

振动的时效性对道路行驶舒适性评价的影响

陈 长, 梁远路, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点试验室, 上海 201804)

摘要: 将每个振动时刻对应于评分时刻均有一个时滞的多对一情形转化为每个过程只有一个代表时滞与之对应的一对一情形, 并检验和回归了代表时滞对主观评分的影响. 在考虑时滞的基础上, 使用分数阶微积分以考虑每个振动时刻之前的历史过程, 选取预测主观评分精度最好的阶次为最优阶次. 结果表明, 较短的时滞不会影响评分结果, 但较大的时滞能显著降低主观评分, 使用结构行为学方程能较好地拟合两者的关系. 对按频率加权的主轴加速度、旋转轴角速度分别取 0.7、0.3 阶积分可降低 11.9% 的预测误差, 这反映人对振动的累积过程比较敏感.

关键词: 道路行驶舒适性; 主观评分; 时滞; 历史过程

中图分类号: U491.2⁺55

文献标志码: A

Effect of Vibration Timeliness on Road Riding Quality Evaluation

CHEN Zhang, LIANG Yuanlu, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The many-to-one situation that each vibration moment corresponded to the scoring moment for a time lag was transformed to a one-to-one situation that each vibration process had only one representative time lag. The effect of the time lag on subjective scorings was tested and regressed. A fractional order calculus was then introduced to capture the effect of vibration history and the order that gave the best prediction precision for subjective scorings was chosen as the best order. Test results revealed that a short time lag does not influence the subjective scorings, while a longer time lag can have a significant effect. A structural behavior function was then adopted to arrive at a better description of the relationship between the time lags and the subjective scorings. If 0.7 and 0.3 order integration are used for the frequency weighted principle acceleration and angular velocity respectively, an 11.9% improvement can be achieved in the

precision error. It reflects that humans are sensitive to cumulative vibration.

Key words: road riding quality; subjective scoring; time lag; historical process

道路行驶舒适性一直是道路管理部门最关心的指标之一, 也是公众对道路服务能力最直观的反应. 最近的汽车市场调研发现, 顾客对道路行驶舒适性的提高仍然有进一步的需求^[1], 而要提高道路行驶舒适性, 首先需要对其进行准确评价.

自 20 世纪 40 年代以来, 已有多位学者和研究机构提出了对道路行驶舒适性进行评价的方法. 目前应用最广泛的是国际平整度指数^[2], 以及 ISO 2631-1^[3]和 BS 6841^[4]中使用的基于加权加速度的指标. 国际平整度指数与路段断面高程相关, 考虑了车辆特性, 可以通过广泛使用的测量仪器得到, 测量结果具有有效性、时间稳定性^[5]. 然而, 国际平整度指数采用的是简化的 1/4 车模型, 只能考虑垂直于路面方向的振动, 通用性不强. 同时, 它对人体的响应特性也缺乏考虑, 如人体对 0.5~2.5 m 的波长比较敏感^[6], 而国际平整度指数对 2.4~15.0 m 的波长比较敏感^[7], 两者的频率响应特性不一致. 国际平整度指数更适用于评价道路本身的质量, 而不适用于与人的感受建立联系. BS 6841 与 ISO 2631-1 在内容上极为相似, 考虑了多个轴向的振动, 并且基于按频率加权的加速度, 建立了加权加速度均方根、振动剂量值、最大瞬时振动值三个评价指标. 频率权重曲线被认为很好地考虑了人体对不同频率振动的响应, 但对于如何将时间因素整合到评价指标中, BS 6841 或 ISO 2631-1 存在不一致的考虑. 加权加速度均方根指标使用按时间进行平均的方式, 这可能导致评价指标仅因为时间尺度的变化就发生较大变

