

脚部受振疲劳对驾驶人制动反应时间的影响

运伟国,肖润谋,李 彬

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为研究机动车驾驶人在振动环境中脚部振动疲劳对行车制动反应时间的影响,选择 12 名身心健康的受试志愿者进行试验。受试志愿者在性别、年龄、体重、职业等方面有一定的代表性,符合中国驾驶人的基本情况。首先在电磁振动台上安装空气座椅及制动踏板模拟真实的驾驶环境,利用 $[0,1]$ 区间估量法对驾驶人脚部振动响应进行评价;然后利用 VBOX 数据采集系统,依次测量得到 12 名受试志愿者脚部承受标准激励(频率 8 Hz,幅值 6.45 m/s^2)约 2 min 振动前后的制动反应时间。试验结果表明:12 名受试志愿者坐姿的脚部振动疲劳降低工效界限对应的振动加速度均值为 6.45 m/s^2 ;经历 2 min 脚部振动疲劳后,受试志愿者制动反应时间平均延长 0.33 s,且制动过程中出现滞速现象明显增多,主观感受脚部发麻,动作迟钝,表明脚部振动疲劳对驾驶人制动反应时间影响显著;基于国际标准 ISO 2631 中人体对于振动的反应与振动的能量关系和连续 4 h 驾驶条件,计算得到中国驾驶人坐姿脚部振动疲劳降低工效界限对应的垂直方向振动限值为 0.59 m/s^2 ,因此在确定中国驾驶人制动行为模型时应充分考虑脚部振动疲劳对其制动反应时间的影响。研究结论可为车辆驾驶室地板振动限值制定及车辆智能驾驶辅助系统研发提供参考。

关键词:交通工程;脚部振动;心理学评价;制动反应时间;智能辅助驾驶系统

中图分类号:U491.254

文献标志码:A

Influence of feet vibration fatigue on driver braking reaction time

YUN Wei-guo, XIAO Run-mou, LI Bin

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the driver's feet vibration fatigue effect on braking reaction time when the whole body exposed to vibration environment, 12 healthy trial volunteers served as the subjects. The volunteers had a certain representation in gender, age, weight, occupation, etc. They met the basic standards of domestic drivers. At first, an experiment was proceed through the $[0,1]$ interval analogy evaluation method, using electromagnetic vibration exciter installed a real seat and a brake pedal to simulate the driving vibration environment. Secondly, the braking reaction time of every volunteer was experimented by the VBOX braking measurement system before and after volunteer's foot suffered about two minutes vibration which is determined by the result of preliminary test (frequency 8 Hz, amplitude 6.45 m/s^2). The results show that the corresponding average amplitude of vibrating acceleration to the efficiency boundary reduced for the feet vibration fatigue of 12 volunteers sitting is 6.45 m/s^2 , and the average braking feedback

time of volunteers after 2 min tiredness of feet vibration for 2 minutes has been prolonged to 0.33 s. Moreover, the hysteresis speed for volunteers after the feet vibrating tiredness during braking has been increased tremendously. Volunteers felt numb and sluggish in their foot. It shows that the tiredness of feet has had an obvious impact on the time of braking for drivers. In addition, 0.59 m/s^2 is calculated from the vibration limiting value of vertical direction orientation corresponding to the reduced efficiency boundary of feet vibrating tiredness for Chinese drivers under consecutive 4 h driving based on ISO 2631 the relationship between vibrating feedback and energy for body in this paper. Thus, the effects of feet vibrating tiredness on braking reaction time must be fully considered when the model of braking behavior setting for Chinese drivers are confirmed. The conclusion of this paper can provide a reference for the design of braking limiting value on the floor of vehicles and the development of vehicle intelligent driving assistance system. 3 tabs, 4 figs, 20 refs.

