

车辆振动特征与人体乘坐舒适性的关系

陈 长, 梁远路, 薛博阳, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 车辆振动信息在时间和空间上具有多种分布特点时, 传统的乘坐舒适性评价方法不能同时给出与人的真实舒适感一致的评价结果, 为此提出局部冲击和人体感知窗口的概念以特征化振动信息, 从而准确反映人体只对主要振动信息敏感和对振动之间的邻近性敏感。通过正交试验优化了基于特征振动信息构造的特征振动剂量值。在设计的试验场景中, 特征振动剂量值与频率加权加速度均方根值、最大瞬时振动值和振动剂量值这三个指标相比, 能得到与人的真实感受更为一致的结果。

关键词: 乘坐舒适性; 客观评价方法; 振动信息整合; 时空分布特点

中图分类号: U491.2+55

文献标志码: A

Relationship Between Vehicle Vibration Characteristics and Human Ride Comfort

CHEN Zhang, LIANG Yuanlu, XUE Boyang, SUN Lijun
(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Conventional evaluation indices for road ride comfort cannot adapt to scenarios where vibration information is distributed randomly in the space or time domains. To overcome these deficiencies, local impact and vibration perception window concepts are proposed to characterize vibration information; a characteristic vibration dose value is determined to demonstrate that humans are sensitive only to major vibrations and the proximity between successive vibrations. The proposed index is optimized using an orthogonal test and shows better correspondence with actual human sensations when compared to the results of frequency weighted root mean square, maximum transient vibration value, and vibration dose value.

Key words: ride comfort; objective evaluation method; vibration information integration; temporal and spatial distribution characteristics

车辆在实际行驶中产生的振动不仅仅影响乘客的体验, 还影响乘客的身心健康^[1]。针对车辆行驶对人体造成的不舒适感有较多研究, 然而, 当车辆振动信息在时空中具有特定的分布特点时, 已有研究成果往往不能正确反映人的真实感受。例如, 当前流行的国际平整度指数 (international roughness index, IRI) 被定义为标准小车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度行驶 1 km 时悬挂系统的累计位移^[2], 即无论实际测试路面的长度是多少, 都会被标准化到 1 km 的空间尺度上, 这相当于做了一个平均化的运算。平均化的运算指标还包括频率加权加速度均方根值 (frequency weighted root mean square, RMS)^[3] 和平均吸收功率^[4], 其中 RMS 考虑了人对频率的敏感性, 平均吸收功率基于人体振动模型, 因而不需要计算频率权重。Griffin^[5] 指出, 在主要振动信息的一个较小的邻域内使用平均算符, 会得到一个非常大的值, 而将这个邻域扩大到一个很大的范围时则可能得到一个很小的值, 这两种情况下都会得到异常的结果, 因此使用平均算符整合振动信息过于简化, 振动信息中的各种振幅成分、瞬时振动和冲击振动成分都应该被明确定义。为了利用更多的振动成分, 鲁植雄等^[6] 在路面纵断面轮廓均方根偏差的基础上引入分形维数, 王超逸^[7] 在 IRI 的基础上引入多重分形谱谱宽值, 均分别较原指标提高了分辨力, 但这并未解决原指标使用平均化算符本身的问题。标准化使用平均算符时的总区间长度可以解决这个问题, 但这是十分困难的^[8]。因此, 美国明尼苏达州交通

收稿日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(71471134)

第一作者: 陈 长(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通基础设施管理。

E-mail: czy1620@263.net

通信作者: 梁远路(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路行驶舒适性评价方法。

E-mail: msconfig_0325@foxmail.com



论文
拓展
介绍

运输局、中国公路管理部门仍然直接基于IRI构造行驶质量指数^[9-10]。使用累计算符则不存在这个问题,因为在累计算符下,指标只对主要振动信息敏感,对计算指标所依赖的总区间长度本身并不敏感。使用累计算符的乘坐舒适性评价指标有能较好地考虑峰值振动的振动剂量值(vibration dose value, VDV)^[3]、总吸收功率^[11]和只针对脊柱伤害评估的每日剂量值^[12]。使用累计算符容易导致过度整合的问题,例如,一个成年人的一生可能经历了很多振动,使用该类指标整合振动信息可能得到一个很大的值,而这个人当前并不一定会觉得非常不舒适。因此,振动剂量值和每日剂量值都被规定只能在一天之内使用,这也说明在越长的时间内使用,这两个指标就越不准确。只整合最大部分的振动信息而忽略其他振动信息可以有效解决过度整合的问题,这部分指标有最大瞬时振动值(maximum transient vibration value, MTVV),它只整合1 s内最大的振动信息。但实践证明,1 s内最大振动信息以外的振动也能显著影响实际的不舒适感受,因此使用MTVV的效果也不是很好^[1,13]。为避免讨论振动信息的时空分布问题,Miwa^[14]提出了在纯频域内计算的振动剧烈值指标。在纯频域内计算的指标还有面向车辆折旧、车辆维修和行驶舒适性等用户成本的行驶开支粗糙度指数^[15]和将路面纵断面分为长波、中波、短波三种成分并合成计算的密歇根行驶质量指数^[16]。大量实践证明,纯频域内计算的指标丢失了振动的时空分布信息,而这种信息可以显著影响实际的乘坐舒适性。为解决纯频域指标没有时空分辨力的问题,Ueckermann等^[17]使用傅里叶逆变换将频域内容转换为虚拟的加权纵断面,并联合利用该断面的方差和极差进行评价,但这并未从根本上克服方差或极差指标的缺陷。综上所述,如何考虑振动信息在时空中的分布特点,从而进行更准确的乘坐舒适性评价是当前面临的一个问题。

