

面向多因素的振动舒适度限值相关性研究

曹雷¹, 陈隽²

(1. 福建江夏学院工程学院, 福建 福州 350108; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 本文基于群智感知搜集的真实环境中的振动舒适度大规模数据集, 利用最大信息系数分析限值与影响因素的相关性, 找到关键因素(振动峰值比、人身体质量指数、年龄和楼层); 给出振动限值与关键因素参量的拟合关系; 通过正态分布验证振动限值真实值与拟合值残差呈正态分布, 给出相应的 95% 置信区间。并提出一种关键因素值已知时基于概率的振动舒适度预测模型。

关键词: 振动限值; 关键因素; 置信区间; 最大信息系数; 群智感知

中图分类号: TU318⁺.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202311062

Coefficient analysis between vibration serviceability limits and relevant multi-factors

CAO Lei¹, CHEN Jun²

(1. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Vibration limit is one of the most essential contents in vibration serviceability research. Former studies showed that many factors, such as biological and environmental factors, significantly affected vibration limits deeply. As a reason of defects in traditional research, such as small scale data and unreal test environment, quantitative relationships between vibration limits and these factors stayed unknown. Based on data collected by crowd sensing in real environment, crest factor of vibration/ BMI/ human age/ floor of building were found key factors by using maximal information coefficient (MIC) in coefficient analysis. Functional relationship and 95% confidence intervals between vibration limits and key factors were proposed, respectively. Lilliefors test and normal probability plot show that residuals between fitted values of limits and measured ones follow a normal distribution. A novel approach of estimating vibration serviceability based on probability is proposed when key factors and vibration magnitude are known.

Keywords: vibration limits; key factors; confidence intervals; MIC; crowd sensing

振动舒适度问题指由振动引起的人体不舒适或对人认知行为、精密操作的干扰。随着材料科学的进步, 建筑安全性问题^[1]逐渐得到解决, 舒适度问题逐渐得到重视。同时因人们对建筑美学和功能多元化要求的提高, 大跨、高耸结构日益增多, 而此类结构有基频低、重量轻、阻尼小的特征, 相较传统建筑更容易因振动而产生舒适度问题^[2]。

振动限值是振动舒适度研究最重要的内容之一。以往研究表明影响振动舒适度的因素包括: 振动因素(振动强度、频率^[3]、方向^[4]等)、受测者心理因素(对振动的预期^[5]、主观模糊性^[6]等)、受测者生理因素^[7](性别、年龄、身高等)和环境因素^[8](楼层、场所类别、噪声等)。在众多因素中找到与限值

相关性大的关键因素, 得到关键因素与限值之间的定量关系, 对建筑设计和相关评价有十分重要的意义。

受限于仪器价格昂贵无法大规模布置且维护困难, 传统振动舒适度研究多在振动台(椅)等环境参数由人控制的模拟环境中进行, 其振动形式与真实场景也有很大区别^[9]; 传统研究还存在样本容量小、代表性差的缺陷^[10], 样本无法涵盖范围大、种类多的人群生理特征和环境特征。因此传统研究大多仅考察振动的强度、频率和方向对振动限值的定量影响, 少部分研究^[7,11]考察了受测者生理、心理和环境因素对限值的定性影响。非真实的试验要素和代表性差的小样本使得现有振动限值彼此差异大且适用性差^[10,12]。

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-03-18

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J05069); 国家自然科学基金资助项目(52178151)

由于影响因素种类较多,各因素和限值的相关性分析有以下特点:因素与限值关系可能为非线性^[12-13];相关性系数需要归一化以便对比。但传统分析工具无法满足要求:Pearson 系数、Spearman 系数不适用于非线性关系;最邻近节点算法和核密度估计无法归一化^[14-15];Kendall 系数对单调性敏感^[16-17]、可靠性低;无法适用于如“场所类型”等分类因素与限值之间的相关性分析。故目前缺乏因素与限值的相关性研究。

曹雷等^[10]在前置研究中进行了基于在线大数据的振动舒适度调查,通过设计一款小程序并广泛传播,鼓励受测者上传手机所测振动信号和包含各影响因素信息的问卷结果,得到了包含振动信号和 16 种因素的 8000 余条数据。通过数据清洗最终得到 3223 条有效数据。

基于前置研究,本文用最大信息系数^[13](maximum information coefficient, MIC)给出各因素与限值的相关性系数,通过 Kruskal-Wallis 检验验证了 MIC 的有效性;选取相关性大的 4 种关键因素与振动限值拟合;对限值拟合值与实测值的残差进行了正态分布检验,证明关键因素参量值相同时限值呈正态分布;最后给出了限值的置信区间和基于概率的振动舒适度预测模型。

1 数据采集及统计

1.1 数据采集内容

本研究搜集信息包括振动信息、受测者生理信息、环境信息和表示受测者对振动主观感受的 6 种语义标签,具体类别和取值范围如表 1 所示。表示振动强度时采用 6 种振动指标,如表 2 所示。

1.2 数据采集方法及统计

数据采集和清洗的技术路径如图 1 所示。大数据研究具有低价值特征,在之前研究^[10]中对搜集数

表 1 振动舒适度在线调查信息

Tab. 1 Information collected by online investigation of vibration serviceability

信息类别	取值范围
振动强度	0.0011~9.7(以振动均方根值表示,单位 m/s ²)
振动方向	竖直向、水平向、其他
振动发生频率	非常频繁、较频繁、不频繁
CF	0.356~56.5
振源类型	人、交通、风、机械、施工、其他
年龄	10~79 岁
性别	男、女
身高	132~189 cm
体重	28~165 kg
BMI	18.0~31.6
活动状态	休息、学习、行走、奔跑、其他
身体姿势	坐姿、站姿、卧姿、其他
楼层	1~58 层
场所类型	室内、路边、地铁、人行天桥、其他
经度	-157.81°~139.78°
纬度	19.77°~53.47°
评价振动语义标签	没有觉察、轻微觉察、明显觉察、轻微不适、强烈不适、难以忍受

注:CF(crest factor)为振动峰值比,指振动加速度的峰值与加速度均方根值的比值。

表 2 所有 6 种振动指标

Tab. 2 All 6 types of vibration indicators

振动指标	缩写	计算公式
加速度峰值	peak	$\max(a_w(t))$
加速度均方根	rms	$\left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt\right)^{\frac{1}{2}}$
振动剂量值	VDV	$\left(\int_0^T a_w^4(t) dt\right)^{\frac{1}{4}}$
加速度四次均方根	rmq	$\left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4(t) dt\right)^{\frac{1}{4}}$
1 s 最大瞬时振动值	1 s MTVV	$\max\left(\left(\frac{1}{\tau} \int_{1-\tau}^1 a_w^2(t) dt\right)^{\frac{1}{2}}\right)$
0.5 s 最大瞬时振动值	0.5 s MTVV	$\max\left(\left(\frac{1}{\tau} \int_{0.5-\tau}^{0.5} a_w^2(t) dt\right)^{\frac{1}{2}}\right)$