Key words: traffic engineering; feet vibration; psychological evaluation; braking reaction time; intelligent assisted driving system

0 引言

根据中国道路交通事故统计,约74%的道路交通事故与驾驶人操作行为直接相关^[1-2],驾驶人制动反应时间是影响道路交通安全的最主要因素之一。驾驶人制动反应时间通常是指驾驶人从接收到制动信号开始至驾驶人脚部移动到制动踏板所历经的时间。但在实际研究中经常包括制动器协调时间,即驾驶人脚部接触制动踏板开始至踏板力达到最大时所经历的时间。本文研究中,驾驶人制动反应时间是广义的,包含制动器协调时间。目前已有许多关于驾驶人制动反应时间的研究。李霖等通过在出租车、警车和私家车安装行车记录仪,采集目标地区的真实交通工况,通过对视频信号的筛选与统计,研究了驾驶人在真实交通危险工况中的制动反应时间,结果表明驾驶人制动反应时间随危险工况类型的不同而不同^[3-4];王畅等基于虚拟现实技术,利用驾驶模拟器对多名驾驶人在不同场景下的制动反应时间进行测试研究,结果表明熟练驾驶人的制动反应时间略长于非熟练驾驶人,年轻驾驶人的制动反应时间稳定性较好^[5];吕长民等研究了高速公路环境下的安全跟车距离,使用驾驶模拟器对驾驶人制动反应时间进行研究,首次提出了疲劳驾驶与制动反应时间之间的关系^[6];林庆峰等利用图像记录仪记录了大量追尾事故的驾驶行为数据,分析了制动反应时间对行车安全的重要性,建立了符合驾驶人感知特性的车辆追尾预警算法^[7-8];马艳丽等采用试验心理学测试方法,研究了驾驶人不同驾驶时间下的感知、判断和操作特性,建立了连续驾驶时间与感知、判

断及操作特性各测评指标间的关系模型,提出了基于安全驾驶的最长驾驶时间^[9]。上述文献采用不同方法对驾驶人制动反应时间进行了研究,但未对驾驶人脚部振动疲劳对制动反应时间的影响进行研究。中国对人体承受机械振动的响应特性和疲劳研究始于20世纪90年代。汪芳子等利用振动试验台对53名受试者坐姿承受随机振动的动态响应进行了研究,结果表明不同人体对同一方向振动的频响曲线相似^[10];高利等使用同样的试验方法对人体卧姿状态下的动态响应特性进行了试验研究,得到了卧姿人体承受全身振动、舒适性振动等感觉曲线^[11];苏锦涛等对拖拉机驾驶人的疲劳进行了研究,使用振动台模拟了拖拉机座椅振动环境,分析了振动加速度对驾驶人心率变化及身体疲劳的影响^[12]。上述研究均采用同样的振动模拟系统对人体的振动特性及疲劳进行了研究,但对振动的评价方法各不相同,总体上分为心理学和生理学2类评价方法。

在上述研究基础上,本文结合近期卡车司机频繁抱怨车辆传动轴系高频(频率不小于8 Hz)振动引起驾驶人脚部操作行为能力下降问题,重点研究驾驶人脚部在振动环境下,脚部振动疲劳后对其制动反应时间的影响。试验采用振动模拟系统提供振动环境,使用 $[0,1]$ 区间估量法进行振动感受的评价,通过对12名受试志愿者的研究得到驾驶人坐姿脚部振动疲劳降低工效界限对应的振动加速度。另外,通过搭建尾灯系统模拟前车制动尾灯或交通信号灯,运用VBOX数据采集系统和踏板力传感器,研究驾驶人制动反应时间在脚部振动疲劳前后的变化规律,为建立更准确的驾驶人制动行为模型提供

参考。

1 试验系统及环境

1.1 振动环境模拟系统

试验所需振动环境由电磁振动台提供,最大推力 3 000 N,频率 5~2 000 Hz,振动台面为正方形,边长 700 mm。试验台振动控制系统为德国产的 VibControl 振动控制系统,加速度传感器为美国

PCB 公司的 ICP353B15 型传感器。试验用座椅选用空气簧减振座椅(隔振性能较好,避免振动对身体其他部位的影响而导致试验结果偏差),通过设计工装使用螺栓与振动台固连,并按座椅设计要求提供标准压缩空气。另外,参考某车型人机布置,在振动台面合适位置安装制动组合踏板,按设计要求提供压缩空气,由 2 个压缩空气储气室模拟实车负载。振动环境模拟系统如图 1 所示。