本文提出了局部冲击的概念,使得主要的振动信息能被表征的同时不受总测试时长本身的影响。本文提出人体感知窗口的概念,用于表达局部冲击之间的交互作用,从而不使最大振动信息以外的信息被完全忽略。本文还面向振动信息在时空中的多种分布特点设计了多个对比试验场景,并对基于上述两个概念设计的乘坐舒适性评价指标特征振动剂量值(characteristic vibration dose value, CVDV)进行了优化与验证。结果表明,新建立的指标较传统指标展现了对更广泛场景的适用性。

1 试验设计

本文设计了用于表达人的真实感受的主观评分标尺,如图1所示。该评分标尺只有4个语义等级,可以简化操作流程;总评分区间为[0, 3.5],越大表示越不舒适,分辨率为0.1。客观振动数据由JY901型姿态传感器采集,采样频率为200 Hz,采集主轴方向的加速度值($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)和绕主轴的角速度值($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)。传感器布置如图2所示,由于其安装时与地面存在初始倾角,实际使用的是转换到如图2所示坐标系下的数据,而非其直接输出的数据。右后方乘坐者的客观振动数据认为可由右前方传感器采集的数据表征。试验用车辆为宝骏730型和比亚迪宋MAX型。

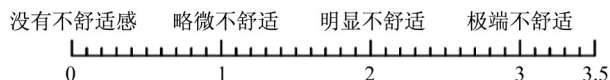


图1 评分标尺

Fig.1 Rating scale

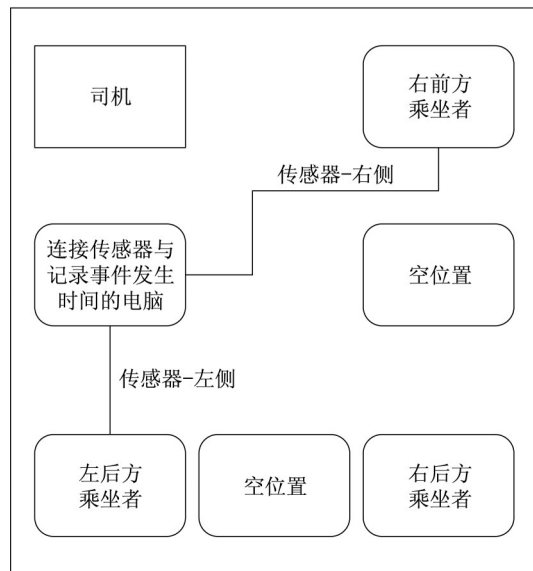
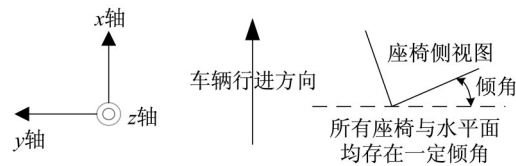


图2 数据采集系统布置示意图

Fig.2 Layout of data acquisition system

共设计了13个试验场景,每个场景中的主轴加速度时间历程如图3所示。试验场景中包含了4种刺激类型,分别是经过减速带、经过玻璃钢格栅板、

急刹车和车辆做S形行走。减速带均为如图4所示的构造,纵断面呈梯形,上底长110 mm,下底长300 mm,高45 mm。玻璃钢格栅板均为如图5所示构造,每个矩形板长1 000 mm,宽300 mm,高55 mm,每个横断面上配置两个玻璃钢格栅板,供车辆双侧轮同时碾压。S形行走动作和急刹车动作由司机人工控制,司机经过训练可以基本保证每次的动作一致。试验速度固定为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验场景中,图3a

为车辆进行了1次S形行走;图3b为车辆连续进行了3次S形行走;图3c~3e分别为车辆经过了1、3、9个减速带;图3f、3g分别为包含1、2次急刹车;图3h为车辆经历了1对玻璃钢格栅板,然后立即进行了1个急刹车;图3i~3l均为车辆碾压玻璃钢格栅板对的情景,其中图3i中玻璃钢格栅板对的数量为1,后面3个场景中玻璃钢格栅板对的数量均为5,不同的是间距,分别是40、20、4 m。试验设计的原则是使振动信息在时空中的分布具有多种特点。试验场景的顺序是随机的,以避免霍桑效应的影响^[18]。

