

地铁线路邻近建筑物室内振动烦恼率预测分析*

宋玉香^{1,2}, 唐果^{1,2}, 金阳³, 张诗雨⁴, 刘勇^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室 石家庄, 050043)

(3. 铁建城发(湖州)开发建设有限公司 湖州, 313000) (4. 北京交通大学土木工程学院 北京, 100044)

摘要 为实现地铁线路邻近建筑物室内振动舒适度定量计算, 提出场地振动响应数值模拟与链式衰减公式相结合的预测方法, 得到不同类型建筑物室内振动响应。首先, 以预测振级为自变量, 采用正态分布函数描述人对振动感觉的随机性, 建立地铁线路邻近建筑物室内振动烦恼率模型; 其次, 以石家庄地铁为例, 建立了场地振动预测模型, 借助链式衰减公式, 得到不同类型建筑物的室内振动烦恼率分布规律。研究表明: 建立的烦恼率模型变异系数取0.15时, 均方根误差为0.086, 模型预测精度满足要求; 在设计工况下给出了各类建筑物在不同区域的达标距离, 对于0类区域, I~V类建筑物达标距离分别为12, 14, 20, 44和46 m, 对于5类区域任意距离都达标。该研究成果可为烦恼率评价法在地铁沿线建筑物振动舒适度预测和评估应用提供参考。

关键词 地铁; 室内振动; 建筑物; 振动预测; 烦恼率模型; 舒适度

中图分类号 U211; U231.2

引言

近年来, 地铁运行诱发的地面建筑振动问题日益突出, 影响人们的正常生活, 国际上已将地铁引发的振动污染列为七大环境公害之一^[1], 并对地铁运行引发的建筑物振动舒适性提出了新的要求。

由于烦恼率评价法可以体现人对振动反应的模糊性和随机性, 宋志刚^[2]针对工程结构振动建立了烦恼率模型, 采用振动加速度作为自变量。孙可^[3]对地铁车站邻近地下空间振动效应进行了测试和烦恼率分析, 将计权振动加速度级(vibration level, 简称VL)作为烦恼率函数自变量, 但未考虑变异系数对烦恼率的影响。周俊召等^[4]引入烦恼率模型, 对某地铁线路对应的地面住宅进行实测。以上研究从数学层面提供了振动舒适度的定量计算方法, 但对地铁引发的线路邻近建筑物室内振动舒适度问题采用烦恼率作为评价方法的应用较少。

笔者以石家庄地铁为例, 提出场地振动响应数值模拟与链式衰减公式相结合的预测方法, 得到不同类型建筑物室内振动响应。以VL作为自变量, 采用正态分布函数建立了考虑人主观反应模糊性和随机性的地铁线路邻近建筑物室内振动烦恼率模型, 得到不同类型建筑物的室内振动烦恼率分布规

律, 为地铁施工与运营提供参考。

1 地铁沿线室内振动响应预测

1.1 计算模型

采用多体动力学软件和有限元软件建立列车模型。列车设计参数选用标准地铁A型车, 取6节车厢编组, 建成的整车多刚体模型如图1所示。

利用有限元软件建立道床-隧底实体模型, 在界

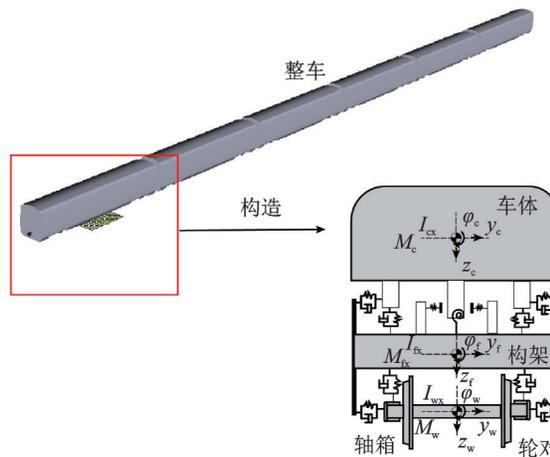


图1 整车多刚体模型

Fig.1 Multi-rigid-body vehicle model

* 石家庄轨道交通有限责任公司科研资助项目(SJZM01B-ZGCSBG005-FW-2019)