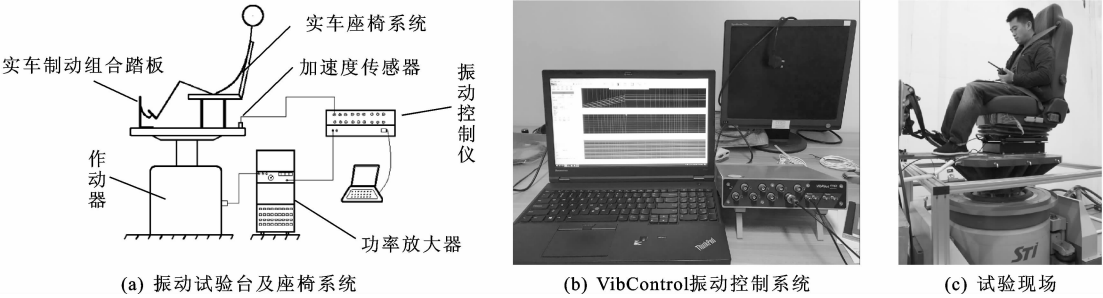


图 1 驾驶人坐姿脚部振动环境模拟系统

Fig. 1 Feet vibration simulation system for driver sitting posture

1.2 制动反应时间测试系统

驾驶人在驾驶过程中有 90% 以上的交通信息是通过视觉获得的,在常规行驶过程中驾驶人对车辆制动的判断一般是依据前方车辆制动灯和交通信号灯,所以本试验设计了一个尾灯系统,布置在座椅前方合适位置,模拟前车制动。该信号灯开关信号由数据采集人员控制触发开关实现,踏

板力信号采集通过安装在组合踏板上的踏板力传感器实现,如图 2 所示。使用 VBOX 数据采集系统记录信号灯触发信号与踏板力变化信号,数据采集人员控制信号灯点亮的同时可以触发该采集系统开始采集,使该系统准确获得制动触发信号和踏板操作行为之间的关系曲线。测量系统采样频率为 100 Hz。

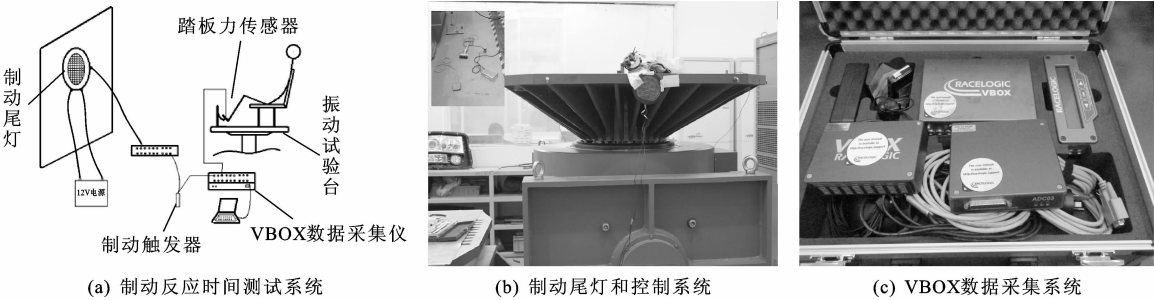


图 2 制动反应时间测试系统

Fig. 2 Braking reaction time measurement system

1.3 试验环境要求

全部试验在室内进行,室内温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $55\% \pm 10\%$,气压 101 kPa,实验室背景噪声 40 dB(A),试验时噪声小于 70 dB(A),在整个试验过程中无异常噪声和其他影响振动评价的外界刺激。

2 受试志愿者

试验结果的准确性直接受到受试志愿者的影响。对每位受试志愿者的身体进行检查,确认其身

体健康,无躯干疾病史,无重大脑部疾病,无心理疾病与器质性疾病史。受试志愿者在性别、年龄、体重和职业等方面具有一定的代表性,符合中国驾驶人的基本情况。

根据国外心理测量学研究结果,要使心理测量结果置信度为 95%、误差为 0.5%,所需测量的人数必须达到 8~12 人^[13]。参考文献[14]中关于中国男青年坐姿垂直方向等感觉振动曲线的研究方法并结合实际情况,本文确定受试志愿者人数为 12 人,

其中年龄最小 25 岁,最大 50 岁,平均年龄 34.5 岁,标准差 7.8。所有受试志愿者均可安全、独立驾驶车辆。受试志愿者实际驾龄最小 3 年,最大 20 年,平均驾龄 8.3 年,标准差 5.5。受试志愿者身高最

低 1.62 m,最高为 1.82 m,标准差 5.0,基本满足 95%中国人群身高特征。受试志愿者年龄、身高及职业等情况见表 1。所有受试志愿者在试验过程中和试验后身体状况良好。