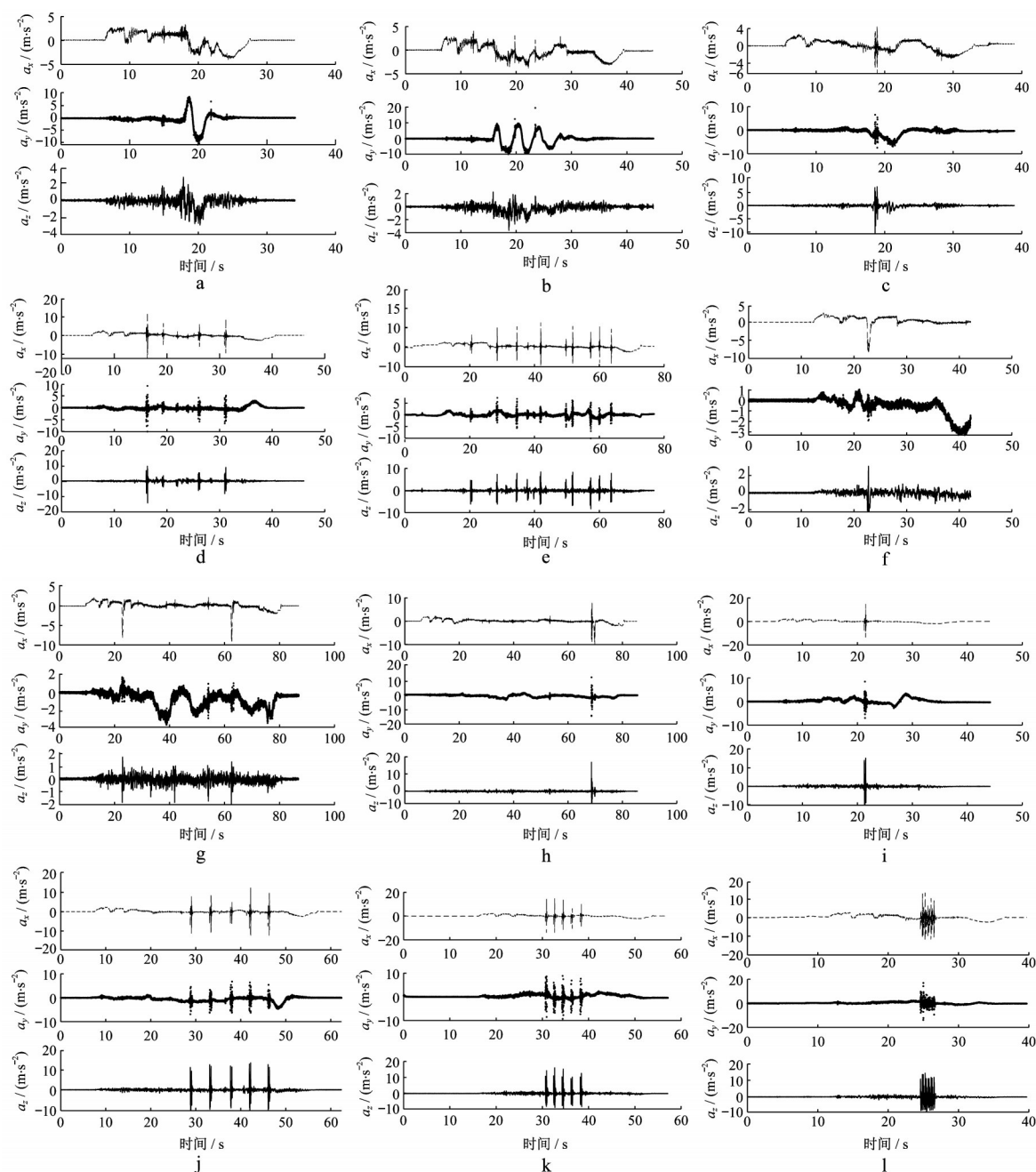


图3 设计场景中的主轴加速度时间历程

Fig.3 The acceleration time history of the main axes in the designed scenarios

参与试验的总人数为33人,其中,男性21人,女性12人,人员的年龄范围为19~50岁,身高范围为153~183 cm,体重范围为45~105 kg。



图4 试验场景中的减速带

Fig.4 Speed bump in the test scenario



图5 试验场景中的玻璃钢格栅板

Fig.5 GRP grid plates in the test scenario

2 主流整合振动信息方式的指标性能

本文以目前流行的国际标准化组织(International Standard Organization, ISO)在ISO 2631-1中提供的三大指标,RMS、MTVV和VDV分别作为按平均值整合、按最大值整合、按累计值整合三种整合形式的代表,对当前乘坐舒适性评价所面临的问题进行分析。考虑到当前的研究趋势是使用多轴的振动信息^[19]以及多轴信息并不能通过简单相加以表征人的综合感受^[20],RMS、MTVV和VDV在计算时均采用ISO 2631-1中提供的权重进行多轴融合。

将设计的试验场景分为5个对比组,其主观评分结果与主要振动轴上RMS、MTVV、VDV指标的计算结果箱线图分别如图6a~6e所示。其中,图6a对应图3a所示场景;图6b对应图3a、3b所示场景;图6c对应图3c~3e所示场景;图6d对应图3f~3h所示场景;图6e对应图3i~3l所示场景。图6中每个子图上方为显著性水平为0.05下的配对样本T检验的