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-01-29

面节点处生成质量单元,并在附近形成刚性区域,避免界面节点严重变形失真。基于软件中的Craig-Bampton法,去除道床-隧底实体模型中的刚体模态,实现其柔性。导入道床-隧底模型,并选用柔性轨道模型,采用Timoshenko梁模拟钢轨,采用Bushing力元模拟扣件系统。选用Kik-Piotrowski多点接触算法模拟轮轨间的接触情况。地铁列车运行引发的环境振动响应应以竖向为主,笔者采用上海地铁轨道谱^[5]和Sato短波谱^[6]模拟垂向轨道不平顺。不平顺样本如图2所示。

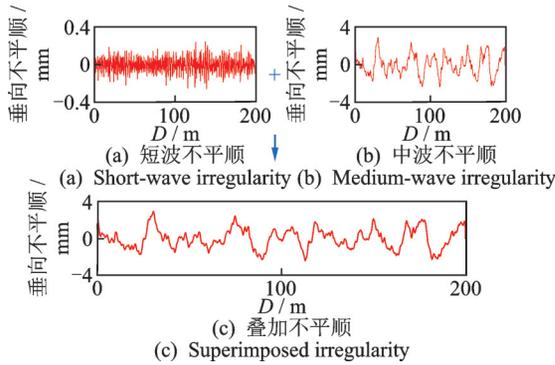


图2 不平顺样本
Fig.2 Irregularity samples

建立的列车-轨道耦合模型车速为80 km/h,荷载范围在50~100 kN之间,轮轨力时程曲线如图3所示。

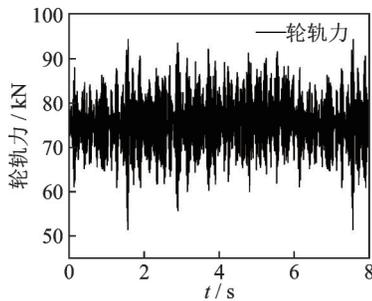


图3 轮轨力时程曲线
Fig3 Wheel-rail force time-history curve

参考石家庄市地铁某区间穿越实际地质情况和相应轨道参数,基于线弹性本构,建立轨道-隧道-地层计算模型如图4所示。土层参数如表1所示。模型尺寸为160 m×54 m×70 m,高度为70 m。地层、道床与衬砌采用实体单元模拟,隧道附近土层网格尺寸取0.2~0.5 m,钢轨采用梁单元模拟。隧道及轨道材料参数如表2所示。选用DTVI2型模拟扣件,将其简化为弹簧-阻尼单元,DTVI2型扣件参数如表3所示。隧道截面为圆形,埋深10 m,模型施加三维一致黏弹性人工边界。采用有限元软件仿真得到列车轮载,模拟双线列车相向行驶。

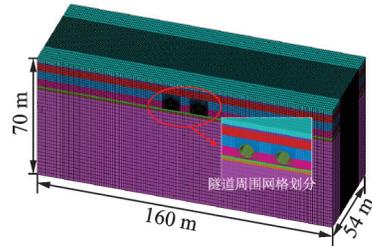


图4 轨道-隧道-地层计算模型
Fig.4 Track-tunnel-strata calculation model

表1 土层参数
Tab.1 Soil layer parameter table

土层	密度/ (g·cm ⁻³)	动弹性模 量/MPa	动泊 松比	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	分层厚 度/m
素填土	1.82	155	0.39	165	2.5
粉细砂	1.86	253	0.38	177	1.0
粉质黏土	1.90	294	0.35	186	4.0
黄土状粉土	1.80	301	0.33	195	5.0
中粗砂	2.00	350	0.34	208	4.2
细中砂	1.95	423	0.32	220	1.0
粉质黏土	2.03	679	0.31	235	1.1
中粗砂	2.10	800	0.30	332	51.2

表2 隧道及轨道材料参数

Tab.2 Tunnel and track material parameters

结构	材料/ 型号	密度/ (kg·m ⁻³)	动弹性模 量/MPa	动泊 松比	厚度/ m	外半 径/m
衬砌管片	C35钢筋	2 500	35 500	0.25	0.300	3.0
道床	混凝土	2 500	35 500	0.25	0.582	—
钢轨	CHN60	7 840	210 000	0.30	—	—