表 1 受试志愿者基本信息
Tab. 1 Basic information of 12 trial volunteers

受试志愿者编号	年龄	实际驾龄/年	驾照类型	身高/cm	体重/kg	籍贯	职业
1	50	20	C1	170	75	甘肃	出租车驾驶人
2	35	7	B2	162	62	陕西	讲师(博士)
3	31	7	C1	178	90	广西	工程师
4	31	6	B2	176	64	陕西	货车专业驾驶人
5	25	4	C1	177	66	云南	硕士研究生
6	29	5	C1	180	77	山西	工程师
7	26	4	A2	175	80	陕西	货车专业驾驶人
8	29	3	C1	170	70	上海	工程师
9	34	7	C1	175	85	吉林	白领
10	46	10	A1	182	80	深圳	客车驾驶人
11	45	20	A1	175	75	浙江	出租车驾驶人
12	34	7	C1	175	85	吉林	白领

3 试验方法及过程

人体承受振动的评价方法包括生理学指标评价方法和心理学指标评价方法。人体是一个极其复杂的系统,当人体受到振动后生理学指标的变化往往会引起心理学指标的变化;同样,受振后其心理学指标的变化也会引起生理学指标的变化,两者相辅相成,相互影响。本文采用心理学指标评价方法中的[0,1]区间估量法对驾驶人脚部受振进行评价。该方法实际上可以把振动刺激的所有响应,即心理连续量取值限定在[0,1]区间内,且认为 0 为外界刺激响应的下限,1 为外界刺激响应的上限。本文研究的脚部受振试验,规定 0 为没有振动感觉,1 为对振动强度无法忍受。要求受试志愿者在[0,1]区间内给出能表达自己响应的尽可能小的区间。区间越小,把握程度越高,该评价方法可以揭示心理现象间复杂的间接关系^[15-17]。肖润谋等根据国际标准 ISO 2631 的研究结论和陈荫三等的研究成果,坐姿疲劳降低工效界限的无法忍受程度均值约为 0.735,且认为无论承受的时间多长,在任何一个心频率上,疲劳降低工效界限的均值为 0.735^[18]。基于此本文研究了中国驾驶人坐姿脚部受振对制动反应时间的影响。

3.1 预试验

预试验目的是获得使受试志愿者脚部对振动的忍受程度接近于 0.735 时对应的振动幅值。试验前,受试志愿者应放松、自然地坐在座椅上,系好安

全带,试验组织者应对每位受试志愿者详细讲解注意事项、试验过程、[0,1]区间估量法的评价方法和打分原则,确认每位受试志愿者清楚知道试验目的、试验过程及评价方法,还应知道试验对身体几乎无伤害。激励信号为正弦信号,频率 8 Hz,起始振动加速度 1.0 m/s²,持续振动时间约 1 min^[14],受试志愿者根据上述评价方法对每组振动打分,打分后试验操作人员会在较短时间内计算总分值,然后试验操作人员手动调节振动加速度幅值,再次让受试志愿者对振动做出评价,直至最终的振动评价值接近于 0.735。为保证心理学评价的准确性,每位受试志愿者总振动时间不超过 20 min。

3.2 脚部振动对制动反应时间影响测试

预试验结束后,每位受试志愿者均应休息 20 h 以上,以消除预试验振动评价对制动反应时间结果的影响。试验对 12 名受试志愿者依次进行。试验开始后,受试志愿者模拟汽车驾驶以正确坐姿就坐,振动台开始工作,振动频率 8 Hz,加速度为预试验确定的振动加速度。当受试志愿者看到前方红灯亮时,应快速用力地踩下制动踏板,VBOX 测试系统记录受试志愿者从脚部接触制动踏板开始至踏板力到达峰值之间的踏板力曲线及时间间隔,然后继续以同样的振动信号对受试志愿者进行激励,振动持续时间约 2 min;同样,受试志愿者看到前方制动灯点亮时以同样的方式进行制动操作及数据采集。每项进行 3 次,然后取平均值,以消除偶然因素的影

响。因为驾驶人脚部受振疲劳与脚部振动加速度密切相关,而与脚部所受的最大制动减速度及车辆速度没有关系,故本试验没有考虑制动减速度和车辆速度 2 个因素对驾驶人脚部疲劳的影响。

4 试验结果

4.1 预试验结果

根据预试验方法及过程,每位受试志愿者对每组振动按照[0,1]区间估量法进行打分,试验操作人员根据每组结果对振动幅值进行调整,最终确定出每位受试志愿者脚部振动无法忍受程度为 0.735 时的振动加速度值。试验结果见表 2。