结果, T 为 T 值, p 为 p 值, T 和 p 下标中连字符所连接的两个数字为进行对比的组从左至右的序号。

由图6a可知,在更长的总计整合时间下,RMS有非常显著的下降,而由主观评分值表征的实际乘坐舒适性却没有显著的下降,RMS的评价结果与实际发生了很大的偏差。事实上,图3a所示场景在整合时间为短、长时的峰值系数分别为4.477和6.480,均小于9.000,RMS仍在ISO 2631-1中规定的适用范围内。对于图3a,当场景取不同的整合时长时,MTVV和VDV均能取得与主观评分一致的结果。这表明,人体只对主要振动敏感,而对总的整合时间不敏感,依赖于总的整合时长的RMS是不适合的。由图6b可知,乘坐者连续经历3个S形行走时比只经历1个S形行走时会感到更为显著的不舒适,此时只有RMS和VDV给出了与主观评分一致的结果,MTVV只考虑最大1 s内的振动信息时,认为两种情况下的不舒适感应该是相同的,这显然与实际不符,只取1 s内最大的振动信息低估了实际的不舒适感。由图6c可知,对于图3c~3e所示对比试验场景,只有MTVV能给出正确的评价结果,使用RMS和VDV都显著地过度整合了振动信息,这表明有时确实需要忽略一些振动信息以提升评价的准确性。由图6d可知,乘坐者在图3g所示场景中比在图3f所示场景中会感受到更为显著的不舒适,而由于RMS对测试总时长敏感,RMS认为两者的不舒适程度相当,这与实际发生了明显的差异。MTVV仅取到其中1次急刹车的信息,从而低估了图3g所示场景中乘坐者的不舒适程度。由于ISO提供的原生轴向权重不合理,VDV低估了图3h所示场景中的不舒适性。由图3a、3b可知,将局部整合时间 τ 改为4 s,MTVV的整合范围依然不超过1次S形行走,也不能很好地区分这两个场景;当 τ 大于4 s时,MTVV的整合范围虽然超过1次S形行走,可以更好地区分图3a、3b所示的两个场景,但又会过度整合图3e所示场景中的振动信息。因此,将 τ 置为任意一个固定的时间都是不合适的。由图6e可知,图3i、3j所示试验的结果显示,即使主要振动激励在时空上有了明显的分离,但激励数量的增加仍然能显著增加乘坐者的不舒适感,这使在图6c中适用的MTVV变得非常不适用,因为MTVV不能量化这种数量的增加导致的不舒适感增加。RMS和VDV都能区分数量的增加导致的不舒适感增加,即对于图3i、3j所示的场景,能给出与主观评分一致的评价结果,但它们不能区分图3k、3l所示的场景中的结