收稿日期: 2018-11-11

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

化,从而与人体的实际感受不一致. 振动剂量值是一种累积值,它会随时间单调递增,但人体的不舒适感并不会随时间无限递增,这种递增规律在特定的时间和空间才有效. 最大瞬时振动值只考虑了最不利的 1 s 内的振动,在用于评价全过程的不舒适性时效果不是太好^[8]. 显然,如果定义同一事物在不同的时间内具有性质上的差异,就称该事物具有时效性,那么道路行驶舒适性是具有时效性的,而目前的评价指标并未考虑时效性. 道路行驶舒适性的时效性是多方面的. Migliardi 等^[9]的研究表明,人的短时记忆信息传递到中期记忆时存在困难,这种困难会影响人在当前环境中的行为. Azizian 等^[10]的研究发现,人对近期刺激的印象要比中期刺激大,而人对于近期刺激之间的印象没有明显的差别. 确定时间的延迟对道路行驶舒适性主观评分的量化影响规律,就能确定合适的试验总时间,以避免因未考虑时间延迟而导致主客观指标之间的不一致程度变高. Griffin^[8]的研究暗示,人体对加速度的历史过程比对加速度本身更加敏感,而 BS 6841 与 ISO 2631-1 使用的评价指标都是基于加速度本身的,可能并非最合适的基准. Jiang 等^[11]揭示了一种信息集聚理论,即历史动态过程的信息会聚集到现时之前的时间,并直接影响所关注的现时变量的状态. 人体在感受每个振动时,可能受到其历史过程的影响,因此需对该过程进行量化描述,从而降低使用道路行驶舒适性客观评价指标预测人体真实道路行驶舒适性感受的误差.

1 数据采集系统

1.1 需要采集的数据

道路行驶舒适性狭义上是指振动舒适性,可以通过经历了特定路段振动的人直接给出主观评分的方式进行评价,但这种评价方式需要使人员的类型和数量满足一定要求才能使评价结果稳定,比较耗时耗力,并且该评价方式不能直接反映道路行驶舒适性受到各类客观因素的量化影响. 因此,要考虑各类客观因素,就要基于这些因素构造客观指标,然后用客观指标与主观评分之间的一致性来判断对客观因素是否考虑到位. 该过程涉及对主观评分标尺进行定义以及对客观振动数据进行采集.

1.2 主观评分标尺定义

舒适是一个十分主观的概念,在量化道路行驶舒适性时,必然涉及到主观概念(语义)与客观指标

(数值)之间的转换. 考虑到本试验需要较高的评分精度以及较好的易操作性,新的评分标尺基于大多数研究所采用的心理学上等距的概念^[12],并参考 Griffin^[8]、Borg 等^[13]和 VDI 2057^[14]给出的评分标尺而建立,如图 1 所示.

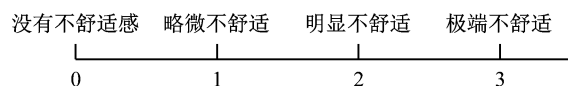


图 1 评分标尺

Fig.1 Rating scale

1.3 系统布设方案

试验使用的坐标系、设备与人员布设方案如图 2 所示. 车辆为宝骏 730 型;传感器为 JY901 型姿态传感器,以 200 Hz 的采样频率测量三个主轴的加速度(单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)以及绕三个主轴的角速度(单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$). 传感器在安装时有初始倾角,实际使用的是转换成如图 2 所示车辆坐标系下的数据. 假定车辆右后方与右前方经历的动力过程相同,右后方的传感器数据由右前方表征. 每次试验至多允许三名评分人员.

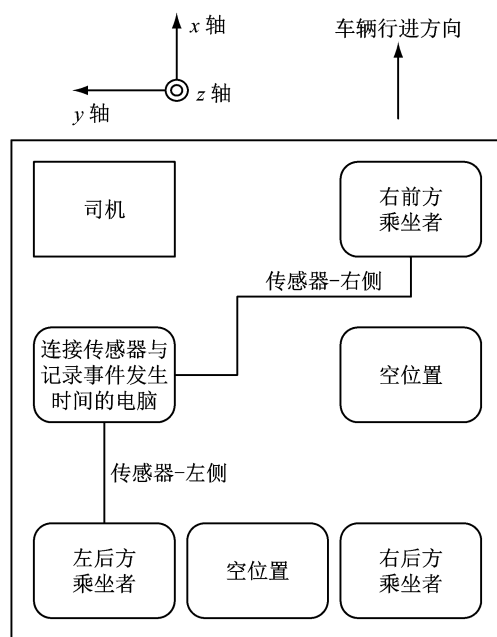


图 2 坐标系、传感器与人员的设置

Fig.2 Setting of coordinate system, sensors and crew

2 时滞对评分结果的影响

2.1 代表时滞的定义

在进行道路行驶舒适性主观评分试验时,每个振动时刻与评分时刻均对应一个时滞,因此在考虑

时滞对评分结果的影响时需要每个时滞加以考虑,这增加了分析的难度.如果每段路的行驶舒适性完全由其中的一个瞬时振动决定,就能简化分析过程,但这种路并不实际存在.从工程学的角度,可以选择一些道路行驶舒适性主要受局部路段影响的道路,以局部路段的振动属性来代表全路段的振动属性,从而获取到一个明确而单一的振动烈度和时滞的表示.对于振动烈度,ISO 2631-1 中提供的振动剂量值是到目前为止较好的评价指标^[15-16],计算式为

$$a_{VDV,i} = \left(\int_0^T Y_i^4(t) dt \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中: T 为总时间; t 为时刻; Y 为按频率加权的动力指标; i 为基准轴,可以是 x 轴、 y 轴、 z 轴、绕 x 轴、绕 y 轴、绕 z 轴.