表3 DTVI2型扣件参数

Tab.3 DTVI2 fastener parameters

扣件	刚度系数/(MN·m ⁻¹)		阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	
	垂向刚度 k _z	纵/横向 刚度 k _{xy}	垂向阻尼 c _z	纵/横向 阻尼 c _{xy}
DTVI2型	40.73	8.79	9.90	1.93

1.2 场地振动响应预测及验证

1.2.1 场地振动响应预测

图5为地表拾振点布置图,从隧道轴线正上方开始,每隔10 m设置一个拾振点,即A₁~A₇。

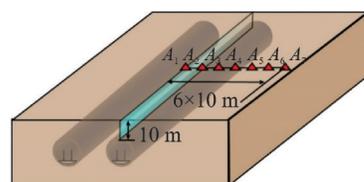


图5 地表拾振点布置图
Fig.5 Layout of ground vibration pickup points

根据有限元分析,得到地表拾振点的最大 Z 振级距隧道中心距离衰减曲线,如图 6 所示。可见,振动响应值最大拾振点并未在隧道中心线正上方,而是在距离隧道 10 m 处,这是因为振动的传播存在局部放大现象。该现象是由近场体波在地表的入射与反射叠加效应以及体波的衰减效应造成的,且横波对“阴影”现象的影响比纵波的影响更大。

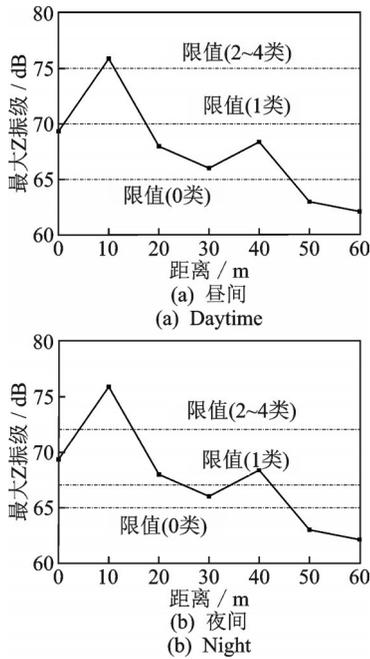


图 6 最大 Z 振级距隧道中心距离衰减曲线

Fig.6 Maximum Z vibration level distance from tunnel center attenuation curve

1.2.2 场地振动模型验证

根据《石家庄市城市轨道交通 3 号线二期工程环境影响报告书》,振动测点位于线路中心线正上方地面处,振动评价指标为累积百分 Z 振级。振动预测值与实测值如表 4 所示。结果显示,预测误差小于 3%,说明建立的计算模型具有较高精度。

表 4 振动预测值与实测值

敏感点位置	车速/ (km·h ⁻¹)	隧道埋 深/m	预测 值/dB	实测 值/dB	预测误 差/%
西仰陵平房	72	15.1	54.9	53.4	2.8
中仰陵村	72	9.1	57.3	55.8	2.7
三教堂村	75	20.1	56.0	54.7	2.4

1.3 室内振动响应预测及验证

1.3.1 室内振动响应预测

振动在楼层传递过程中能力衰减,底层楼板振动大于顶层楼板。以底层楼板为例,取整个建筑物中最大振动响应处进行分析。环境振动预测公式^[7]为

$$VL_{zmax} = VL_{z0max} + C_{vB} \quad (1)$$

其中:VL_{zmax}为预测点最大 Z 振级;VL_{z0max}为列车振动源强;C_{vB}为振动修正(dB),包括列车速度修正值 C_v和建筑物类型修正值 C_B等。

振动预测点位于建筑物室内地面中央(即底层楼板中央),由于已经得到了相应地表拾振点的振动响应,因此列车振动引起的室内振动响应只需考虑建筑物类型修正值。建筑物越重,其基础与大地的耦合损失越大,笔者保守取值, I 类和 II 类建筑物取 7 层, III 类建筑物取 3 层, IV 类建筑物取 1 层,得到的建筑物类型修正值如表 5 所示。各类建筑物室内最大 Z 振级数值如表 6 所示。