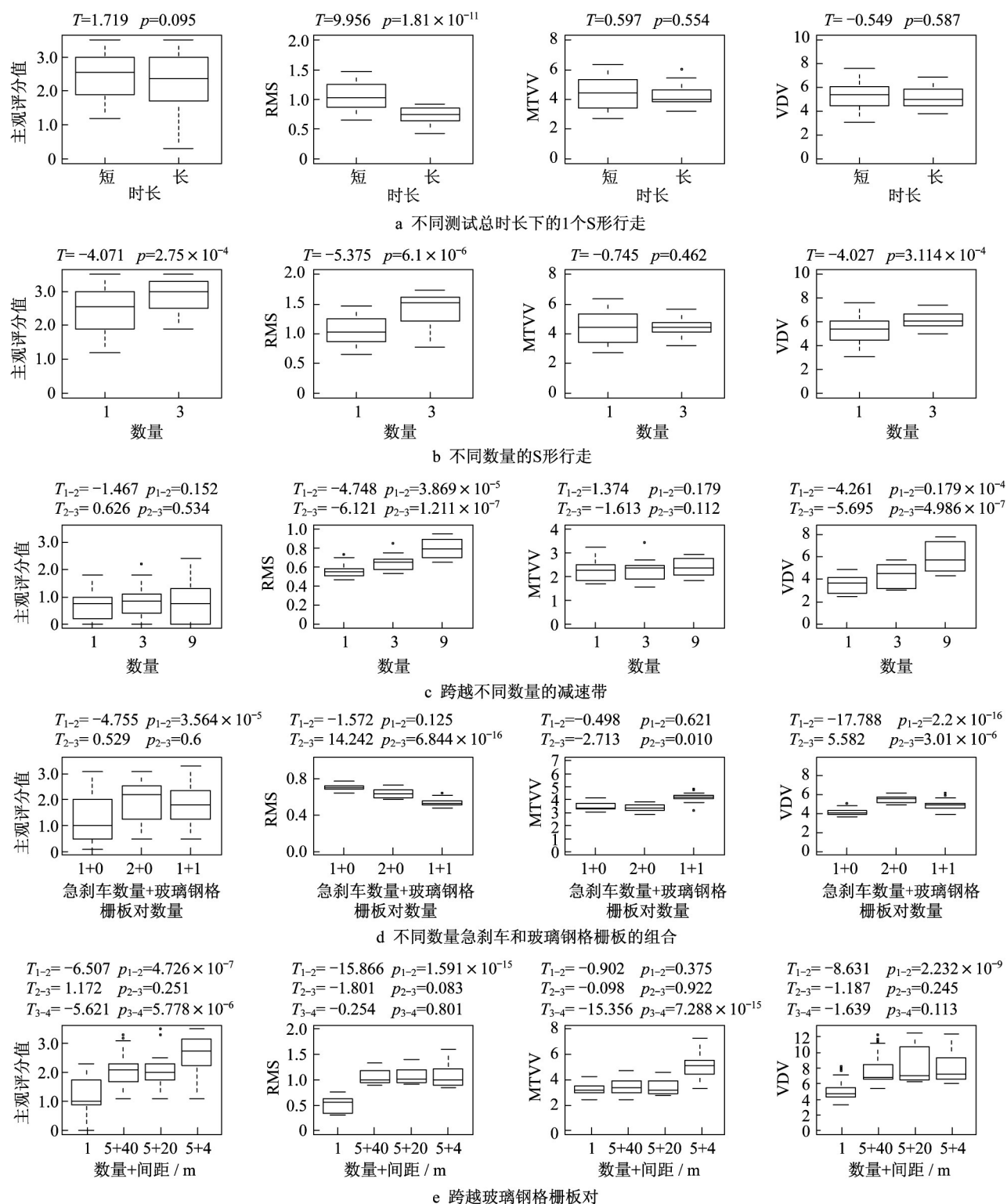


图6 各对比试验场景组中的主评分结果和RMS、MTVV、VDV的计算结果

Fig.6 Rating results and RMS, MTVV, VDV in each comparison test scenario group

果,即玻璃钢格栅板对的间距由20 m减小为4 m时,能显著增加乘坐者的不舒适感。RMS和VDV不区分振动激励之间的邻近性的指标,而振动信息的集中显然能够增加乘坐者的不舒适感,对于图3k和图3l所示的场景,只有MTVV能表征乘坐者的这种感

知特性,并给出与主观评分一致的估计。对比图3j和图3k所示场景的结果可知,玻璃钢格栅板对的间距由40 m减小到20 m,而乘坐者的主观评分结果没有显著的变化,即主要激励之间的间距减小并不一定会导致实际不舒适感的变化,这显示了一些复杂

的情形。

3 特征振动剂量值指标设计

图6的结果显示,局部化的主要振动需要被首先定量,然后再考虑其中的时空分布关系,才能实现更好的评价。

3.1 局部冲击概念的提出

局部化的振动信息对于乘坐舒适性的评价是十分重要的,因为它经常是最主要的影响因素^[21-22]。本文设计局部冲击概念以量化最主要的局部振动。

(1)按式(1)计算按频率加权能量密度 $E_d(t)$ 。

$$E_d(t) = k_x^2 a_{wx}^2(t) + k_y^2 a_{wy}^2(t) + k_z^2 a_{wz}^2(t) \quad (1)$$

式中: $k_x=1.4$ 、 $k_y=1.4$ 、 $k_z=1$,分别为ISO 2631-1中规定的 x 轴、 y 轴、 z 轴轴向权重; $a_{wx}(t)$ 、 $a_{wy}(t)$ 、 $a_{wz}(t)$ 分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴上的按频率加权加速度在时刻 t 的值。

(2)按式(2)~(5)在局部最大程度地整合局部能量 E_i 。

$$E_i = \max_{t_0} \left(\int_{t_0-\tau}^{t_0} E_d(t) dt \right) = \int_{t_{0,i}-\tau}^{t_{0,i}} E_d(t) dt \quad (2)$$

$$t_0 - \tau \leq t_{i,\max} \leq t_0 \quad (3)$$

$$E_d(t_{i,\max}) = \max_t (E_d(t)) \quad (4)$$

$$t \in [0, T] - \sum_{j=1}^{i-1} [t_{0,j} - \tau, t_{0,j}] \quad (5)$$

式(2)~(5)中: i 为局部冲击的序号; t_0 为终止时刻; $t_{0,i}$ 为第 i 个局部冲击的终止时间; $t_{i,\max}$ 为当前时间轴上 $E_d(t)$ 取最大值对应的时刻; T 为试验总时间。

(3)将 E_i 所对应的振动信息从当前时间轴上剪除。

(4)如果 $\max_{t_0} \int_{t_0-\tau}^{t_0} E_d(t) dt < d \max_i (E_i)$ 且式

(5)成立,降低因子 d 在 $(0, 1)$ 上,则进入步骤(5),否则进入步骤(2)。

(5)终止运算,第 i 个被剪除的部分为第 i 个局部冲击。

步骤(4)中使用了贝勃定律,即人如果经历了一个强烈的刺激,那么,再经历低于该刺激某个程度的刺激时,其感受可被忽略。

3.2 人体感知窗口概念的提出

图6c的结果显示,图3e所示场景中由减速带引发的激励是被乘坐者独立地感知的,而图6e的结果显示,图3j所示场景中由玻璃钢格栅板对引发的激励不能被乘坐者独立地感知,它们之间的相互作用

可以增加整体的不舒适感受。这表明,主要振动之间的存在有条件的交互作用。由图6c和图6e的结果可知,单个玻璃钢格栅板对比单个减速带能产生更大的VDV,这表明前者造成的振动剧烈程度更大,而这引发了各玻璃钢格栅板对之间的交互。因此,可以假设各局部冲击之间的交互是以窗函数的形式进行的。如式(6)所示,每个局部冲击的振动信息以该局部冲击为中心建立的窗函数向其他局部冲击进行分享,分享的比例为每个接收的局部冲击的局部整合时间 τ 截取到的分享的局部冲击的窗函数面积除以分享的局部冲击的局部整合时间 τ 截取到的分享的局部冲击的窗函数面积。窗函数的宽度与局部冲击的剧烈程度正相关,如式(7)所示。

$$\frac{E_{i,k}}{E_i} = \frac{V_{\Theta,i,k}}{\sqrt[n]{\int_{t_{0,i}-\tau}^{t_{0,i}} a_w^n(t) dt}} = \frac{\int_{t_{0,i}-\tau}^{t_{0,i}} w_i(t) dt}{\int_{t_{0,i}-\tau}^{t_{0,i}} w_i(t) dt} \quad (6)$$