对于时滞,可以定义评分时刻与对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段的结束时刻之差为代表时滞,用于代表整个路段的振动时滞.对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段可以定义为:一主轴的振动剂量值是其他任意主轴加权振动剂量值的 80% 以上的最小连续时间段.其中,轴向权重使用 ISO 2631-1 中规定的权重.对于这种主要影响,可以通过对比和假设检验加以验证.

2.2 代表时滞对评分结果的影响显著性检验

上海市曹安公路 4800 号的李庄环道长 1.3 km,全路段存在两处较大变形,一处为减速带,另一处为沥青路面局部异常凸起.通过减速带时降低行驶速度,其他时刻均以 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度逆时针行驶,可使沥青路面存在局部异常凸起的局部路段成为对道路行驶舒适性有主要影响的路段.

将沥青路面局部异常凸起(见图 3)前约 40 m 的地方标记为位置 1,再标记位置 2 和位置 3,使这三个点将环道三等分.试验时,分别将这三个点作为起



图 3 试验环道中的沥青路面局部异常凸起
Fig.3 Abrupt bulge in the test loop road

点和终点,使用秒表记录人员的评分时刻与车辆行驶完沥青路面存在异常凸起时刻的时间差作为代表时滞.补充位置 1 到位置 3 路段的评分试验,作为未经历沥青路面异常凸起的对照.

本次试验一共有 24 人参与,其中男性有 13 人,女性有 11 人.人员的年龄范围为 20~25 岁,身高范围为 153~183 cm,体重范围为 46~78 kg.评分结果的箱线图及相邻组之间的配对样本 t 检验结果如图 4 所示.图 4 中 p 值下标连字符所连接的数字为图 4 中从左自右的组号.

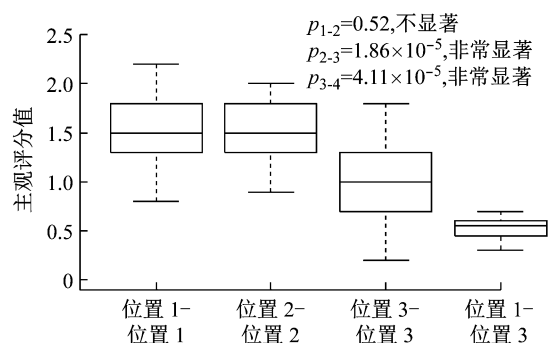


图 4 环道试验评分结果箱线图

Fig.4 Boxplot of the rating results

设置显著性水平为 0.05.图 4 中,第一、第二组的对比结果显示,较短的时滞不会显著影响评分结果;第二、第三组的对比结果显示,较长的时滞能显著影响评分结果;第三、第四组的对比结果显示,本试验中的评分受到沥青路面局部异常凸起的显著影响,该变形及其附近是对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段.

如图 4 第一、第二组所示对比试验中,同一个人的评分会存在差异,这种差异可以认为是个人感受的随机误差^[17],这两处配对样本评分的残差平方和为 3.83.如图 4 第二、第三组所示对比试验中,同一个人评分结果的差异可以认为是个人感受随机误差与代表时滞影响的叠加,这两处的配对样本残差平方和为 12.22.由此可见,对于这三组试验,如不考虑时滞的影响可以带来 219% 的残差平方和误差增加.

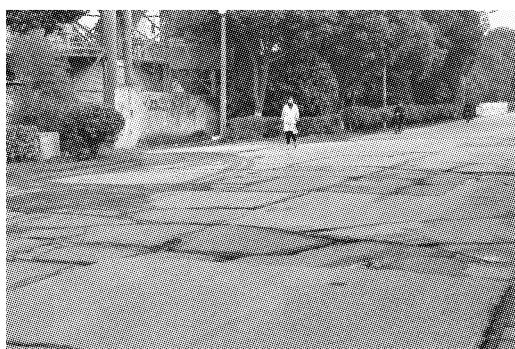
2.3 不同刺激下代表时滞对评分结果影响的量化

已知代表时滞能影响评分结果,为获取不同路面刺激类型下代表时滞对评分结果的影响,需增加不同场景下的试验.增加上海市绿环路、翔方路两个特定场景,两个场景中均分别存在局部较大变形(见图 5),并且局部较大变形处及其附近均分别为对相应路段的道路行驶舒适性有主要影响的路段.新增的试验中,参与试验的人数为 36 人,其中男性有 23