注: $a_w(t)$ 为频率加权后的加速度时程; T 为振动时长; τ 为运行平均积分时间。

据清洗后,证明其样本代表性满足要求^[7],得到由

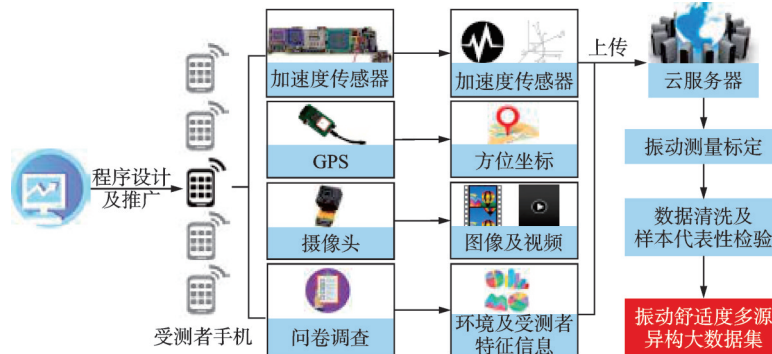


图 1 数据采集技术路径

Fig. 1 Technology path of data collection

3223 条数据构成的数据集。

1.2.1 生理特征统计

样本中男性占比 48.9%，女性占比 51.1%。《第七次全国人口普查公报(第四号)》^[18]显示中国男性占比 51.2%，女性占比 48.8%。

样本中男女平均身高和体重统计值与《第五次国民体质监测公报》^[19]统计值的对比分别如表 3 和 4 所示。由表 3 和 4 可见,本研究覆盖人群的性别、各年龄段身高体重平均值皆接近官方统计结果,说明本研究所用样本能较好地反映总体人群特征。

表 3 各年龄组平均身高统计值对比

Tab. 3 Comparison of statistic of average height of different age groups

年龄/岁	样本统计值/cm		官方统计值/cm	
	男性	女性	男性	女性
20~24	173.4	163.9	172.6	160.6
25~29	175.3	162.5	172.1	159.8
30~34	173.5	160.0	171.4	159.1
35~39	173.4	159.7	170.4	158.6
40~44	174.1	160.0	169.4	158.0
45~49	170.2	157.2	168.7	157.5
50~54	169.8	159.6	167.9	157.2
55~59	170.5	161.0	167.5	157.0

表 4 各年龄组平均体重统计值对比

Tab. 4 Comparison of statistic of average weight of different age groups

年龄/岁	样本统计值/kg		官方统计值/kg	
	男性	女性	男性	女性
20~24	62.0	50.7	70.4	55.7
25~29	69.1	51.9	72.8	56.7
30~34	67.5	58.4	74.3	58.0
35~39	69.8	63.4	74.0	59.1
40~44	71.5	59.8	73.2	59.7
45~49	74.6	53.1	72.5	60.1
50~54	70.6	62.7	71.6	60.8
55~59	74.8	61.8	71.0	60.7

受测者受振时状态所占百分比依次为:休息 45%、工作 32%、行走 21%、跑步 1%、其他 1%。受测者受振时身体姿态所占百分比依次为:坐姿 57%、站姿 32%、卧姿 11%。

1.2.2 非生理特征统计

振动发生各场所类型所占百分比依次为:建筑内 80%、路边 17%、地铁 1%、人行天桥 1%、其他 1%。

振源各类型所占百分比依次为:人 37%、交通 25%、风 18%、机械 13%、施工 6%、其他 1%。

峰值比分布情况为:峰值比 $\in(6,9]$ 占 25%,峰

值比 >9 占 75%。几乎不存在小峰值比振动。

2 “因素-限值”的相关性分析

MIC 本质上是通过分箱算法归一化后的互信息。KOWALSKA-KOCZWARA 等^[13]提出的 MIC 具有以下优点:

(1)普适性,即能够正确地衡量不同函数、非函数形式的相关性。

(2)归一性,即相关性分析工具所得变量之间的相关系数始终在 $[0,1]$ 之间。

(3)一致性,即数据存在混乱时,该工具给出各相关系数随着混乱程度变化的幅度一致。

然而,原文仅验证了数值型变量,未对场所类型这种分类型变量给出验证,且已有研究^[20-21]表明某些情形下 MIC 可能失效。因此本文借助 KW 检验验证 MIC 在分类变量中的有效性。

2.1 检验原理

为了评价分类变量与限值的相关性,可用方差分析。最常见的方差分析之一为 F 检验。

以本研究所搜集数据为例,分类变量 G 取值范围为 $1, 2, \dots, k$, 将所有数据构成的数据集 D 按该分类变量分为 k 组(见表 5), 假设各总体为等方差正态分布时, 各组限值均值为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ 。

表 5 以分类变量 G 将数据集 D 分组

Tab. 5 Grouping dataset D by categorical variables G

序号	$G=1$	$G=2$	\dots	$G=k$
1	x_{11}	x_{12}	\dots	x_{1k}
2	x_{21}	x_{22}	\dots	x_{2k}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
b	x_{b1}	x_{b2}	\dots	x_{bk}

假设变量 X 与振动限值相互独立, 即相关性为 0 时, 则下列零假设为:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (1)$$

如分类变量与限值有关, 则 H_0 假设不应成立。

F 检验的检验量为 F 值, 根据 F 值查询 p 值, p 值表示拒绝 H_0 假设是错误的概率。

然而, 由于 F 检验的前提是数据服从正态分布或偏度较小的偏态分布且需要齐性方差, 本研究所得限值呈严重的偏态分布(见图 2), 且不一定能保证各组方差齐性, 因此 F 检验不适用。

本文采用的是基于 F 检验改进的 KW 检验。KW 检验的本质是秩和检验^[22], 前提是数据连续分布且各组数据分布近似^[23]。本研究所采用的数据来

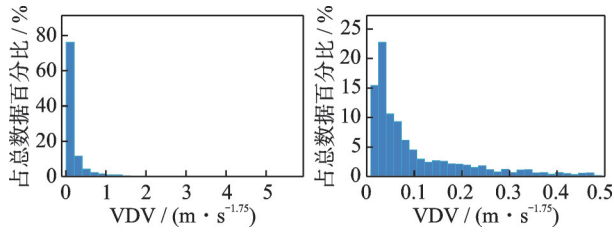


图2 限值的偏态分布

Fig. 2 Limits following skewed distribution

自于同一数据集,数据采集是完全随机的,因此可以认为数据按分类变量分组后的各组分布相同。

用KW 检验相关性时,以觉察限值为例,将所有语义标签为“轻微觉察”的数据中的振动强度从小到大依次给秩 R_{ij} (见表6)。

表 6 以分类变量 G 将数据集 D 分组后数据的秩

Tab. 6 Ranks of dataset D grouped by categorical variables G

秩	$G=1$	$G=2$...	$G=k$
1	R_{11}	R_{12}	...	R_{1k}
2	R_{21}	R_{22}	...	R_{2k}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	R_{n11}	R_{n22}	...	R_{nk}
秩和	R_1	R_2	...	R_k

由表6可知,分类变量 $G=j$ 对应组的秩平均为:

$$\bar{R}_j = \frac{R_j}{n_j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} R_{ij}}{n_j} \quad (2)$$

式中, R_j 为 $G=j$ 对应组样本的秩的和; n_j 为对应样本的秩。

将对应觉察限值的数据混合后的秩和为 $R_{..}$, 混合数据的秩的平方和为 $\sum \sum R_{ij}^2$, 由此可得混合数据各秩的总均方差为:

$$MST = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=1}^k (R_{ij} - \bar{R}_{..})^2}{n-1} = \frac{n(n+1)}{12} \quad (3)$$

式中, $\bar{R}_{..}$ 为 $G=j$ 组内各元素的平均值; n 为最大秩。

各组间方差为:

$$sst = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{R}_j - \bar{R}_{..})^2 = \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - \frac{n(n+1)^2}{4} \quad (4)$$

最终可得 KW 检验的检验值 H 值为:

$$H = \frac{sst}{MST} = \frac{12}{n(n+1)} \sum \frac{R_j^2}{n_j} - 3(n+1) \quad (5)$$