表 2 预试验结果

Tab. 2 Results of pre-test

受试志愿者编号	[0,1]区间估量法	振动幅值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	0.736	6.0
2	0.850	5.3
3	0.725	6.5
4	0.700	6.5
5	0.750	6.8
6	0.725	6.6
7	0.650	6.8
8	0.825	6.5
9	0.760	6.8
10	0.755	6.8
11	0.790	5.9
12	0.800	6.9

由表 2 可知,中国人体坐姿脚部承受机械振动时,其心理无法忍受程度接近 0.735 时的振动加速度均值为 6.45 m/s^2 。12 名受试志愿者试验结果间的差异性较小,其标准差为 0.016,方差为 0.000 28,中位数为 0.735,表明 12 名受试志愿者对振动的感觉具有较高的一致性。

4.2 脚部振动对制动反应时间影响测试结果

根据前述试验方法,利用制动反应时间测试系统,分别测得 12 名受试志愿者脚部受振动前后的制动反应时间。图 3、图 4 为其中 1 位受试志愿者某组振动前后的测试数据。

对比图 3、图 4 可知,受振动前驾驶人从获得制动信号到脚部接触到制动踏板所经历时间 t_s 为 0.748 s,踏板力从 0 N 上升至 290 N 的时间(即制动器协调时间 t_x)为 0.188 s,上升曲线较为平滑,中间只出现了 1 次滞速现象。脚部经过 2 min 振动后进行同样的制动试验,驾驶人从获得制动信号到脚部接触到制动踏板所经历的时间变为 0.805 s,驾驶人反应时

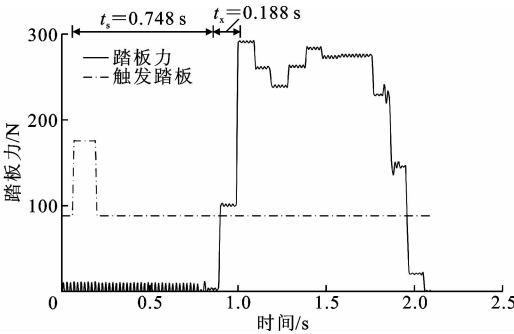


图 3 脚部受振动前制动反应时间
Fig. 3 Response times before feet vibration

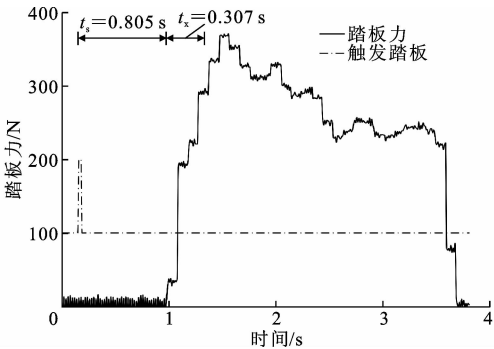


图 4 脚部受振动后制动反应时间
Fig. 4 Response times after feet vibration

间比受振动前延长了约 0.06 s。踏板力从 0 N 上升至 290 N 的时间为 0.307 s,中间出现了 2 次滞速现象。其时间延长了约 0.12 s。从整个制动过程可以看出,振动前驾驶人制动较为果断;而脚部振动疲劳后虽然制动力较振动前大,但整个过程出现多次滞速现象,说明振动后驾驶人脚部对于踏板力的反馈变得迟钝。受试志愿者主观感受认为,通过 2 min 振动其脚部感觉微麻,脚部响应变慢。

按照上述方法,每位受试者的 3 组有效数据平均结果见下页表 3。表 3 中统计的制动反应时间是广义的制动反应时间 t_s ,包括制动器协调时间 t_x 。

为验证试验方法与结果的准确性,对振动前后的数据进行了正态性检验。脚部受振动前后得到的制动反应时间检验 P 值均大于 0.05,结果服从正态分布,说明试验选择人数合理,试验方法可信。从表 3 可知,因受试志愿者个体存在差异,故个体之间制动反应时间存在一定的差异^[19],无论受振前或受振后个体反应时间的差异分布范围为其平均值的 1.4~1.7 倍,振动前后制动反应时间均值分别为 0.795 和 1.125,方差分别为 0.21 和 0.035,95% 的置信区间分别为 [0.69, 0.88] 和 [1, 1.24]。但对每位受试志愿者个体而言,脚部受振动后制动反应时