人,女性有13人。人员的年龄范围为20~50岁,身高范围为153~180 cm,体重范围为44~105 kg。通过控制行驶路线和行驶速度可使代表时滞分别为短、中、长三种定性类型,从而得到不同程度代表时滞下的评分结果。在通过如图5所示两类路面刺激时,始终保持 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度,以保证对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段的主要轴向 z 轴振动剂量值稳定。一次试验的 z 轴加速度时间历程曲线如图6所示。其中,对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段使用椭圆标记。所有试验的主观评分结果对代表时滞的散点图如图7所示。



a 绿环路上的局部较大变形



b 翔方路上的局部较大变形

图5 新增加的两类不同刺激

Fig.5 Newly added two types of road stimuli

由图7可知,三条试验路上均观察到较长的时滞使整体评分结果降低的现象,但由于三条路的评分均值不同,其结果不能直接对比。将三条路上的评分结果分别除以对应的时滞定性为“短”的评分结果的均值以归一化,然后分别使用孙立军^[5]提出的结构行为学方程、Wang等^[18]提出的记忆权重函数、Ebbinghaus^[19]提出的遗忘曲线和线性回归对归一化后的评分试验结果进行拟合,拟合结果如表1所示。

表1中, y 为归一化评分, t 为时滞。表1中的所有方程都过(0,1)点,表示时滞为零时不会对评分结

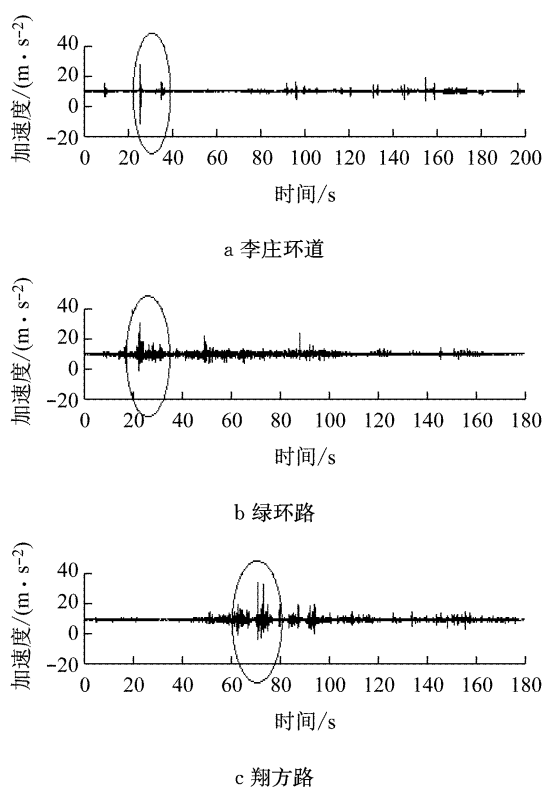
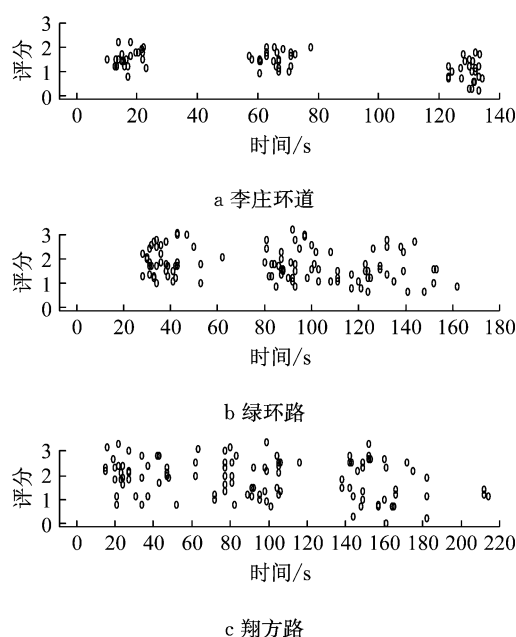
图6 三条试验路上的 z 轴加速度时间历程曲线Fig.6 z axis acceleration history of three test roads

图7 三条试验路上的主观评分结果与代表时滞关系散点图

Fig.7 Scatter plot of subjective scorings to representative time lags of three test roads