零假设中 H 值应服从自由度为 $k-1$ 的 $\chi^2(k-1)$ 分布, 相应 p 值表示拒绝零假设为错误的概率。

由于 p 值表示拒绝“分类变量各值对应的振动限值的均值相等”假设错误的概率, 而该假设等价于“分类变量与限值相关性为0”, 因此可认为 p 值的大

小反映了各分类变量与振动限值之间的相关性。 p 值越大, 说明相关性越弱。

对于数值变量, 可先将变量分成若干组, 再将分组后各组作为新的分类变量。

2.2 相关性分析及 KW 检验验证

在计算振动强度时已将表1中的振动方向包含在内, 因此利用 MIC 给出 14 种影响因素与振动限值的相关性系数。考虑到振动限值分为反映受测者是否觉察到振动的“觉察限值”和反映受测者是否因振动感觉不舒适的“舒适限值”, 分别给出 14 种因素与觉察限值和舒适限值的 MIC 系数, 如图3和4所示。振动强度采用 6 种指标。红色表示分类变量, 蓝色表示数值变量。

将数值变量进行聚类分组, 组数与分类影响因素大致相同(4~6组), 用 KW 检验评价数值变量与振动限值相关性。KW 检验评价 14 种影响因素与觉察限值和舒适限值的相关性分别如图5和6所示, p 值越小, 相关性越大。为了便于和 MIC 系数比较, 同样采用了 6 种振动强度指标, 且纵坐标取对数。

在对比 MIC 和 KW 检验评价分类变量与限值的相关性时, 均发现身体姿势和振动发生频率与觉察限值的相关性较高(图3和5), 场所类型和身体姿势与舒适限值相关性较高(图4和6), 而活动状态和振动发生频率与觉察限值/舒适限值相关性均较低。

由此可见, 在评价分类变量与振动限值相关性时, 利用 MIC 所得结论与 KW 检验结果基本一致, 即 MIC 可用于评价分类变量的相关性。

值得注意的是: KW 检验在评价相关性时, 出现了 $p=0$ (图5)和 $p=1$ (图6)的情形, 这显然与实际不符, 因此 KW 检验仅可作为定性的验证手段, 不能单独衡量变量之间的相关性。

2.3 关键因素确定

由图3和4可知: 与觉察和舒适限值相关性最强的是峰值比, 但 rms 限值与峰值比相关性低, 原因是 rms 不适用于评价高峰值比振动对舒适度的影响^[24-25], 而本研究搜集数据峰值比较大。