表 5 建筑物类型修正值

建筑物类型	HJ453—2018 建议值/dB	修正值/dB
I 类	-1.3×层数(最小取-13)	-9.1
II 类	-1×层数(最小取 10)	-7.0
III 类	-1.2×层数(最小取-6)	-3.6
IV 类	-1×层数	-1.0
V 类	0	0
VI 类	0	0

表 6 各类建筑物室内最大 Z 振级数值

Tab.6 Indoor maximum Z vibration level in various buildings

与隧道中心 线距离/m	I 类/ dB	II 类/ dB	III 类/ dB	IV 类/ dB	V 和 VI 类/dB
0	60.23	62.33	65.73	68.33	69.33
10	66.78	68.88	72.28	74.88	75.88
20	58.89	60.99	64.39	66.99	67.99
30	56.91	59.01	62.41	65.01	66.01
40	59.28	61.38	64.78	67.38	68.38
50	53.89	55.99	59.39	61.99	62.99
60	53.03	55.13	58.53	61.13	62.13

1.3.2 室内振动模拟验证

建立 1 层和 3 层典型砖混结构建筑物模型,层高为 3 m,整体尺寸为 20 m×8 m×15 m,模拟计算建筑物 1 层楼板最大 Z 振级。表 7 为 2 类建筑物室内最大 Z 振级数值对比。结果表明:III, IV 类建筑物最大 Z 振级的预测值与各建筑物最大 Z 振级模拟计算值规律一致;III 类建筑物最大 Z 振级的预测值最大误差不超过 4.41%;IV 类建筑物最大 Z 振级的预测值最大误差不超过 6.12%。可见,III, IV 类建筑物最大 Z 振级的预测值精度较好,其他各类建筑物最大 Z 振级振动预测时同样有良好的精度。

表7 2类建筑物室内最大Z振级数值对比
Tab.7 Comparison table of maximum Z vibration level values for two types of buildings indoor

与隧道中心 线距离/m	Ⅲ类/dB	3层建筑物 预测值/dB	Ⅳ类/dB	1层建筑物 预测值/dB
0	65.73	68.63	68.33	65.03
10	72.28	74.07	74.88	71.81
20	64.39	66.52	66.99	64.07
30	62.41	64.80	65.01	61.03
40	64.78	66.84	67.38	65.46
50	59.39	61.27	61.99	58.42
60	58.53	59.49	61.13	57.87

1.3.3 室内振动实测验证

室内振动测点位于石家庄市轨道交通3号线沿线高柱小区48号楼,该居民楼为5层混凝土结构,测点距右线线路中心点约25.4 m,处于干线两侧,场地分类属4类区域,Ⅲ类建筑物振动实测值为66.1 dB。根据表6可知,室内振动预测值为63.5 dB,误差为3.9%,预测精度良好。

2 地铁沿线室内振动烦恼率模型

2.1 烦恼率模型

烦恼率是指在物理刺激作用下感到烦恼的人数占总人数的比率。考虑到人对振动感受分布的模糊性和随机性,采用模糊数学方法进行量化分析。振动刺激连续性分布情况为

$$A(w) = E[P(X)] = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) f(x) dx \quad (2)$$

其中: $A(w)$ 为烦恼率, $0 \leq A(w) \leq 1$; x 为主观感觉量; $P(x)$ 为隶属度函数; $f(x)$ 为随机性函数。

2.1.1 隶属度函数

人对振动的主观感觉为典型的模糊概念,已有较多实验证明,可用等距尺度来描述人对刺激的感受。根据国际上几组典型的振动数据,验证振动感觉概念隶属度与振级成正比关系,主观感觉量 x 对应的隶属度 $P(x)$ 可表示为

$$P(x) = \begin{cases} 0 & (x < x_1) \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & (x_1 \leq x \leq x_2) \\ 1 & (x > x_2) \end{cases} \quad (3)$$

其中: x 为主观感觉量; x_1 和 x_2 分别为下限阈值和上限阈值,即人能感觉到的主观感觉量最小值和可忍受的主观感觉量最大值,其数值根据经验确定。

2.1.2 随机性函数

人对振动感受性的分布基本服从正态分布和对

数正态分布,以均方根加速度为主观感觉量描述。主观感觉量 x 的随机性采用正态分布函数描述,其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