表 3 振动前后制动反应时间
Tab. 3 Response time before and after feet vibration s

受试志愿者编号	振前制动反应时间	振后制动反应时间	差值
1	0.88	1.16	0.28
2	0.86	1.54	0.68
3	0.56	0.77	0.21
4	0.77	1.12	0.35
5	0.87	1.22	0.35
6	0.76	1.02	0.26
7	0.99	1.22	0.23
8	0.56	0.91	0.35
9	1.01	1.14	0.13
10	0.66	1.02	0.36
11	0.78	1.12	0.34
12	0.75	1.21	0.46
均值	0.79	1.12	0.33

间均有延长,延长时间均值为 0.33 s,方差为0.019,说明制动反应时间差在脚部受振动前后因个体原因离散性较小。

以上分析结果表明,驾驶人脚部位置的振动加速度为 6.45 m/s²,经过约 2 min 振动后,其平均制动反应时间延长了 0.33 s。根据个体差异,在 95% 置信区间内最长的制动反应时间将延长 0.42 s。如果在高速公路上汽车以 120 km/h 的速度跟车行驶,为确保安全其跟车距离,应该在原跟车距离基础上增加约 14 m,说明脚部振动疲劳是影响车辆操控的主要因素之一。

假设人体对振动的反应与振动的能量有关,则 2 种不同的日常振动暴露量在满足下式是等效的^[20]

$$a_{\omega_1} \sqrt{T_1} = a_{\omega_2} \sqrt{T_2} \tag{1}$$

式中: a_{ω_1} 、 a_{ω_2} 分别为第 1 次和第 2 次振动暴露量的加速度均方根值; T_1 、 T_2 分别为第 1 次和第 2 次振动暴露量对应的时间。

假设驾驶人持续驾驶时间为 4 h,按式(1)计算,求得为使驾驶人疲劳程度小于无法忍受程度 0.735 且正常行驶时,驾驶人脚部地板位置垂直方向的振动加速度均方根值不应大于 0.59 m/s²。

5 结 语

(1)本文利用电磁振动台模拟振动环境,依据国际标准 ISO 2631 人体坐姿疲劳降低工效界限方法,依次对 12 名受试志愿者进行了脚部振动的评价和脚部振动疲劳前后制动反应时间变化试验。受试志愿者选择时应能够代表中国驾驶人群体,而且受试人数符合心理测量学样本量的要求,测试结果服从

正态分布。

(2)脚部振动疲劳对驾驶人制动反应时间有显著影响。在振动环境下,振动疲劳前驾驶人的平均制动反应时间为 0.79 s,当脚部振动达到疲劳降低工效界限后其平均制动反应时间延长了 0.33 s。

(3)按照驾驶人连续驾驶不超过 4 h 计算,驾驶人脚部地板位置的振动加速度均方根值应小于 0.59 m/s²,该结果可为车辆噪声、振动和声振粗糙度(NVH)性能正向开发提供参考。

(4)本文只研究了中国驾驶人脚部承受垂直方向振动后对制动反应时间的影响,其他方向振动对其影响还需要进一步探讨。

参考文献:

References:

[1] 裴玉龙,马艳丽. 疲劳对驾驶员感知判断及操作特性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(5): 1151-1156.
PEI Yu-long,MA Yan-li. Effects of driver fatigue on his sense,judgement and operation behavior[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2009,39(5):1151-1156.

[2] 吕集尔,朱留华,郑容森,等. 驾驶员反应时间对行车安全的影响[J]. 交通运输系统工程与信息,2014,14(2):80-86.
LU Ji-er, ZHU Liu-hua, ZHENG Rong-sen, et al. Effects of driver's reaction time on safe driving[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2014,14(2):80-86.

[3] 李 霖,贺锦鹏,刘卫国,等. 基于驾驶员紧急制动行为特征的危险估计算法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,42(1):109-114.
LI Lin, HE Jin-peng, LIU Wei-guo, et al. Threat assessment algorithm based on characteristics of driver emergency braking behavior [J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2014,42(1):109-114.

[4] KLAUER S G, GUO F, SIMONS-MORTON B G, et al. Distracted driving and risk of road crashes among novice and experienced drivers[J]. The New England Journal of Medicine,2014,370(1):54-59.