除峰值比外, 与觉察限值相关性较大的有纬度、BMI、年龄和楼层; 与舒适限值相关性较大的有场所类型、身体姿势、年龄、纬度、楼层和 BMI。

考虑到纬度对振动舒适度影响难以解释, 且分类变量难以以拟合公式的形式体现其对振动限值的影响。最终选择峰值比、楼层、BMI 和年龄为关键因素与振动限值进行拟合。

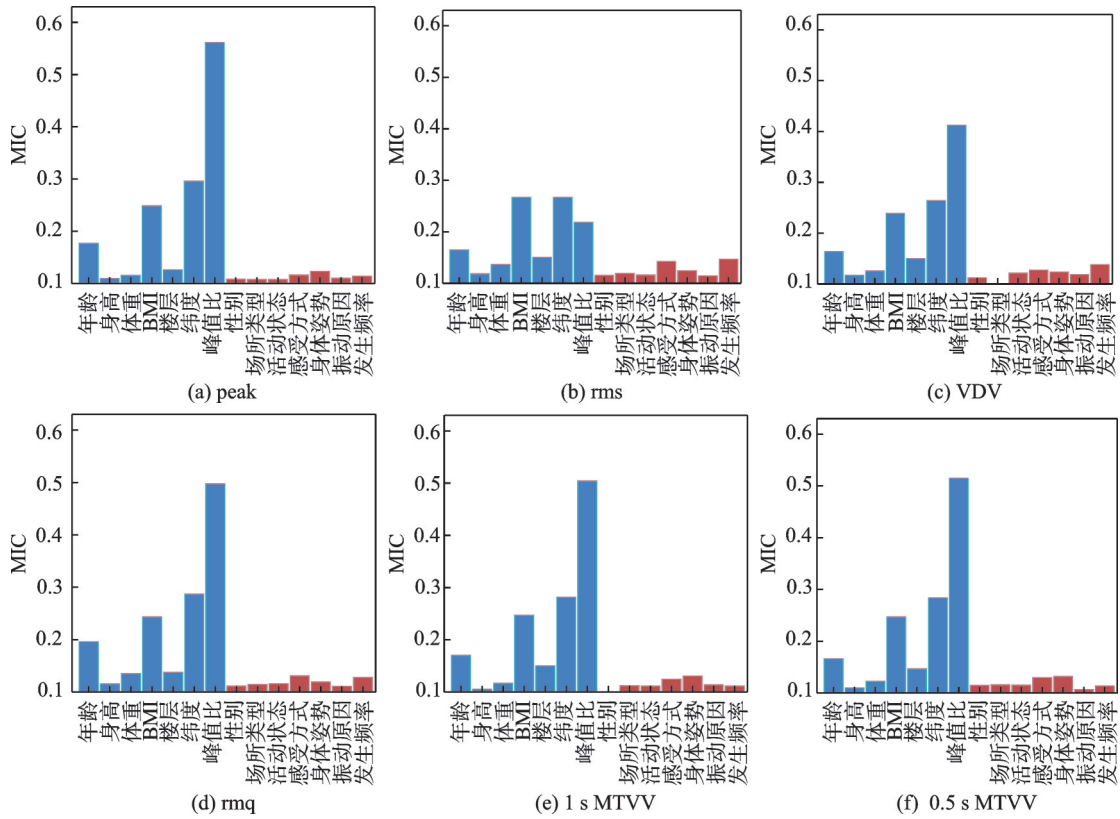


图3 各因素与觉察限值的MIC系数

Fig. 3 MIC coefficient between perception limits and each factor

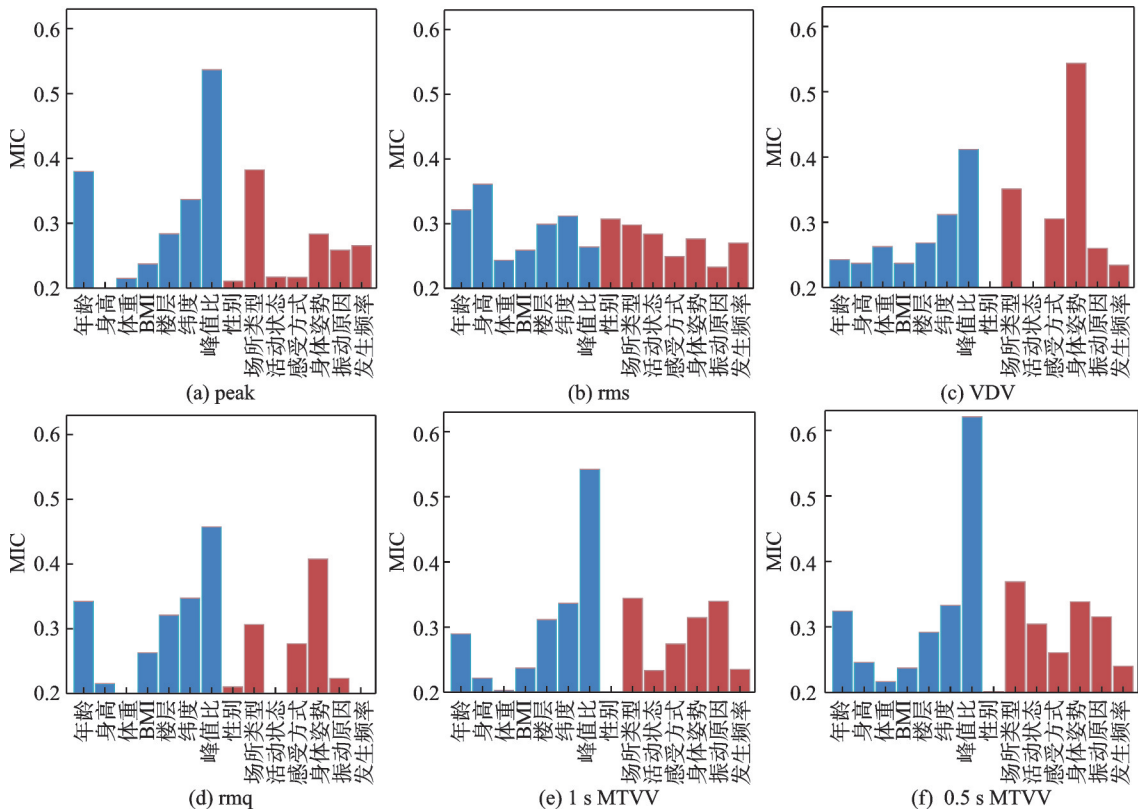


图4 各因素与舒适限值的MIC系数

Fig. 4 MIC coefficient between comfort limits and each factor

3 “因素-限值”拟合及残差检验

通过观察振动限值随关键因素的分布规律

以及部分研究结论,选择适当的函数形式进行拟合。

采用t检验和Lilliefors检验进行限值拟合值与实测值残差的正态分布检验。Lilliefors检验由KS

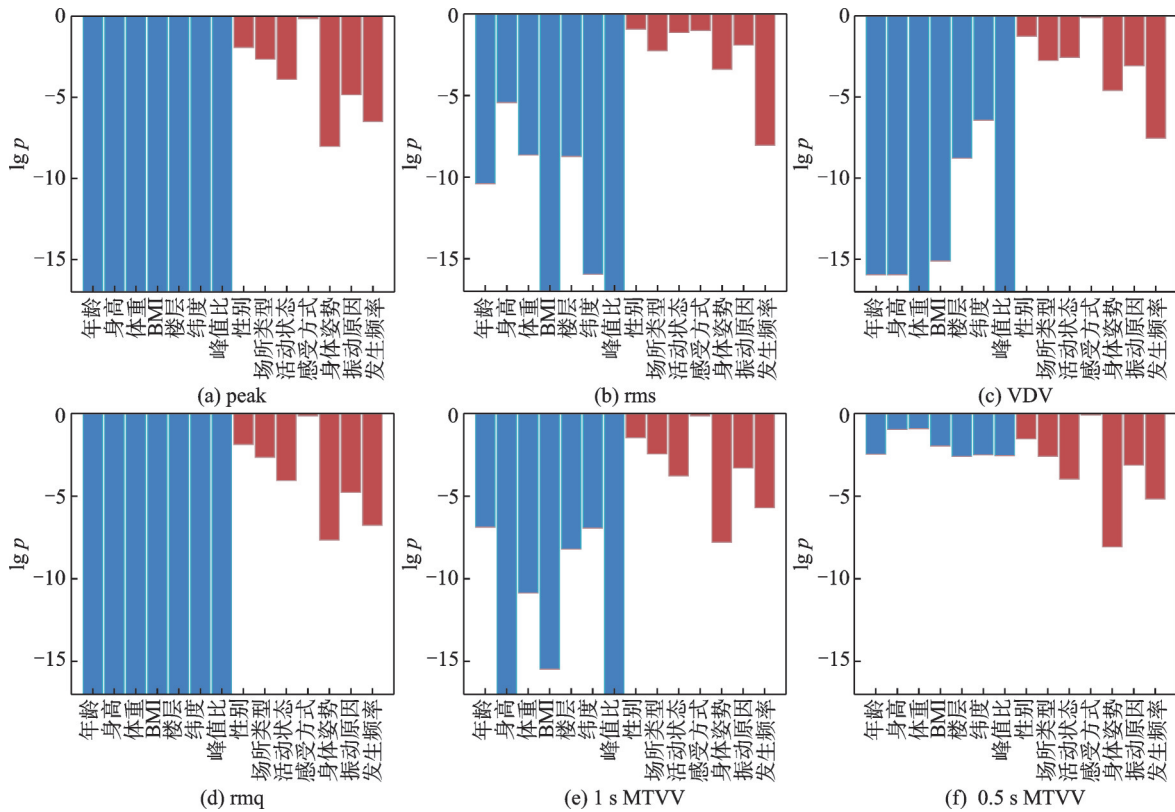


图 5 各因素与觉察限值的 p 值

Fig. 5 p values between perception limits and 14 relevant factors

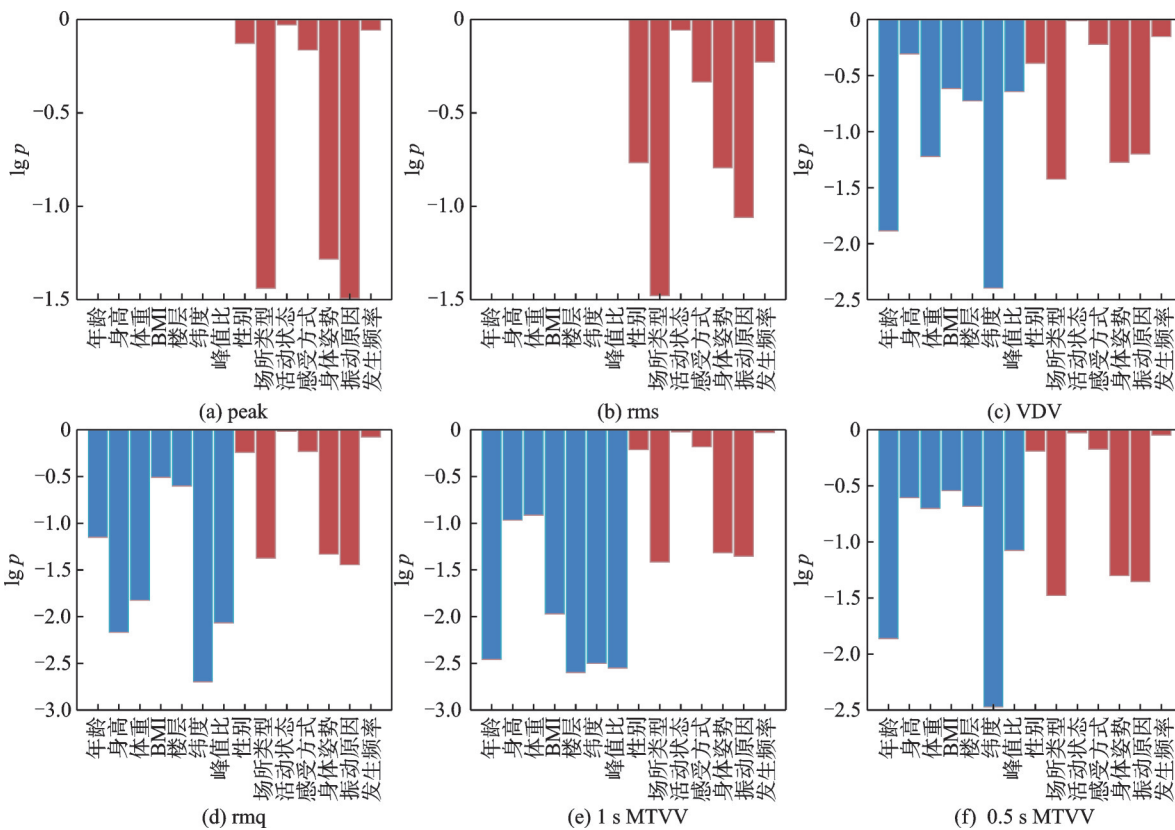


图 6 各因素与舒适限值的 p 值

Fig. 6 p values between comfort limits and 14 relevant factors

检验(Kolmogorov-Smirnov 检验)改进而来,用于进行一般的正态性检验的方法^[26-27],其零假设为“ H_0 : 总体服从正态分布”。

在拟合觉察、舒适限值与关键因素时均采用 VDV 和 1 s MTVV 作为强度指标,考虑到不同振动强度指标在研究和规范中的常用性,拟合觉察限值

时还采用了rms作为强度指标。

3.1 峰值比与限值拟合

3.1.1 拟合公式选择

有研究表明^[17],振动限值会随峰值比的升高而增加,MIWA等^[28]也发现高峰值比的振动对应限值更大。通过观察原始数据的规律,选择下式进行拟合:

$$\hat{V} = a \cdot [1 + \exp(b - c \cdot CF)]^{-\frac{1}{d}} \quad (6)$$

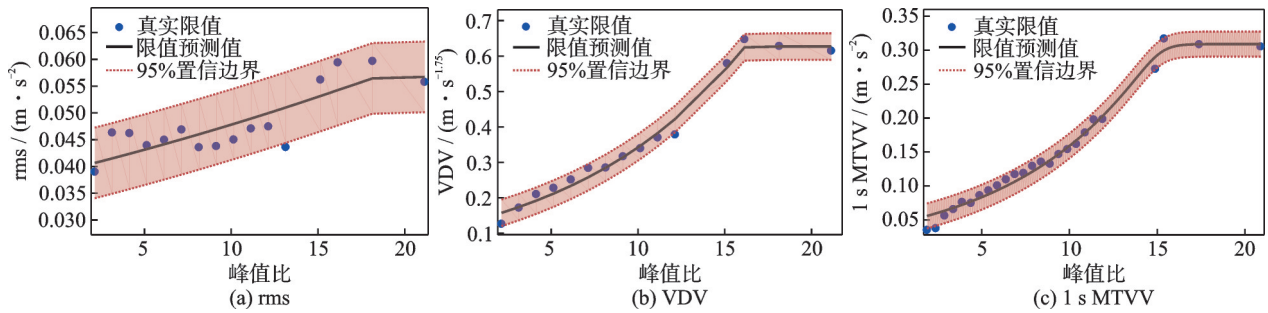


图7 觉察限值与峰值比拟合曲线及其置信区间

Fig. 7 Fitting curves and CI between perception limits and CF

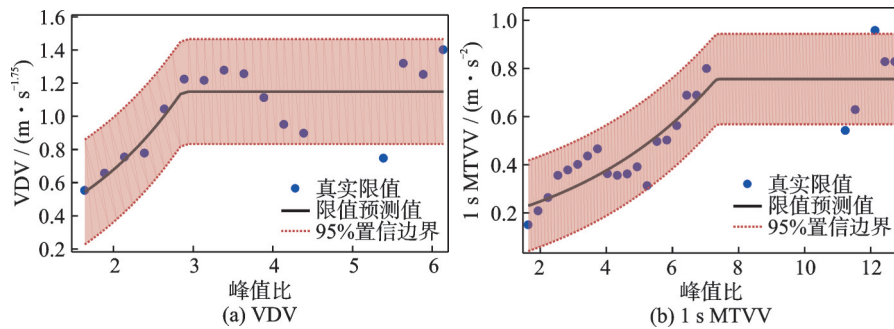


图8 舒适限值与峰值比拟合曲线及其置信区间

Fig. 8 Fitting curves and CI between comfort limits and CF

表7 觉察/舒适限值与峰值比的拟合参数及置信区间

Tab. 7 Fitting parameters and confidence intervals between perception/ comfort limits and CF

限值类型	振动指标	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	t 检验	LF 检验	95% 置信区间 (±1.96σ)
觉察限值	rms/(m·s ⁻²)	0.0567	86.2	4.71	228.5	0.6846	0	0	0.0066
	VDV/(m·s ^{-1.75})	0.6268	329.9	20.43	207.5	0.9870	0	0	0.0375
	1sMTVV/(m·s ⁻²)	0.3090	30.3	2.00	15.5	0.9865	0	0	0.0184
舒适限值	VDV/(m·s ^{-1.75})	1.1489	219.4	76.73	125.0	0.6122	0	0	0.3162
	1sMTVV/(m·s ⁻²)	0.7651	785.2	107.41	489.6	0.8133	0	0	0.1832

3.1.3 结果分析

结果表明残差服从正态分布且拟合较好地提取了峰值比与限值的关系特征。

拟合舒适限值(VDV)最大值为1.83 m/s^{1.75},BS 6472-1^[29]所给舒适限值为0.8~1.6 m/s^{1.75},考虑到真实情境中人对振动预期小、常经历振动者对振动耐受性增强,可认为所得限值较规范偏大是合理的。

3.2 BMI与限值拟合

3.2.1 拟合公式选择

有研究^[25,30]表明:健康的人容易感受到振动。

式中, \hat{V} 为振动限值拟合值;CF为峰值比;*a*、*b*、*c*、*d*为拟合参数,*a*为振动限值极限值,*b*、*c*、*d*无量纲。

当*a*、*c*均为正值时,限值拟合值 \hat{V} 为峰值比CF的单调递增函数且极限为*a*。结合以往研究结论可知,*a*、*c*均应大于0。

舍去某一峰值比范围内数据量过少的数据。

3.1.2 峰值比拟合结果

峰值比与觉察限值拟合曲线如图7所示,与舒适限值拟合曲线如图8所示。参数如表7所示。

而BMI是评价人体健康程度的重要指标。WHO^[31]给出的健康人体BMI在18.5~25之间,中国规范WS/T 428—2013^[32]规定健康成年人的BMI在18.5~24之间。结合对数据的观察,在拟合振动限值与BMI时采用下式:

$$\hat{V} = a_1(BMI - b_1)^2 + c_1 \quad (7)$$

式中,BMI为人体质量指数,BMI=体重(kg)/身高²(m);*a*₁、*b*₁、*c*₁为拟合参数。

因男女BMI差异明显,因此按性别分别拟合。舍去某一BMI范围内数据量过少的数据。

3.2.2 BMI拟合结果

女性BMI与觉察限值和舒适限值拟合曲线分别

如图9和10所示,参数如表8所示;男性相应结果如图

11和12所示,参数如表9所示。

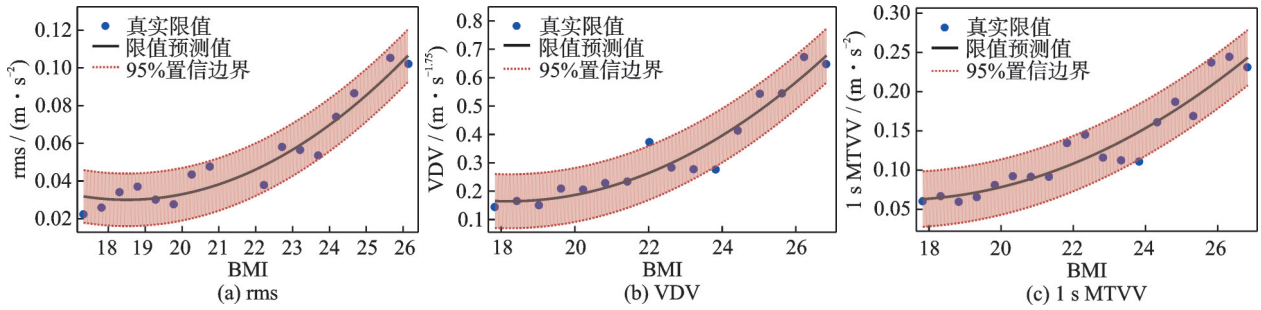


图9 觉察限值与女性BMI拟合曲线及95%置信区间

Fig. 9 Fitting curves and 95% confidence intervals between perception limits and female BMI