式中: $E_{i,k}$ 为局部冲击 i 分享给局部冲击 k 的能量; Θ 为轴向指示符,代表 x 轴、 y 轴或 z 轴; $V_{\Theta,i,k}$ 为在 Θ 轴上局部冲击 i 分享给局部冲击 k 的振动信息; a_w 是主轴上的按频率加权加速度; n 是整合的阶数; $w_i(t)$ 是对应第 i 个局部冲击的窗函数。

$$L_i = k_1 E_i^{k_2} \quad (7)$$

式中: L_i 为局部冲击 i 对应的窗函数的宽度; k_1 、 $k_2 > 0$,为尺度参数。

为了表达图3j、3k和图6e所示玻璃钢格栅板对所引发的激励在间距为20 m或40 m时不会显著影响总的舒适感的情况,可以引入余闯^[23]提出的浴盆曲线,如式(8)所示,该曲线可以使整合的振动信息在一定时空范围内不随间距的变化而明显变化。对于该曲线,将其基准区间长度固定为1,故取 $\eta=1$;为使曲线更为对称,取 $\alpha=0.2$ 、 $\beta=0.1$ 。

$$h(t) = \frac{\lambda(t/\eta)^{\alpha-1}}{\eta(1-t/\eta)^{\beta+1}} [(\beta-\alpha)t/\eta + \alpha] \quad (8)$$

式中: $h(t)$ 为浴盆曲线函数; α 和 β 为形状参数; λ 为故障率参数; η 为区间参数。

为了表达图6e所示当玻璃钢格栅板对的间距从40 m或20 m降低到4 m时可以显著增加总的舒适感的情形,在 $h(t)$ 中间增加一个正态分布函数,以使离基准整合位置很近的振动信息能被更多地整合。加入一个截距项以调整非中心的振动信息被整合的程度,再将窗函数的值标准化到 $[0, 1]$ 区间,则窗函数的最终形式如式(9)所示。

$$w_i(t) = \max \left\{ -h\left(\frac{t-t_{0,i}+0.5\tau+L_i t'}{L_i}\right) + p + \right.$$

$$\frac{R}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-t_{0,i}+0.5\tau)^2}{2L_i^2\sigma^2}}, 0\} \quad (9)$$

式中: t' 为 $h(t)$ 达到最低点时的时刻; σ 为正态分布的标准差; p 为截距项, p 在 $(0, 1)$ 上; R 为修正系数。

$$t' = \begin{cases} (\eta - \eta\alpha)/2 & \alpha = \beta \\ \eta/(\beta - \alpha)(\sqrt{\alpha\beta/(\beta - \alpha + 1)} - \alpha) & \alpha \neq \beta \end{cases} \quad (10)$$

$$R = \sqrt{2\pi}\sigma(1 - p + \frac{\lambda(t'/\eta)^{(\alpha-1)}((\beta - \alpha)t'/\eta + \alpha)}{\eta(1 - t'/\eta)^{(\beta+1)}}) \quad (11)$$

3.3 特征振动剂量值的提出

为不重复提取振动信息, 只取以某个局部冲击为基准整合位置整合的振动信息为最大时的信息 C_θ 构建评价指标 CVDV(C), 如式(12), (13)所示。

$$C_\theta = \max_i \sqrt[n]{\int_{t_{0,i}-\tau}^{t_{0,i}} |a_w|_\theta^n(t) dt + \sum_k V_{\theta,k,i}^n} \quad (12)$$

$$C = \sqrt[n]{\sum_\theta (k_\theta C_\theta)^n} \quad (13)$$

式(12)、(13)中: k_θ 为主轴轴向权重。

4 指标优化与验证

将特征振动剂量值指标中的待确定参数初始化为 $k_x=1, k_y=1.3, k_z=1, \tau=1.3, d=0.4, k_1=1, k_2=1.5, n=1.6, \lambda=0.4, \sigma=0.04, p=0.8$, 则对于图 3a、3e、3h 和 3l 中的情形, 所有局部冲击对应的窗函数位置和范围分别如图 7a~7d 所示, 可以认为交互效果基本满足第 2 节中讨论的要求。在此基础上, 对于每个参数再设置一个备选项, 使用 $L_{12}(2^{11})$ 正交试验表优化参数。参数备选表如表 1 所示。优化模型选为递归分割与回归树模型(recursive partitioning and regression tree, RPART)^[24]。其中, 输入变量为主轴上已经经过融合的指标值、试验者, 响应变量为主观评分值。将试验者纳入输入变量是为了降低预测误差, 因为不同的乘坐者对于同样的刺激可能有较大的感觉差异^[1,25]。RPART 中, 设置分裂所需最小节点数为 20, 复杂度参数为 0.02, 最大深度为 10, 交叉验证折数为 10。衡量误差的指标选为归一化均方误差(normalized mean square error, NMSE), 归一化的基准为均值模型。