[5] 王 畅,付 锐,于鹏程. 城市道路环境中驾驶人应激响应感知-制动反应时间分析[J]. 科学技术与工程,2013,13(13):3802-3807.
WANG Chang, FU Rui, YU Peng-cheng. Research on the time characteristics of drivers' emergency response perception-brake reaction under the urban road [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13

- (13):3802-3807.
- [6] 吕长民,谭德荣,于广鹏,等. 基于驾驶员状态的高速公路安全车距模型[J]. 山东交通学院学报,2015,23(4):29-39.
- LU Chang-min, TAN De-rong, YU Guang-peng, et al. Safe interval modal on expressway based on driver state[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2015, 23(4):29-39.
- [7] 林庆峰,成波,屈肖蕾,等. 基于驾驶员制动操作行为的车辆追尾预警算法[J]. 汽车工程,2012,34(3):232-235.
- LIN Qing-feng, CHENG Bo, QU Xiao-lei, et al. Vehicle rear-end collision warning algorithm based on driver's braking behavior[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(3):232-235.
- [8] DINGUS T A, GUO F, LEE S, et al. Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(10):2636-2641.
- [9] 马艳丽,顾高峰,高月娥,等. 基于驾驶绩效的车载信息系统操作分心判定模型[J]. 中国公路学报,2016,29(4):123-129.
- MA Yan-li, GU Gao-feng, GAO Yue-e, et al. Driver distraction judging model under in-vehicle information system operation based on driving performance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4):123-129.
- [10] 汪芳子,宣渝峡,王志,等. 不同方向随机振动下人体动态响应特性的研究[J]. 航天医学与医学工程,1991,4(2):136-144.
- WANG Fang-zi, XUAN Yu-xia, WANG Zhi, et al. Dynamic response of human body under random vibration in different directions[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1991, 4(2):136-144.
- [11] 高利,陈荫三. 卧姿人体承受全身振动的试验方法研究[J]. 客车技术与研究,1998,20(2):38-45.
- GAO Li, CHEN Yin-san. Test method research of human exposure to whole-body vibration in recumbent position[J]. Bus Technology and Research, 1998, 20(2):38-45.
- [12] 苏锦涛,孔德刚,李紫辉,等. 拖拉机座椅振动加速度对驾驶疲劳的影响——以心率增加率和疲劳评价值为指标[J]. 农机化研究,2011,33(1):161-164.
- SU Jin-tao, KONG De-gang, LI Zi-hui, et al. The impact of tractor seats vibration acceleration on drivers' driving fatigue—Taking increasing rate of HR and fatigue appraisal value as the target[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1):161-164.
- [13] 戴海琦. 心理测量学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2015.
- DAI Hai-qi. Psychometrics [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [14] PENG Shao-ping, LI Ying-zhong, HAN Yi-bao, et al. A frequency weighting contour for Chinese young males[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2000, 13(3):162-165.
- [15] 杜岸政,古纯文,丁桂凤. 心理学研究中的中介效应分析意义及方法评述[J]. 中国心理卫生杂志,2014,28(8):578-583.
- DU An-zheng, GU Chun-wen, DING Gui-feng. A review of the significance and methods of mediation analysis in psychological researches[J]. Chinese Mental Health Journal, 2014, 28(8):578-583.
- [16] 马谋超,汪培庄. 心理学的方法学探讨——心理的模糊性及模糊统计试验评注[J]. 心理学报,1985,17(2):177-186.
- MA Mou-chao, WANG Pei-zhuang. An exploratory study on psychological methodology: Notes on psychological fuzziness and fuzzy statistical tests[J]. Acta Psychologica Sinica, 1985, 17(2):177-186.
- [17] 马谋超. 心理物理阈限的模糊理论[J]. 心理学报,1990,22(3):240-246.
- MA Mou-chao. Fuzzy theory of psychophysical threshold[J]. Acta Psychologica Sinica, 1990, 22(3):240-246.
- [18] 肖润谋,运伟国,杨铭,等. 中国驾驶人坐姿脚部受振评价方法与应用[J]. 长安大学学报:自然科学版,2015,35(15):131-136,158.
- XIAO Run-mou, YUN Wei-guo, YANG Ming, et al. Evaluation methods and application study on feet vibration of Chinese driver in sitting posture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(15):131-136,158.
- [19] 唐阳山,夏道华. 不同驾驶员反应时间对汽车防撞安全距离的影响研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(1):250-254.
- TANG Yang-shan, XIA Dao-hua. Study the influence of different driver's reaction time to the automobile anti-collision safety distance[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1):250-254.
- [20] ISO 2631-1—1997, Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration—Part 1[S].