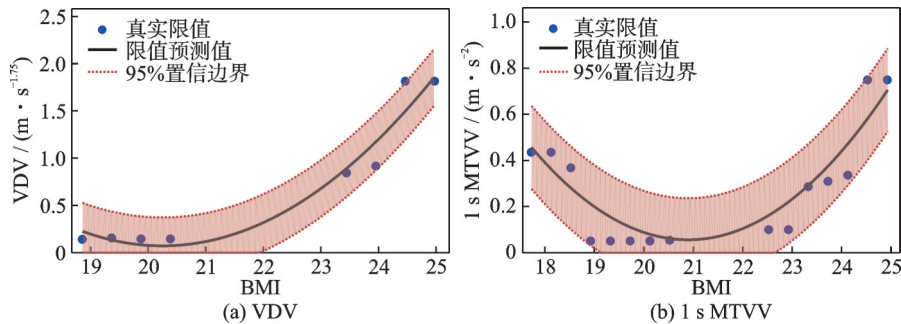


图10 舒适限值与女性BMI拟合曲线及95%置信区间

Fig. 10 Fitting curves and 95% confidence intervals between perception limits and female BMI

表8 觉察/舒适限值与女性BMI的拟合参数及置信区间

Tab. 8 Fitting parameters and confidence intervals between perception/ comfort limits and female BMI

限值类型	振动指标	a_1	b_1	c_1	R^2	t 检验	LF 检验	95% 置信区间 ($\pm 1.96\sigma$)
觉察限值	$\text{rms}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.0013	18.50	0.0300	0.9231	0	0	0.0140
	$\text{VDV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75})$	0.0069	18.20	0.1642	0.9198	0	0	0.0951
	$1\text{ s MTVV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.0020	17.44	0.0640	0.9197	0	0	0.0327
舒适限值	$\text{VDV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75})$	0.0801	20.25	0.0716	0.9499	0	0	0.3007
	$1\text{ s MTVV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.0399	20.90	0.0559	0.8466	0	0	0.1801

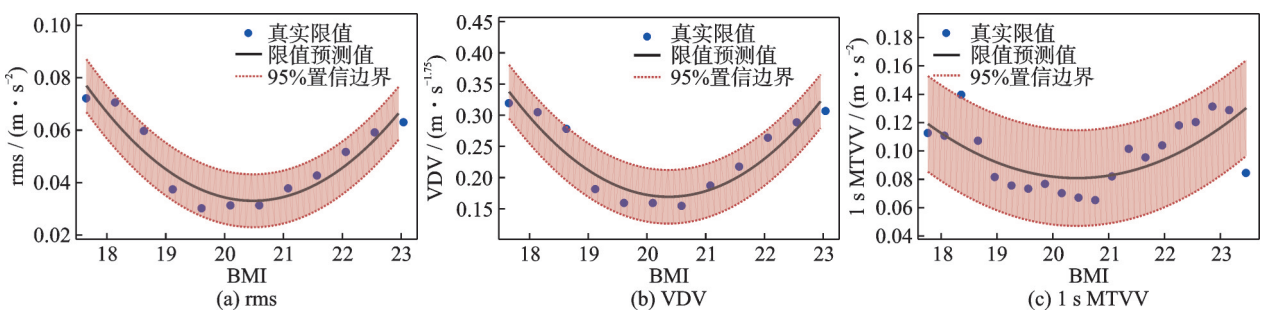


图11 觉察限值与男性BMI拟合曲线及95%置信区间

Fig. 11 Fitting curves and 95% confidence intervals between perception limits and male BMI

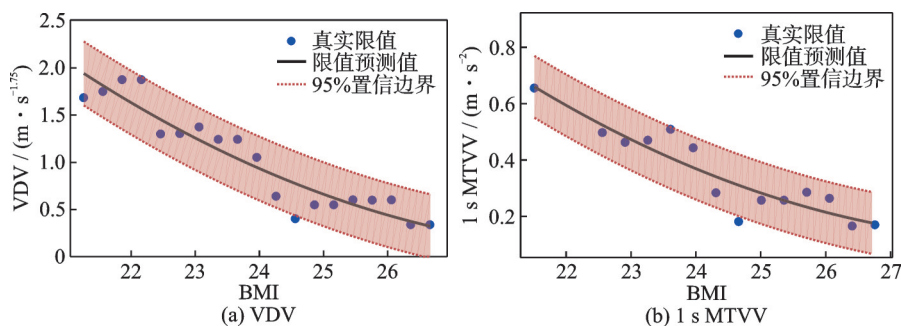


图12 舒适限值与男性BMI拟合曲线及95%置信区间

Fig. 12 Fitting curves and 95% confidence intervals between comfort limits and male BMI

表9 觉察/舒适限值与男性BMI的拟合参数及置信区间

Tab. 9 Fitting parameters and confidence intervals between perception/ comfort limits and male BMI

限值类型	振动指标	a_1	b_1	c_1	R^2	t检验	LF检验	95%置信区间 ($\pm 1.96\sigma$)
觉察限值	rms/($m \cdot s^{-2}$)	0.0055	20.48	0.0331	0.8821	0	0	0.0101
	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	0.0229	20.37	0.1692	0.8745	0	0	0.0430
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	0.0078	20.20	0.0735	0.8870	0	0	0.0141
舒适限值	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	0.0256	29.80	0.0702	0.8918	0	0	0.3386
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	0.0088	29.38	0.1137	0.8559	0	0	0.1097

3.2.3 结果分析

结果表明残差服从正态分布,且拟合效果较好。对比可知,BMI在20~23之间的男性对振动最敏感,BMI在17.0~19.9之间的女性对振动最敏感;女性最易不适区间为20.3~21.4,男性最易不适区间在健康范围外。

结论体现出男女差异及健康人群对振动更敏感,可认为限值与BMI拟合结果是合理的。

3.3 年龄与限值拟合

3.3.1 拟合公式选择

通过观察选择下式拟合:

$$\hat{V} = a_2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{(Age - b_2)}{c_2}\right)^2\right) \quad (8)$$

式中, Age为年龄,单位为岁; a_2, b_2, c_2 为参数, a_2 为拟合限值最大值, b_2 为拟合值取最大值时相应的年龄。

舍去某一年龄范围内数据量过少的数据。

3.3.2 年龄拟合结果

年龄与觉察限值拟合曲线如图13所示,与舒适限值结果如图14所示,参数如表10所示。

3.3.3 结果分析

结果表明残差服从正态分布,拟合效果较好。觉察限值最大值对应年龄段为34.6~37.5岁,舒适限值最大值对应年龄段在41.1~43.8岁之间。年龄在30~45岁之间的受测者的振动限值较其他年龄段受测者更高,原因可能是此年龄段的人平时大多处在工作状态,这与先前研究^[5]结论相符。

3.4 楼层与限值拟合

3.4.1 拟合公式选择

以往研究^[11, 33-34]表明,随着楼层的升高,由于窗外、桌面等视觉提示物摆动的影响,高层建筑物中居民更易感受到振动,结合搜集数据的特征,进行拟合:

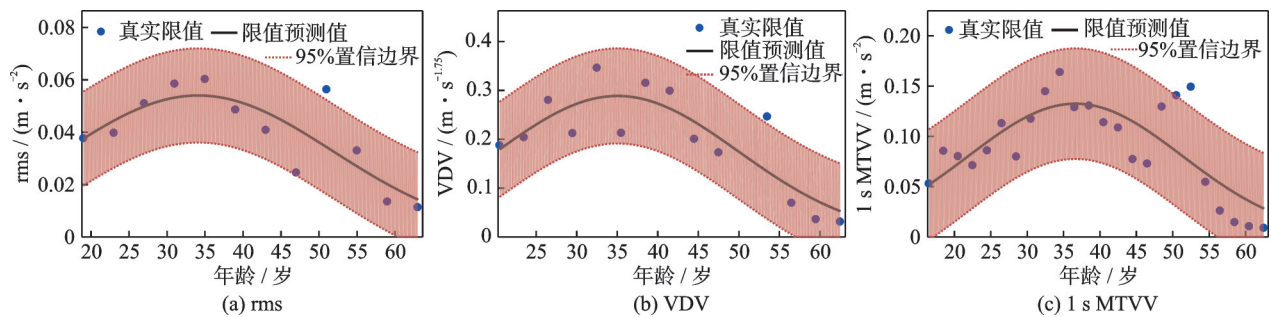


图13 觉察限值与年龄拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves between perception limits and age

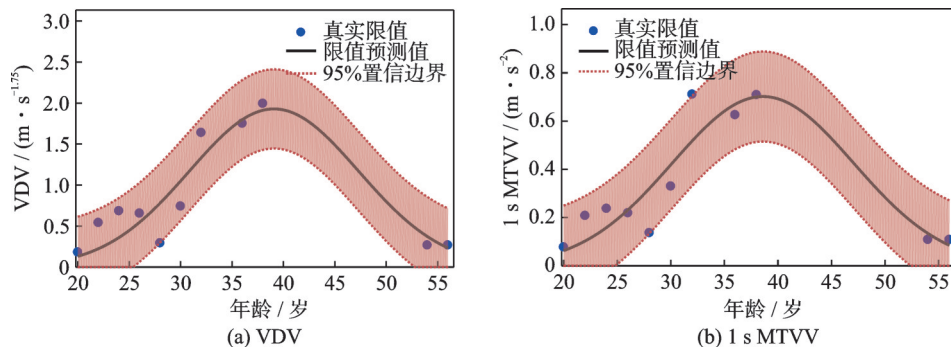


图14 舒适限值与年龄拟合曲线

Fig. 14 Fitting curves between comfort limits and age

表 10 觉察/舒适限值与年龄的拟合参数及置信区间

Tab. 10 Fitting parameters and confidence intervals between perception/ comfort limits and age

限值类型	振动指标	a_2	b_2	c_2	R^2	t 检验	LF 检验	95% 置信区间 ($\pm 1.96\sigma$)
觉察限值	rms/($m \cdot s^{-2}$)	0.0540	34.11	25.07	0.6671	0	0	0.0180
	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	0.2886	37.04	21.08	0.7268	0	0	0.0972
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	0.1325	36.63	20.83	0.6043	0	0	0.0550
舒适限值	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	1.9286	39.08	11.64	0.8463	0	0	0.4829
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	1.4601	43.56	10.05	0.7739	0	0	0.3329

$$\hat{V} = \frac{a_3}{FL - b_3} + c_3, \quad FL \leq 33 \quad (9)$$

式中, FL 为楼层; a_3, b_3, c_3 为参数。

舍去某一楼层范围内数据量过少的数据。

3.4.2 楼层拟合结果

楼层与觉察限值和舒适限值拟合曲线分别如图 15 和 16 所示, 参数如表 11 所示。

3.4.3 结果分析

结果表明残差服从正态分布, 且拟合效果较好。无论采用何种振动指标, 觉察限值随着楼层升高呈下降趋势, 说明随着楼层的升高人更容易觉察到振动; 舒适限值随着楼层升高呈下降趋势, 说明随着楼层升高人越有可能因振动感觉不舒服。

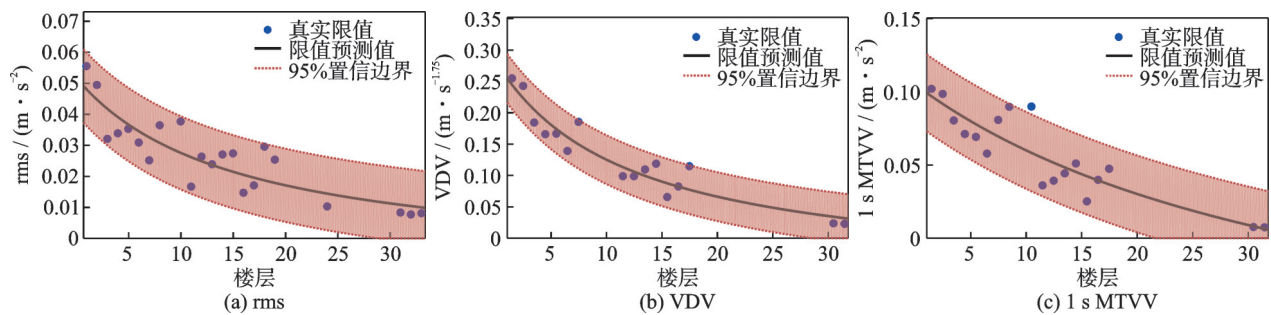


图 15 觉察限值与楼层拟合曲线

Fig. 15 Fitting curves between perception limits and floors

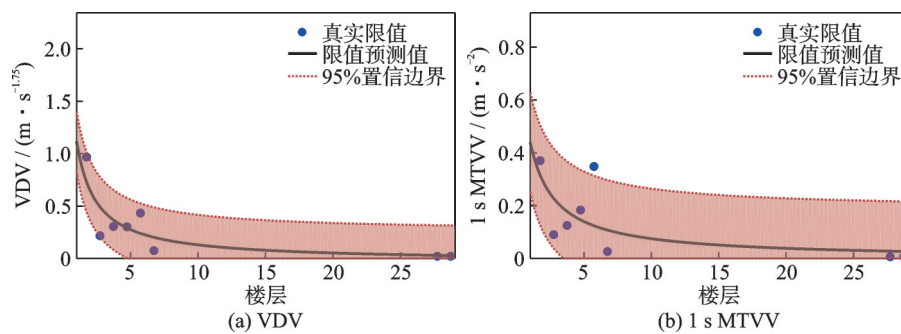


图 16 舒适限值与楼层拟合曲线

Fig. 16 Fitting curves between comfort limits and floors

表 11 觉察/舒适限值与楼层的拟合参数及置信区间

Tab. 11 Fitting parameters and confidence intervals between perception/ comfort limits and floors

限值类型	振动指标	a_3	b_3	c_3	R^2	t 检验	LF 检验	95% 置信区间 ($\pm 1.96\sigma$)
觉察限值	rms/($m \cdot s^{-2}$)	0.926	-15.18	-0.0092	0.7653	0	0	0.0118
	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	4.150	-11.99	-0.0636	0.9083	0	0	0.0365
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	8.734	-39.37	-0.1169	0.7787	0	0	0.0263
舒适限值	VDV/($m \cdot s^{-1.75}$)	1.653	-0.45	-0.0280	0.8818	0	0	0.2862
	1 s MTVV/($m \cdot s^{-2}$)	0.826	-0.88	-0.0009	0.6842	0	0	0.1892

3.5 基于概率的振动舒适度预测模型

由于本研究不仅给出了4种关键因素与振动限值的函数关系,还证明限值拟合值与真实值之间的残差呈正态分布,因此当关键因素值已知时可给出振动达到相应限值的概率。

3.5.1 一般方法

以觉察限值为例。对于第*i*种关键因素 x_i ,由前述拟合结果(表7~11)可查得由因素参量 x_i 表示的觉察限值代表值,记为 $f(x_i)$,对应均方差为 σ 。