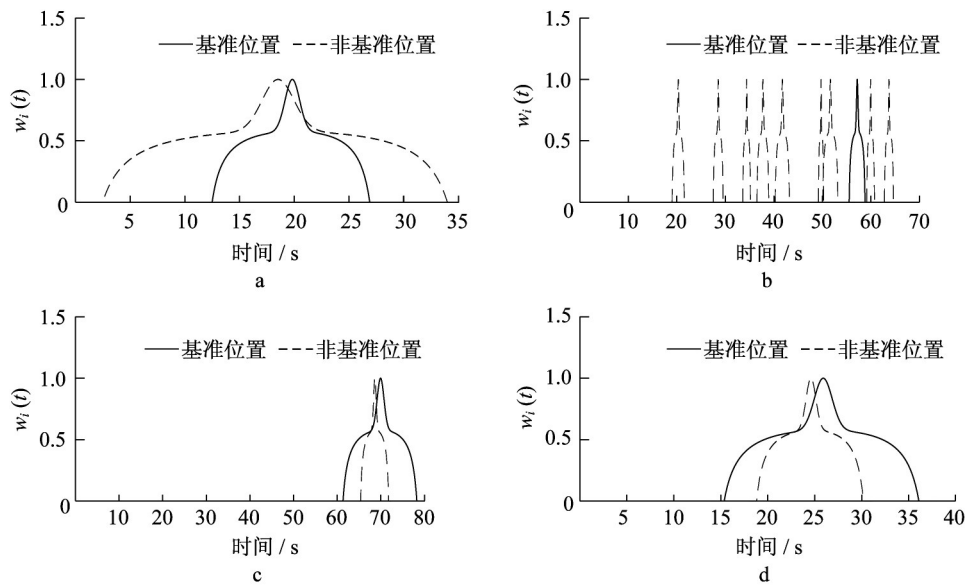


图 7 若干场景中的振动信息整合情况可视化

Fig.7 Visualization for interactive Vibration information integration in several designed scenarios

表 1 备选参数表

Tab.1 Alternative parameters

水平	主权重系数	τ	d	k_1	k_2	n	λ	σ	p
水平 1	$k_x=1.4, k_y=1.4, k_z=1$	1.3	0.4	1	1.5	1.8	0.4	0.04	0.8
水平 2	$k_x=1, k_y=1.3, k_z=1$	1.0	0.3	0.8	1.4	1.6	0.2	0.03	0.6

优化结果显示, $k_x=1.4, k_y=1.4, k_z=1, \tau=1, d=0.4, k_1=0.8, k_2=1.4, n=1.6, \lambda=0.4, \sigma=0.03, p=0.8$ 为 CVDV 的最优参数, 此时 NMSE 为 0.289, 低于 RMS 的 0.472、MTVV 的 0.348、VDV 的

0.510,显示CVDV较ISO 2631-1所规定的三大指标能取得更好的评价效果。将所有场景中的主观评分值从左至右排序,使左边组比右边相邻组的配对样本T检验的 T 值始终小于等于0,如图8a所示;在

同样的试验场景顺序下,展示最优配置下CVDV的评价结果,如图8b所示,可知该结果与代表乘坐者的真实感受的主观评分值相比,使相邻组中的对比显著性保持了完全一致。

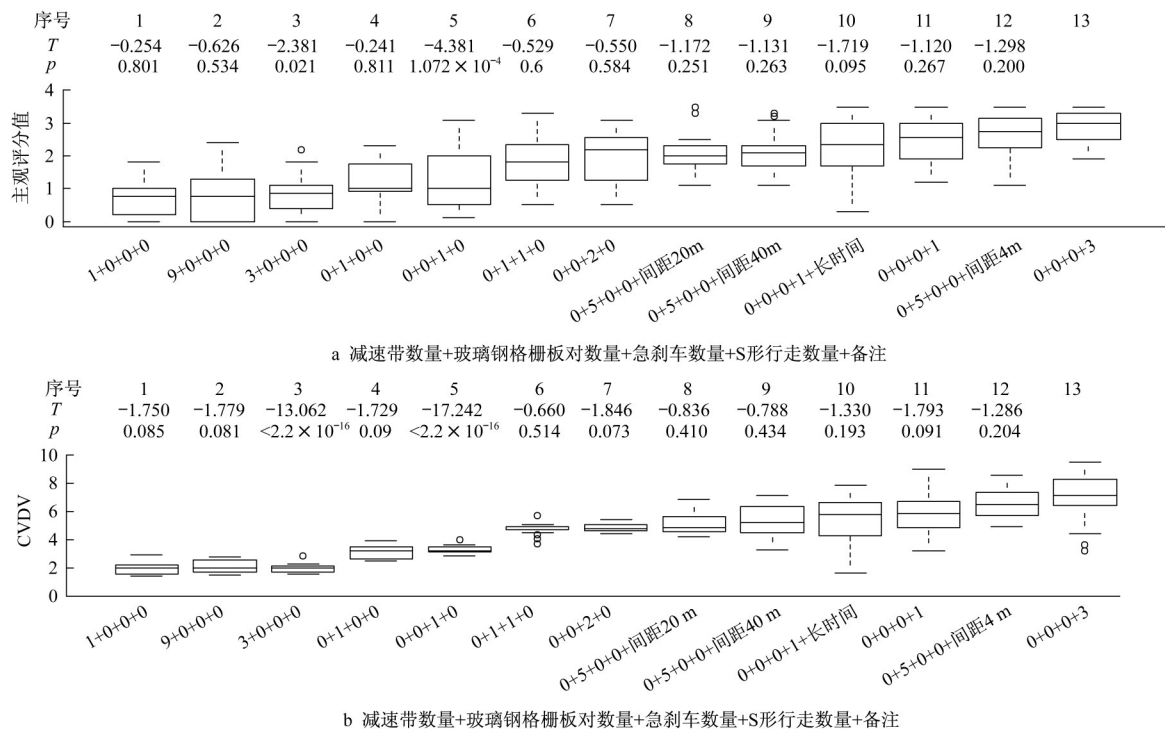


图8 最优配置下的特征振动剂量值评价结果与主观评分结果对比

Fig.8 Comparison between CVDV under the optimal configuration and subjective evaluation results