果产生影响。回归结果表明,结构行为学方程的拟合优度最高,并且模型参数更有规律。李庄环道、绿环路和翔方路上对道路行驶舒适性有主要影响的局部路段,其主轴振动剂量值主要集中在 z 轴,分别为 2.162 、 2.759 、 $3.352 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1.75}$,逐渐递增,此时结构

表 1 不同时滞下评分结果变化趋势的拟合结果

Tab.1 Fitting results of ratings to time lags

方程名称	方程形式	模型参数 取值范围	李庄环道		绿环路		翔方路	
			最优参数	R^2	最优参数	R^2	最优参数	R^2
结构行为学方程	$y=1-\exp\left(-\left(\frac{a}{t}\right)\right)$	$a>0$ $b>0$	$a=130$ $b=1.90$	0.72	$a=180$ $b=1.55$	0.75	$a=230$ $b=1.05$	0.79
记忆权重函数	$y=\left(1-\frac{t}{a}\right)^b$	$a>0$ $b>0$	$a=139$ $b=0.15$	0.71	$a=163$ $b=0.10$	0.75	$a=227$ $b=0.20$	0.79
遗忘曲线	$y=\frac{a}{(\ln(1+t))^b+a}$	$a>0$ $b>0$	$a=2\ 900$ $b=4.4$	0.68	$a=7\ 700$ $b=4.5$	0.74	$a=15\ 900$ $b=5.1$	0.78
线性回归	$y=at+1$		$a=-0.002\ 3$	0.69	$a=-0.001\ 1$	0.74	$a=-0.001\ 3$	0.78

行为学方程的寿命因子 a 有规律地递增,表示需要更长的时滞才能使评分结果显著降低;模式因子 b 则有规律地递减,表示对于超过寿命因子的时滞,评分结果的衰退更加缓慢。

2.4 将代表时滞对人体主观感受的影响考虑到物理量中

表 1 中的方程形式是直接应用于主观评分的,而在实际操作中,更多时候是使用客观物理量来表征主观评分,因此需要探讨考虑代表时滞的客观物理量.德国心理学家费兹勒通过系统地研究人对一些可感受到的物理量的心理估计,得出著名的费兹勒心理定律^[20],如下所示:

$$R \propto B \log \frac{A}{A_0} \quad (2)$$

式中: \propto 为正比例符号; R 为人对某一物理量 A 的心理反应; B 为感应系数; A_0 为阈值,人体不能感知阈值之下的物理量.为避免对阈值的讨论,将式(2)改为如下形式:

$$R \propto B \log(1+|A|) \quad (3)$$

当主观评分的值被乘以表 1 中的归一化评分 y 时,为维持费兹勒心理定律,相当于将原客观物理量转换为以下形式:

$$\operatorname{sgn}(A)((1+|A|)^y - 1) \quad (4)$$

式中: $\operatorname{sgn}()$ 为符号函数。

对客观物理量施加如式(4)所示的变换,则相当于考虑了代表时滞对主观评分的影响。

3 历史振动过程对人的影响

Wikström 等^[21]的研究表明,人连续经历两个同样的路面刺激,第二个刺激会被评价为更不舒适,相较于它被放在第一个位置的时候.因此,人对振动的历史过程可能是敏感的,需要对其进行量化考虑,以增加客观评价指标与主观评分之间的一致性.对历史过程进行描述,可以考虑使用分数阶微积分,对于离散系统,可以使用最直接的 Grünwald-Letnikov

型分数阶微积分^[22],如下所示:

$${}_l^{\text{GL}} D_u^k f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^k} \sum_{j=0}^{(t-u)/h} (-1)^j \binom{k}{j} f(t-jh) \subseteq \frac{1}{h^k} \sum_{j=0}^{(t-u)/h} w_j^k f(t-jh) \quad (5)$$

式中:GL 为 Grünwald-Letnikov 的缩写; u, l 分别为下、上限; k 为阶数,取负数时代表积分; h 为步长; $f()$ 为原函数; t 为时刻. $w_j^k = (-1)^j \binom{k}{j}$ 为函数 $(1-z)^k$ 的多项式系数,可用如下递推公式求得:

$$w_0^k = 1, w_j^k = \left(1 - \frac{k+1}{j}\right) w_{j-1}^k, j = 1, 2, \dots \quad (6)$$