当 $x_i=x_m$ 时,由于限值服从正态分布,即限值 $V\sim N(\mu_n, \sigma_n^2)$,分布均值 $\mu_n=f(x_m)$,均方差 $\sigma_n=\sigma$ 。

对于算例数据,考察第*i*种因素且其参量值为 x_m ,振动强度为 v_n 时,受测者觉察到振动的概率 P_i 等于第*i*种属性取值为 x_m 时,振动限值概率密度函数在 $(0, v_n]$ 上的积分:

$$P_i = \int_0^{v_n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(v_n - \mu_n)^2}{2\sigma^2}\right) dv \quad (10)$$

式中, μ_n 为由关键因素 x_i (如峰值比)表示的觉察限值拟合值; σ 为限值均方差; v_n 为算例中的振动强度值; μ_n 和 σ 均可在表7~11中查到。

3.5.2 简化方法

当关键因素取值为 x_m 时,引起50%的人觉察到振动(或因振动感觉不舒适)的振动限值为通过拟合公式计算得到的 $f(x_m)$ 。

4 结 论

本文通过KW检验证明MIC在评价分类变量与其他变量相关性时是有效的。发现峰值比CF与振动限值相关性最强;环境因素中的楼层对振动限值影响仅次于峰值比;生理属性中BMI和年龄与觉察限值相关性最强,身体姿势、年龄和BMI与舒适限值相关性最强。最后选择峰值比、楼层、BMI和年龄为关键因素,分别与觉察限值和舒适限值拟合。得到了由单个关键因素表示的限值代表值及置信区间。

通过LF检验、t检验发现限值拟合值与真实值残差呈正态分布,说明拟合公式已较好地提取了影响因素与振动限值之间的关系特征,以此为基础给出了基于关键因素的振动限值概率分布模型。最后还给出了基于拟合函数和置信区间的限值使用方法及其简化形式。

值得注意的是,拟合中出现了置信区间落于横坐标下方、个别真实值落在置信区间外侧的情形,这主要是因为部分区段数据较少且离散性较大。由此可见,

进一步搜集数据、扩大有效数据的数据量十分必要。

参考文献:

- [1] HU C X, ZHAO L, GE Y J. Wind-induced instability mechanism of old Tacoma narrows bridge from aerodynamic work perspective[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(5): 04022029.
- [2] PAVIC A, REYNOLDS P. Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: review of background information[J]. The Shock and Vibration Digest, 2002, 34(3): 191-211.
- [3] TOSHISUKE M. Evaluation methods for vibration effect: part 1. measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations[J]. Industrial Health, 1967, 5(3-4): 183-205.
- [4] ZHOU Z, GRIFFIN M J. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: discomfort caused by mechanical shocks[J]. Ergonomics, 2017, 60(3): 347-357.
- [5] CHEN P W, ROBERTSON L E. Human perception thresholds of horizontal motion[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(8): 1681-1695.
- [6] 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.
SONG Zhigang. A new annoyance-based vibration comfort design theory on engineering structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [7] CAO L, CHEN J. Online investigation of vibration serviceability limitations using smartphones[J]. Measurement, 2020, 162: 107850.
- [8] BURTON M D. Effects of low frequency wind-induced building motion on occupant comfort[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2006.
- [9] GONÇALVES M S, PAVIC A, PIMENTEL R L. Vibration serviceability assessment of office floors for realistic walking and floor layout scenarios: literature review[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(6): 1238-1255.
- [10] 曹雷, 陈隽. 振动舒适度的智能手机大数据研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5): 961-970.
CAO Lei, CHEN Jun. Big data investigation for vibration serviceability using smart phones[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 961-970.
- [11] BURTON M D, KWOK K C S, ABDELRAZAQ A. Wind-induced motion of tall buildings: designing for occupant comfort[J]. International Journal of High-Rise Buildings, 2020, 9(1): 1-8.
- [12] GRIFFIN M J. Handbook of Human Vibration[M]. New York: Academic Press, 1996.

- [13] KOWALSKA-KOCZWARA A, STYPUŁA K. Influence of crest factor on evaluation of human perception of traffic vibration[J]. *Journal of Measurements in Engineering*, 2018, 6(4): 250-255.
- [14] RESHEF D N, RESHEF Y A, FINUCANE H K, et al. Detecting novel associations in large data sets[J]. *Science*, 2011, 334(6062): 1518-1524.
- [15] MOORE D S, NOTZ W I. *Statistics: Concepts and Controversies*[M]. New York: Macmillan, 2017: 223-231.
- [16] COUSO I, STRAUSS O, SAULNIER H. Kendall's rank correlation on quantized data: an interval-valued approach[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2018, 343: 50-64.
- [17] BATYRSHIN I Z. Constructing correlation coefficients from similarity and dissimilarity functions[J]. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2019, 16(10): 191-204.
- [18] 国家统计局. 第七次全国人口普查公报(第四号)[EB/OL]. (2021-05-11)[2023-10-23]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901084.html.
- [19] 国家国民体质监测中心. 第五次国民体质监测公报[EB/OL]. (2022-06-7)[2023-10-23]. <https://www.sport.gov.cn/n315/n329/c24335066/content.html>.
- [20] KINNEY J B, ATWAL G S. Equitability, mutual information, and the maximal information coefficient[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3354-3359.
- [21] SIMON N, TIBSHIRANI R. Comment on "detecting novel associations in large data sets" by Reshef et al, *Science* Dec 16, 2011[J]. arxiv preprint arxiv: 1401.7645, 2014.
- [22] JOHNSON R W. Alternate forms of the one-way ANOVA F and Kruskal-Wallis test statistics[J]. *Journal of Statistics and Data Science Education*, 2022, 30(1): 82-85.
- [23] OSTERTAGOVÁ E, OSTERTAG O, KOVÁČ J. Methodology and application of the Kruskal-Wallis test [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 611: 115-120.
- [24] Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock (British Standard): BS 6841: 1987[S]. British Standards Institution, 1987.
- [25] Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-part 1: general requirements: ISO 2631-1: 1997[S]. International Organization for Standardization, 1997.
- [26] RAZALI N M, WAH Y B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Klmogorov-Sirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests[J]. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2011, 2(1): 21-33.
- [27] KHATUN N. Applications of normality test in statistical analysis[J]. *Open Journal of Statistics*, 2021, 11(1): 113-122.
- [28] MIWA T, YONEKAWA Y, KANADA K. Thresholds of perception of vibration in recumbent men[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 75(3): 849-854.
- [29] Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings part 1: vibration sources other than blasting: BS 6472-1[S]. BSI, 2008.
- [30] KHANNA D, PELTZER C, KAHAR P, et al. Body mass index (BMI): a screening tool analysis[J]. *Cureus*, 2022, 14(2): e22119.
- [31] WHO. A healthy lifestyle-WHO recommendations. [EB/OL]. (2010-05-06)[2023-10-23]. <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/a-healthy-lifestyle-who-recommendations>
- [32] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 成人体重判定: WS/T 428—2013[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
National Health and Family Planning Commission of the PRC. Criteria of weight for adults: WS/T 428—2013 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013.
- [33] KAWANA S, TAMURA Y, MATSUI M. Study on vibration perception by visual sensation considering probability of seeing[J]. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2012, 1(4): 283-300.
- [34] KIM B, LEE D E, PREETHAA K R, et al. Predicting wind flow around buildings using deep learning[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 219: 104820.

第一作者:曹 雷(1988—),男,博士,副教授。

E-mail: 2021020@fjxu.edu.cn

通信作者:陈 隽(1972—),男,博士,教授。

E-mail: cejchen@tongji.edu.cn