5 结语

当振动信息在时空中存在多种分布特点时,RMS、MTVV、VDV不能取得与乘坐者的主观感受一致的结果,而本文设计的特征振动剂量值指标在其参数经过正交试验优化后则可以。特征振动剂量值指标中的局部冲击使用的是累计算符,可以避免平均化算符需要标准化的问题;使用窗函数的形式进行交互,可以避免MTVV只能考虑1s内最大的振动信息而忽略其他振动信息影响的情况;窗函数的宽度与局部冲击的振动剧烈程度正相关可以避免VDV无条件地整合时空中的所有振动信息,从而造成过度整合的问题;窗函数中引入浴盆曲线可以表征局部主要激励在时空上一定范围内波动不会显著影响人的总体不舒适性的特征;窗函数中引入正态分布曲线可以表征高度集中的振动会显著增加人的总体不舒适感的特点。

特征振动剂量值通过对局部振动信息的量化与对局部化振动之间的交互作用的定义良好地平衡了

对振动信息的过度整合和欠整合,使它可以适用于振动信息在时空中具有多种分布特点的更广泛场景,提升了乘坐舒适性评价的准确性,可以作为一种新的乘坐舒适性评价方法。

参考文献:

- [1] GRIFFIN M J, ERDREICH J. Handbook of human vibration [M]. Cambridge: Academic Press, 2012.
- [2] SAYERS M W, GILLESPIE T D, QUEIROZ C A. The international road roughness experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements [R]. Washington D C: The World Bank, 1986.
- [3] International Standard Organization. Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: general requirements [S]. Geneva: International Standard Organization, 1997.
- [4] ZHAO J, WANG F, YU B, *et al*. Experimental study on the ride comfort of a crawler power chassis scale model based on the similitude theory [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 496.

- [5] GRIFFIN M J. A comparison of standardized methods for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1998, 215(4): 883.
- [6] 鲁植雄, 赵兰英, 侯占峰. 路面不平度的分形特征[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(2): 111.
LU Zhixiong, ZHAO Lanying, HOU Zhanfeng. Fractal behavior of road profile roughness [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science)*, 2008, 29(2): 111.
- [7] 王超逸. 基于多重分形特征的道路平整度评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Chaoyi. Evaluation of road roughness based on multifractal theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] PATELLI G, MORIOKA M, GRIFFIN M J. Frequency-dependence of discomfort caused by vibration and mechanical shocks[J]. *Ergonomics*, 2018, 61(8): 1102.
- [9] Office of Materials and Road Research Pavement Management Unit. 2015 pavement condition annual report [R]. Saint Paul: Minnesota Department of Transportation, 2015.
- [10] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG H20—2018[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2018.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG H20—2018 [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2018.
- [11] RODEAN S, ARGHIR M. Absorbed power as a method to evaluate the health risk of seated occupants exposed to vertical vibration [C]//Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. New York: Wiley Online Library, 2009, 9(1): 145 - 146.
- [12] International Standard Organization. Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 5: method for evaluation of vibration containing multiple shocks [S]. Geneva: International Standard Organization, 2018.
- [13] MANSFIELD N J, HOLMLUND P, LUNDSTRÖM R. Comparison of subjective responses to vibration and shock with standard analysis methods and absorbed power[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2000, 230(3): 477.
- [14] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect. Part 5: calculation method of vibration greatness level on compound vibrations[J]. *Industrial Health*, 1968, 6(1): 11.
- [15] PAPAGIANNAKIS A, RAVEENDRAN B. International standards organization-compatible index for pavement roughness [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998(1643): 110.
- [16] KARAMIHAS S M. Critical profiler accuracy requirements [R]. Ann Arbor: University of Michigan, 2005.
- [17] UECKERMAN A, STEINAUER B. The weighted longitudinal profile: a new method to evaluate the longitudinal evenness of roads [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2008, 9(2): 135.
- [18] MCCARNEY R, WARNER J, ILIFFE S, *et al.* The Hawthorne effect: a randomised, controlled trial [J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2007, 7(1): 30.
- [19] HINZ B, SEIDEL H, MENZEL G, *et al.* Effects related to random whole-body vibration and posture on a suspended seat with and without backrest [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 253(1): 265.
- [20] DEMIĆ M, LUKIĆ J, MILIĆ Ž. Some aspects of the investigation of random vibration influence on ride comfort [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 253(1): 109.
- [21] BOGSJÖ K. Development of analysis tools and stochastic models of road profiles regarding their influence on heavy vehicle fatigue [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(S): 780.
- [22] STEINWOLF A, GIACOMIN J A, STASZEWSKI W J. On the need for bump event correction in vibration test profiles representing road excitations in automobiles [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, 216(4): 279.
- [23] 余闯. 浴盆曲线及其模型相关问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
YU Chuang. Research of bathtub curve and related model issues [D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [24] BREIMAN L. Classification and regression trees [M]. Abingdon: Routledge, 2017.
- [25] FAIRLEY T E, GRIFFIN M J. The apparent mass of the seated human body: vertical vibration [J]. *Journal of Biomechanics*, 1989, 22(2): 81.