对于按频率加权的主轴加速度,可做至多 1 次微分、至多 2 次积分;对于按频率加权的旋转轴角速度可做至多 1 次积分、至多 2 次微分,微积分阶数的间距设置为 0.1. 该设置对动力指标的讨论范围填补了国际平整度指数所提出的基于位移的指标、ISO 2631-1 或 BS 6841 所提出的基于角速度或加速度的指标、Liu 等^[23]所提出的基于急动度的指标之间的空白,可认为是对上述指标的扩展.对于位移的积分或者位移的三阶以上微分,由于物理意义不强,不做讨论。

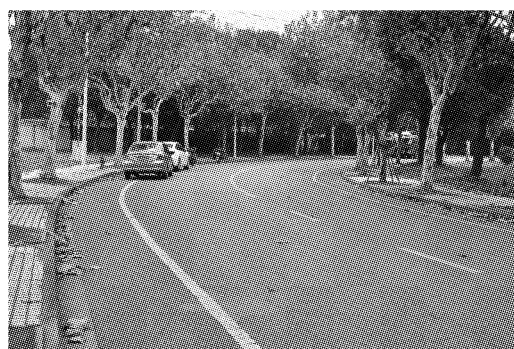
基于动力指标的分数阶微积分所建立的评价模型,如果对于预测道路行驶舒适性主观评分拥有更高的预测精度,就认为人体对于振动的历史过程是敏感的,相应阶次的分数阶微积分更能反映人体对动力量的感知. ISO 2631-1 或 BS 6841 均没有提供基于动力指标分数阶微积分的评价模型;ISO 2631-1 或 BS 6841 提供的模型均不能将试验人员作为分类变量考虑进预测变量以降低评价误差;ISO 2631-1 提供的评价模型只能考虑单轴振动,而目前的评价趋势是考虑多轴振动^[24];BS 6841 为每个轴分配了固定权重,而人对多轴振动的综合感应不应该是所有轴的简单叠加^[25]. 基于上述考虑,在预测模型上采用递归分割与回归树(RPART)模型^[26]. 其

中,预测变量为试验人员、各主轴以及各旋转轴基于动力指标分数阶微积分的振动剂量值,响应变量为主观评分值. 模型预测精度的衡量采用归一化均方误差(NMSE),归一化的基准为均值模型. 设置 RPART 模型的复杂度参数为 0.1,分裂所需最小样本数为 20,节点最小样本数为 6,最大深度为 20,交叉验证的折数为 10. 为使模型能包含对多个轴向振动的考虑,补充如图 8 所示的试验场景,以使多个轴向上的振动都有较大变化. 在图 8a 场景的直线上以

轻、重两种程度分别做刹车动作或 S 型行走动作;以 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度分别通过图 8a 场景上的小半径转弯和图 8b 场景上的大半径转弯;以快、慢两种速度分别通过图 8c 场景上的楔形台阶或图 8d 场景上的减速带. 每人对每次场景试验进行道路行驶舒适性主观评分. 新增试验场景的参与人员共计 37 人,其中男性 23 名,女性 14 名. 人员的年龄范围为 19~50 岁,身高范围为 153~183 cm,体重范围为 46~92 kg.



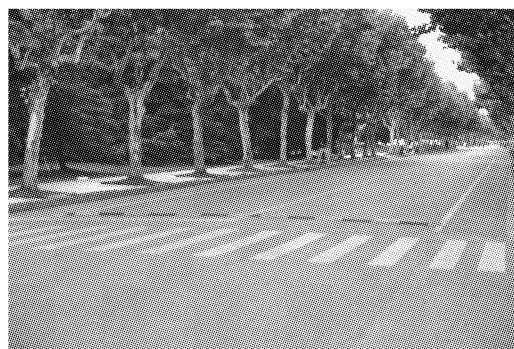
a 直道和小半径转弯



b 大半径转弯



c 楔形台阶



d 减速带

图 8 新增试验场景

Fig.8 Newly added testing scenarios

对于基于分数阶微积分的动力指标,结合式(4)和式(5),将式(1)中的 Y 替换为如式(7)所示 $Y_i^k(t)$ 的形式. RPART 模型的输入数据为如图 3、图 5、图 8 所示试验场景的所有数据. 图 3、图 5 所示试验场景的 y 按表 1 中的结构行为学方程及其对应参数来确定;对于图 8 所示试验场景,试验总时间均小于 60 s,根据图 6 及图 7 的结果,可认为代表时滞不会对评分结果造成显著影响,取 y 恒为 1. 对于各主轴、各旋转轴,分别取相同的微积分阶数,构成 31×31 个预测模型. 模型的预测精度分布等高线图如图 9 所示.

