道结构、路基土体性质及建筑结构型式等诸多因素的影响,这需要在以后进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] CHANG F. Wind and Movement in Tall Buildings[J]. ASCE Journal of Structural Division S,1967(6): 70-72
- [2] PARSONS K. Environmental ergonomics; a review of principles, methods and models[J]. Applied Ergonomics,2000,31(6): 581-594
- [3] 宋志刚. 基于烦恼率模型的工程结构振动舒适度设计新理论[D]. 重庆:重庆大学,2003
- [4] HANSEN R, REED J, VANMARCKE E. Human response to wind-induced motion of buildings[J]. Journal of the Structural Division,1973 99(7): 1589-1605
- [5] ELLINGWOOD B, TALLIN A. Structural serviceability: floor vibrations[J]. Journal of Structural engineering,1984,110(2): 401-418
- [6] ZIVANOVIC S, PAVIC A, REYNOLDS P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review[J]. Journal of sound and vibration,2005,279(1-2): 1-74
- [7] 宋永发,常金鹏,王延龙. 高层建筑的顺风向风振响应分析及舒适度研究[J]. 防灾减灾工程学报,2007,27(4): 484-487
- [8] 日本产业环境管理学会. 公害防止の技術己と法規[M]. 东京:丸善出版株式会社,1992
- [9] 日本噪声控制学会. 地域的环境振动[M]. 东京:技报堂出版株式会社,2001
- [10] 朱光汉,王正玲. 传入人体的振动和环境振动的评价与标准[J]. 振动与冲击,1992(3): 66-70
- [11] 何浩祥,闫维明,张爱林,等. 竖向环境振动下人与结构相互作用及舒适度研究[J]. 振动工程学报,2008,21(5): 446-451
- [12] 张宽权. 舒适度指标的模糊分析[J]. 四川建筑科学研究,2002,28(1): 68-70

- [13] 马泽升,李鹏,宋德朝. 基于模糊综合评价法对汽车振动舒适性评价的研究[J]. 机械,2008,35(6): 27-28
- [14] 张晓春,张辰辰,张磊. 地铁列车振动对临近建筑内人体舒适度的影响研究[J]. 中国矿业大学学报,2009(6): 835-839
- [15] 宋志刚,金伟良. 行走作用下梁板结构振动舒适度的烦恼率分析[J]. 振动工程学报,2005,18(3): 288-292
- [16] 丁洁民,尹志刚. 地铁引起建筑物振动舒适度分析[J]. 振动与冲击,2008,27(9): 96-99
- [17] 唐传茵,张天侠,宋桂秋. 基于烦恼率模型的振动舒适度评价方法[J]. 东北大学学报:自然科学版,2006,27(7): 802-805
- [18] 范存新,张毅,薛松涛. 桩-土-结构相互作用对高层建筑风振舒适度的影响[J]. 振动与冲击,2006,25(3): 90-94
- [19] 周凌宇,肖金敏,周朝阳. 某客运专线新站楼盖天桥人行激励下的振动舒适度计算[J]. 铁道科学与工程学报,2009,6(6): 7-12
- [20] LEATHERWOOD J, DEMPSEY T, CLEVENSON S. A design tool for estimating passenger ride discomfort within complex ride environments[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1980, 22(3): 291-312
- [21] CROLLA D, MACLAURIN E. Theoretical and practical aspects of the ride dynamics of off-road vehicles-part 2[J]. Journal of Terramechanics, 1986, 23(1): 1-12
- [22] 中华人民共和国建设部. 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准(GB/T50355-2005)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [23] 国家技术监督局. 人体全身振动暴露的舒适性降低界限和评价准则(GB/T13442-92)[M]. 北京:中国标准出版社,1992
- [24] 法永生,李东,孙翠华. 人行桥随机人行荷载下的振动分析及其舒适度评价的新方法[J]. 振动与冲击,2008,27(1): 119-123
- [25] 涂瑞和,方丹群. 用模糊数学原理评价城市居民对环境振动的主观反应[J]. 中国环境科学,1990,10(5): 356-359
- [26] 李寿欣,杨建伟. 实验心理学[J]. 现代教育,2006(5): 60-61
- [27] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报,2004(1): 44-51
- [28] 葛勇,无碴轨列车运行引起的环境振动及舒适度研究[D]. 重庆:重庆大学,2009

Research Progress in Evaluation Index and Methods of Environment Vibration Serviceability

HE Qiang¹, LI Bin¹, GE Yong²

(1. Chongqing Jiangbei District City Construction Co., Ltd, Chongqing 400020, China;

2. Chongqing Kaixian County Urban and Rural Construction Committee, Chongqing 405400, China)

Abstract: Through summarization of research results of environment vibration serviceability at home and abroad, this paper expounds development history of vibration serviceability research, introduces current situation of environment vibration serviceability research, then summarizes from vibration serviceability evaluation index and criterion, and finally prospects future trend of environment vibration serviceability evaluation.

Key words: serviceability; environment vibration; evaluation index; evaluation method

责任编辑:田 静