其中: μ 和 σ 分别为主观随机变量的期望值和标准差。

将 μ 取为主观感觉量实测值 w ,并将式(3),(4)代入式(2),系数 $a=1/(x_2-x_1)$, $b=-x_1/(x_2-x_1)$; $x \in (-\infty, +\infty)$,得到烦恼率函数表达式为

$$A(w) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-w)^2}{2\sigma^2}} (ax+b) dx + \int_{x_2}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-w)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

其中: σ 为主观随机变量的标准差, $\sigma = \delta\mu$; δ 为变异系数。

在地铁环境振动评价中,常用VL作为主观感觉量描述指标,则上下限阈值 x_1 和 x_2 分别代表VL₁和VL₂, w 代表振动烦恼阈限VL₀。

振动烦恼阈限即振动主观感觉量限值,当振动主观感觉量大于振动烦恼阈限时,需要采取治理措施。烦恼阈限表达式^[8]为

$$VL_0 = \sum VL_i A_i / \sum A_i \quad (6)$$

其中:VL₀为振动烦恼阈限;VL_i为第*i*个振动主观感觉量实测值大小; A_i 为VL_i对应的烦恼率; A_i 和VL_i均通过实际调查结果确定。

2.2 烦恼率分级

参考心理物理学方法以及国际评价标准ISO 2631-1:1997,将烦恼率划分等级,如表8所示。

表8 烦恼率分级

Tab.8 Annoyance rating

烦恼等级	人的感觉	烦恼率
1	没有不舒适	0
2	有点不舒适	0~0.25
3	轻度不舒适	0.25~0.50
4	不舒适	0.50~0.75
5	非常不舒适	0.75~1.00
6	无法忍受	1.00

2.3 烦恼率模型的验证

涂瑞和等^[9]根据实际调查发现,我国城市居民室内振动烦恼阈限振级为76 dB,经线性插值可得对应的烦恼率约为0.75。不同区域的烦恼阈限

存在差异,但烦恼阈值所对应的烦恼率可视为定值。根据ISO 2631-2:1989可知,上限阈值与下限阈值之差约为12 dB。我国城市区域环境振动标准GB 10070—88仅规定了各类区域的振动烦恼阈值VL₀(室内振动描述指标为最大Z振级)。变

异系数分别取0.05,0.1和0.15,令烦恼率为0.75,VL₂=VL₁+12 dB,代入式(6)可确定各类区域的室内振动上下限阈值,如表9所示。2~4类区域(昼间)室内振动烦恼率预测值与调查值如图7所示。

表9 各类区域的室内振动上下限阈值

Tab.9 Indoor vibration upper and lower thresholds for various areas

dB

区域类别	昼间						夜间							
	VL ₀	δ=0.05		δ=0.1		δ=0.15		VL ₀	δ=0.05		δ=0.1		δ=0.15	
		VL ₁	VL ₂	VL ₁	VL ₂	VL ₁	VL ₂		VL ₁	VL ₂	VL ₁	VL ₂	VL ₁	VL ₂
0类	65	56	68	54	66	52	64	65	56	68	54	66	52	64
1类	70	61	73	59	71	57	69	67	58	70	56	68	54	66
2类	75	66	78	64	76	62	74	72	63	68	61	73	59	71
3类	75	66	78	64	76	62	74	72	63	68	61	73	59	71
4类	75	66	78	64	76	62	74	72	63	68	61	73	59	71
5类	80	71	83	69	81	66	78	80	71	83	69	81	66	78

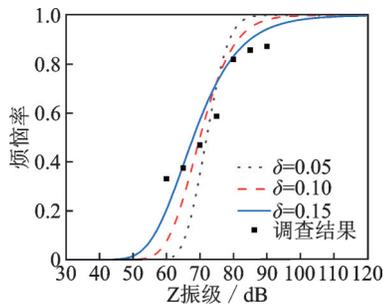


图7 室内振动烦恼率预测值与调查值

Fig.7 Predicted value and survey value of indoor vibration annoyance rate

采用均方根误差(root mean square error,简称RMSE)衡量预测值与实际调查值的平均偏差程度,其公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (7)$$