$$Y_i^k(t) = {}_t^{\text{GL}} D_u^k \left(\sum_m (\beta_{\text{IMF},m} (\text{sgn}(A(t)) ((1 + |A(t)|)^y - 1)) w_i(f_m(t))) \right) \quad (7)$$

式中: A 为传感器采集的原始动力指标,分别为主轴加速度或旋转轴角速度; $\beta_{\text{IMF},m}$ 为对传感器原始动力指标进行希尔伯特-黄变换后得到的第 m 个本征模态函数(IMF); $f_m(t)$ 为第 m 个 IMF 在时刻 t 的瞬时频率; w 为 ISO 2631-1 中规定的频率权重函数,其取值与轴向 i 、瞬时频率 $f_m(t)$ 有关.

由图 9 可知,以对主轴按频率加权加速度的 0.7 阶微分、对旋转轴按频率加权角速度的 0.3 阶微分为中心,往四个角方向模型预测精度降低的趋势十分明显. 该中心点处的归一化均方误差为 0.592,比未做分数阶微积分运算的模型的归一化均方误差 0.672 降低了 11.9%.

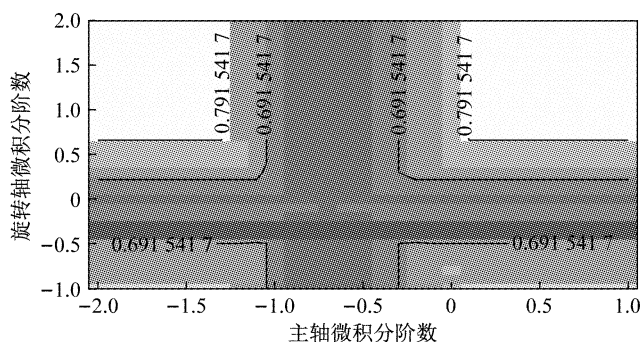


图 9 模型预测精度分布

Fig.9 Distribution of model precisions

4 结语

较短的代表时滞不会使主观评分结果发生显著差异,而较长的代表时滞可使主观评分呈现统计性的降低。因此,在人体经历振动刺激后较短时间内进行评分可以忽略时滞对主观评分结果的影响,而如果在较长的时间后再进行评分,则需将时滞的影响修正到主观评分或客观物理量中,以使主客观评价结果不会因为时滞的作用而产生较大的不一致。文献[27]中道路行驶舒适性试验将每次试验的时间确定为 5 min,试验时间可能过长。就已经验证的试验场景来看,将试验总时间控制在 60 s 以内可以忽略时滞对主观评分的影响。

对主轴按频率加权的加速度和旋转轴按频率加权的角速度分别做 0.7 阶积分和 0.3 阶积分时所构建的振动剂量值较未做分数阶微积分运算时可取得更好的预测精度,这表明人体对这两个物理量在历史过程中一定程度的累积更加敏感。对主轴按频率加权的加速度取 0.1 阶及以上微分、1.3 阶及以上积分,或对旋转轴按频率加权的角速度取 0.7 阶及以上微分均是不合适的,因为在此联合区域内,模型的预测精度均有明显降低。

参考文献:

[1] MASTINU G, PLOECHL M. Road and off-road vehicle system dynamics handbook[M]. Boca Rato: CRC Press, 2014.

[2] SAYERS M W. The international road roughness experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements[R]. Washington DC: The World Bank, 1986.

[3] ISO. Mechanical vibration and shock, evaluation of human exposure to whole body vibration, Part 1 general requirements: ISO 2631-1 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.

[4] British Standards Institution. Guide to the measurement and evaluation of human exposure to whole body mechanical vibration and repeated shock; BS 6841[S]. London: British Standard, 1987.

[5] 孙立军. 道路与机场设施管理学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

SUN Lijun. Transportation infrastructure management system: theory and practice [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[6] HEGMON R R. Some results from ongoing research on road roughness [M]. West Conshohocken: ASTM International, 1992.

[7] GAGARINE N, MEKEMSON J R, NEMMERS C J. Assessing IRI vs. PI as a measurement of pavement smoothness[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2006.

[8] GRIFFIN M J. Handbook of human vibration[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2012.

[9] MIGLIARDI M, GAUDINA M. Active personal information manager: a system for human memory support [C]// International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. Seoul: IEEE, 2011: 583-588.

[10] AZIZIAN A, POLICH J. Evidence for attentional gradient in the serial position memory curve from event-related potentials [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2007, 19(12): 2071.