其中: X_{obs}为实际调查值; X_{model}为预测值。

表10为不同变异系数下的均方根误差。可见,当变异系数取0.15时,烦恼率预测模型的预测能力最好。各类区域室内振动烦恼率曲线如图8所示。

表10 不同变异系数下的均方根误差

Tab.10 Root mean square error under different values of coefficient of variation

变异系数 δ	均方根误差
0.05	0.197
0.10	0.133
0.15	0.086

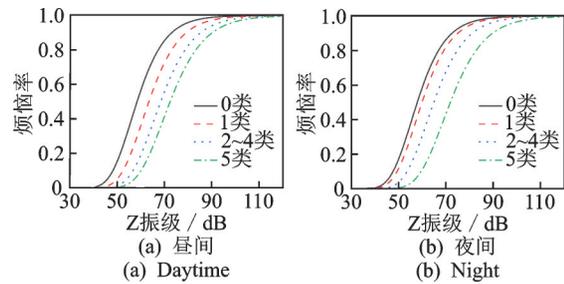


图8 各类区域室内振动烦恼率曲线

Fig.8 Indoor vibration annoyance rate curve of various regions

3 地铁沿线室内振动烦恼率预测

对不同类型的建筑物,取变异系数为0.15,根据各类区域的上下限烦恼阈值,计算振动响应最大处的烦恼率值。昼夜间不同类型建筑物室内振动烦恼率随距离衰减曲线如图9,10所示。可以看出:对于底层楼板,根据HJ 453—2018,不同类型建筑物修正值差异较大,各区域条件下对应的室内振动烦恼率结果也不相同;对于1~4类区域,相同条件下夜间情况烦恼率高于昼间情况。

I类建筑物室内最大Z振级和烦恼率随距离衰减曲线如图11所示。可见,最大Z振级和烦恼率随着距离衰减的趋势大致相同。表11为建筑物在不同类区域的烦恼率达标距离。以最大Z振级为指标,建筑物在不同类区域的最大Z振级达标距离如表12所示。结果显示,振动评价法与烦恼率评价法具有一致性,除III类建筑在2,3,4类场地达标距离不同外,其他各类建筑物达标距离基本相同。这是因为III类建筑物取3层建筑修正值偏大,导致烦恼率结果偏小。