[11] JIANG P, KUMAR P. Information transfer from causal history in complex system dynamics[J]. Physical Review E, 2019, 99(1): 12306.

[12] 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[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[13] BORG G, GEISSLER H G, PETZOLD P. Psychophysical judgment and the process of perception[M]. Frankfurt: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1982.

[14] Verein Deutscher Ingenieure. Effect of mechanical vibrations on human beings; VDI 2057[S]. Düsseldorf: VDI Publication, 1987.

[15] 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.

[16] PADDAN G S, GRIFFIN M J. Effect of seating on exposures to whole-body vibration in vehicles [J]. Journal of Sound & Vibration, 2002, 253(1): 215.

[17] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Effect of muscle tension on non-linearities in the apparent masses of seated subjects exposed to vertical whole-body vibration[J]. Journal of Sound & Vibration, 2002, 253(1): 77.

[18] WANG J L, LI H F. Surpassing the fractional derivative: concept of the memory-dependent derivative[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2011, 62(3): 1562.

[19] EBBINGHAUS H. Memory: a contribution to experimental psychology[J]. Annals of Neurosciences, 2013, 20(4): 155.

[20] FECHNER G T, BORING E G, ADLER H E, et al. Elements of psychophysics [M]. Ballwin: Holt Rinehart & Winston, 1966.

参考文献:

- [1] 丰志强, 阎楚良, 张书明. 飞机机载设备振动环境谱的数据处理与编制[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 465.
FENG Zhiqiang, YAN Chuliang, ZHANG Shuming. Data processing and compilation of vibration environmental spectrum for aircraft airborne equipment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(1): 465.
- [2] 田永卫, 阎楚良, 张书明, 等. 飞机随机振动环境实测试验数据的归纳方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1129.
TIAN Yongwei, YAN Chuliang, ZHANG Shuming, *et al.* Inductive method of flight test data measured from aircraft random vibration environment [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2014, 34(6): 1129.
- [3] 振动、冲击环境测量数据归纳方法: GJB/Z126-99[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
The inductive methods for environmental measured data of vibration and shock: GJB/Z126-99 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [4] International Electrotechnical Commission Technical Committee 9. Railway applications, rolling stock equipment-shock and vibration test: IEC 61373—2010 [S]. Geneva: Standards Press of International Electrotechnical Commission, 2010.
- [5] 丁杰, 张平, 王鹏. 机车车辆设备振动试验标准与实测数据的分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 129.
- [6] SLIFKER J F, SHAPIRO S S. The Johnson system: selection and parameter estimation [J]. *Technometrics*, 1980, 22(2): 239.
- [7] 罗敏, 姜同敏, 袁宏杰. 一种可靠性试验实测振动数据的处理方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007(10): 1237.
LOU Min, JIANG Tongmin, YUAN Hongjie. Method for inducing reliability test measured vibration data[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007(10): 1237.
- [8] OWEN D B, LI H. The starship for point estimates and confidence intervals on a mean and for percentiles [J]. *Communication in Statistic Simulation and Computation*, 1998, 17: 325.
- [9] 谭炳麟. 随机振动数据的数字功率谱分析[J]. 上海交通大学学报: 自然科学版, 1979(1): 93.
TAN Binglin. The date digital spectral analysis in random vibration[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Natural Science Edition*, 1979(1): 93.
- [10] 姜兴渭, 石伟, 张跃民. 随机振动数据处理数字化方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985(3): 54.
JIANG Xingwei, SHI Wei, ZHANG Yuemin. A study of the digitization method of data processing for random vibration[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1985(3): 54.
- [21] WIKSTRÖM B O, KJELLBERG A, DALLNER M. Whole-body vibration: a comparison of different methods for the evaluation of mechanical shocks[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1991, 7(1): 41.
- [22] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004.
XUE Dingyu, CHEN Yangquan. Advanced applied mathematical problem solutions with MATLAB [M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [23] LIU C, HERMAN R. Road profile, vehicle dynamics, and ride quality rating [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1999, 125(2): 123.
- [24] 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.
- [25] DEMIC M, LUKI C J, MILI C Ž. Some aspects of the investigation of random vibration influence on ride comfort[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 253(1): 109.
- [26] BREIMAN L. Classification and regression trees [M]. Abingdon: Routledge, 2017.
- [27] 高增礼, 张玉芬. 路面性质对乘坐舒适性影响的主观评价[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 33.
GAO Zengli, ZHANG Yufen. Pavement characteristics on subjective road riding comfort assessment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 8(1): 33.

(上接第 1476 页)