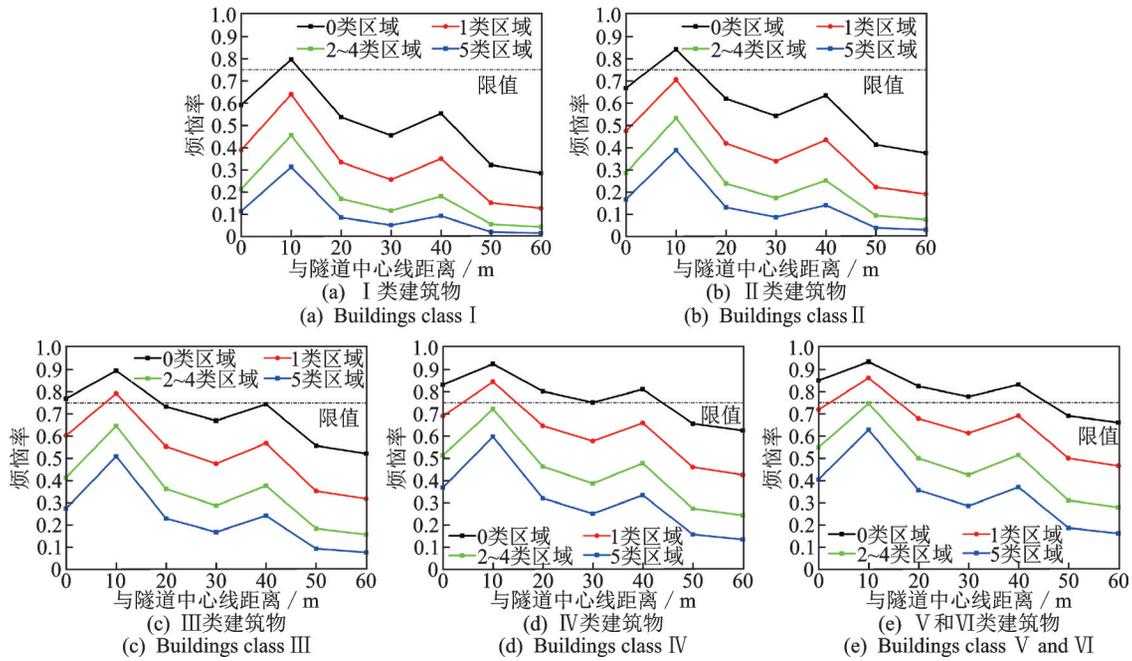


图9 不同类型建筑物室内振动烦恼率随距离衰减曲线(昼间)

Fig.9 Attenuation curve of indoor vibration annoyance rate with distance of various buildings (daytime)

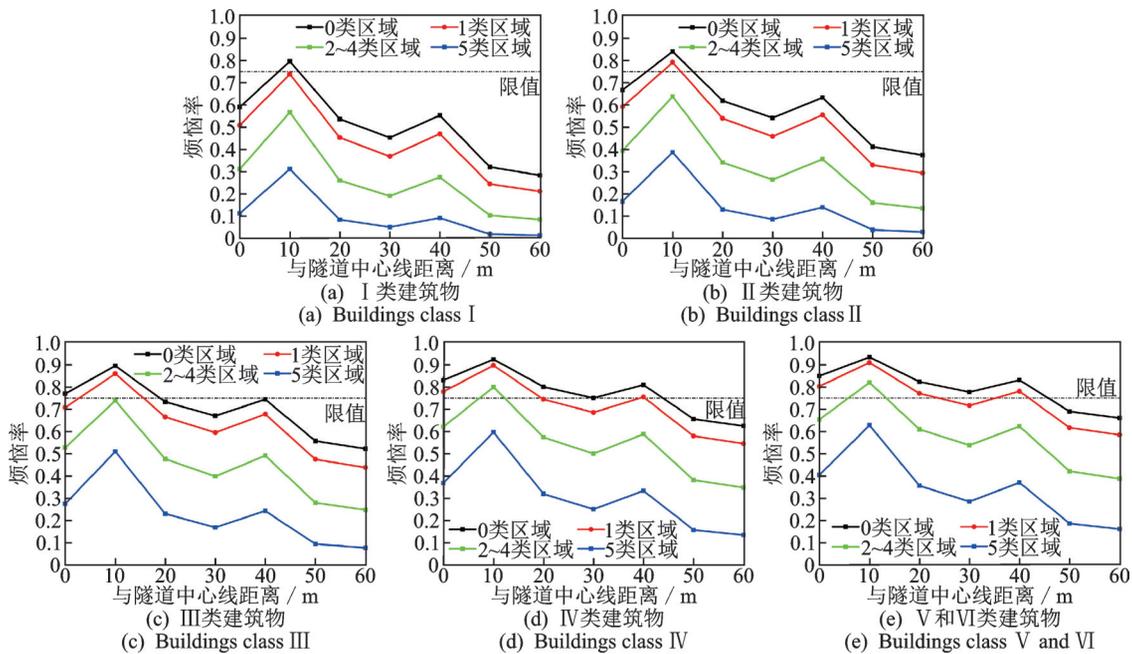


图10 不同类型建筑物室内振动烦恼率随距离衰减曲线(夜间)

Fig.10 Attenuation curve of indoor vibration annoyance rate with distance in various buildings (night)

4 结论

1) 在适应我国现有地铁振动控制相关标准的基础上,提出以VL作为烦恼率函数自变量,基于振动感觉概念隶属度与振级之间的正比关系,采用等距尺度表示隶属度函数,采用正态分布函数描述人对振动感觉的随机性。

2) 建立了适用于地铁沿线建筑物室内振动舒适度定量计算的烦恼率模型,分析了变异系数的影

响并与调查结果进行比较,验证了烦恼率模型和相关参数取值的合理性。

3) 提出一种半模拟半经验预测方式预测室内振动,计算分析了地铁沿线的室内振动烦恼率分布情况,确定出各类建筑物烦恼率达标距离。对比现行标准下以最大Z振级为指标得到的达标距离,结果在具有一致性的情况下,烦恼率指标结果更精确。此外,该结果可为烦恼率评价法在地铁沿线建筑物振动预测和评估、地铁线路规划或新建建筑物

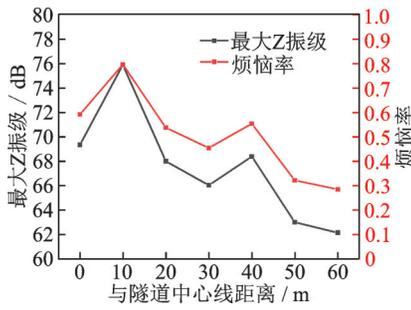


图11 最大Z振级和烦恼率随距离衰减曲线

Fig.11 Maximum Z vibration level and annoyance rate decay curve with distance

表11 建筑物在不同类区域的烦恼率达标距离

Tab.11 The distance to meet the standard of trouble rate of buildings in different types of areas m

区域	建筑物				
	I类	II类	III类	IV类	V和VI类
0类	12	14	40	44	46
1类	0	12	17	40	42
2类	0	0	0	12	14
3类	0	0	0	12	14
4类	0	0	0	12	14
5类	0	0	0	0	0

表12 建筑物在不同类区域的最大Z振级达标距离

Tab.12 The distance to meet the standard of maximum Z of buildings in different types of areas m

区域	建筑物				
	I类	II类	III类	IV类	V和VI类
0类	10~20	10~20	40~50	40~50	40~50
1类	0	10~20	10~20	40~50	40~50
2类	0	0	10~20	10~20	10~20
3类	0	0	10~20	10~20	10~20
4类	0	0	10~20	10~20	10~20
5类	0	0	0	0	0

选址提供参考。

4) 由于人对振动的烦恼反映具有较强的随机性,调查结果不能覆盖所有情况,应根据调查,及时更新和完善烦恼率模型。

参 考 文 献

[1] 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(1): 44-51.
XIA He, CAO Yanmei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 44-51. (in Chinese)

[2] 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]. 杭州: 浙江大学, 2003.
[3] 孙可. 地铁车站邻近地下空间振动效应测试、模拟与烦恼度评价[D]. 南京: 南京大学, 2016.
[4] 周俊召, 张天琦, 王迪瀚, 等. 地铁列车运行引起地面住宅振动烦恼率研究——以某城市地铁线路对应地面住宅为例[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 169-173.
ZHOU Junzhao, ZHANG Tianqi, WANG Dihan, et al. Research on annoyance rate of ground residential vibration caused by moving metro train: a case study of corresponding ground dwellings of a city metro line [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(6): 169-173. (in Chinese)
[5] 卢伟, 马帅, 高亮, 等. 北京地铁线路轨道不平顺谱分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 101-106.
LU Wei, MA Shuai, GAO Liang, et al. Analysis of track irregularity spectrum of the Beijing subway lines [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 101-106. (in Chinese)
[6] SATO Y. Study on high frequency vibration in track operation with high-speed trains [J]. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 1977, 18(3): 109-114.
[7] 环境保护部. HJ 453—2008 环境影响评价技术导则城市轨道交通[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
[8] 申道明, 唐和生, 胡长远, 等. 地铁运行引起室内二次辐射噪声烦恼度阈值分析[J]. 结构工程师, 2013, 29(1): 40-46.
SHEN Daoming, TANG Hesheng, HU Yuanyuan, et al. Analysis on annoying threshold of subway induced ground-borne noise in buildings [J]. Structural Engineers, 2013, 29(1): 40-46. (in Chinese)
[9] 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.
TU Ruihe, FANG Danqun. Evaluating the subjective response of urban residents to environmental vibrations using the principles of fuzzy mathematics [J]. China Environmental Science, 1990, 10(5): 356-359. (in Chinese)



第一作者简介: 宋玉香, 女, 1970年6月生, 博士、教授。主要研究方向为地下工程。曾发表《隧道结构系统可靠度研究》(《岩土力学》2008年第28卷第3期)等论文。
E-mail: songyuxiang36262@163.com

通信作者简介: 刘勇, 男, 1970年2月生, 博士、教授。主要研究方向为隧道及地下工程。
E-mail: liuyong36262@163.com