

# 中国驾驶人坐姿脚部受振评价方法与应用

肖润谋<sup>1</sup>, 运伟国<sup>1</sup>, 杨 铭<sup>2</sup>, 李 彬<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 宁波工程学院 经济与管理学院, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**为了研究中国驾驶人响应及疲劳限值,选择 8 名志愿受试者,通过心理学评价方法得到了中国人脚部受振疲劳限值,依次使 20 名志愿受试者承受该标准激励,得到了 6.3~80 Hz 范围内等感觉振动加速度,通过数据处理得到了中国人脚部受振频率计权曲线。研究结果表明:6.3~16 Hz 频率范围内试验得到的中国人脚部振动频率加权曲线与 ISO 2631—1997 规定的曲线基本一致,但是在 16~80 Hz 频率范围内,试验结果曲线明显大于 ISO 2631—1997 规定的曲线,证明在该频率范围内中国人脚部对振动更为敏感,因此中国投产的车辆应该在产品设计和人机工程学方面加以重视。

**关键词:**汽车工程;脚部振动;心理学评价;频率计权;传递函数;评价

**中图分类号:**U491.254 **文献标志码:**A

## Evaluation methods and application study on feet vibration of Chinese driver in sitting posture

XIAO Run-mou<sup>1</sup>, YUN Wei-guo<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Economics and Management, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to study the response and fatigue limit values of Chinese drivers, 8 trial volunteers were chosen for a test. The fatigue limit value of feet vibration of Chinese drivers was acquired via psychological evaluation. The equal feelings of vibration acceleration within the range of 6.3-80 Hz were obtained through the test in which 20 trial volunteers were arranged in turn to take the standard stimulation. The frequency weighting curve for feet vibration of Chinese drivers was obtained by processing the above data. The results show that within the frequency range of 6.3-16 Hz, the frequency weighting curve for feet vibration of Chinese drivers is in the similar trend with the curve prescribed in ISO 2631—1997; nevertheless, within the frequency range of 16-80 Hz, the values on frequency weighting curve for feet vibration of Chinese drivers are significantly greater than those on the curve prescribed in ISO 2631—1997. This indicates that Chinese drivers are more sensitive to vibration on their feet within the vibration frequency range of 16-80 Hz. Therefore, product design and ergonomics shall be valued for the design and manufacture of domestic motor vehicles. 8 tabs, 2 figs, 16 refs.

**Key words:** automobile engineering; vibration of feet; psychological evaluation; frequency weigh-

ting; transfer function; evaluation

## 0 引言

汽车是一个综合运动体,路面不平会引起车体的振动,汽车本身的部件也会引起车体振动。同时,汽车运行会使人们处于振动环境中,对人体的长时间作用会影响到驾驶人的舒适性及工作效率,甚至加速人体疲劳,影响行车安全<sup>[1-5]</sup>。据相关研究,低频振动容易引起职业病,因此中国众多学者将研究重点移向低频振动<sup>[6]</sup>。作者在中国重型商用车市场调研中发现随着近年来车辆高速化趋势的发展,车辆传动轴等旋转件等引起的高频振动(15 Hz 以上)对驾驶人脚部及小腿躯干影响较大,驾驶人长时间暴露在高频振动下容易引起脚部发麻,小腿肿胀等生理现象,一定程度上严重威胁了交通安全。

中国现行《汽车平顺性试验方法》(GB/T 4970—2009)对于脚部振动频率计权系数完全参照 ISO 2631—1997 的规定,该标准数据主要依据欧洲人体试验结果得到,未充分考虑中国人种族和体质对脚部振动反应的影响及道路特点,另外该标准中只提及频率加权系数,未得出脚部振动暴露时间及暴露量。基于此,本文在 1990 年陈荫三教授等对于卧姿振动研究的基础上,探讨中国人体坐姿脚部受振响应及影响疲劳的暴露限值,为车辆设计提供基础数据和理论依据<sup>[6-9]</sup>。

## 1 试验设备及环境

为保证试验结果的准确性,本试验除采用较优的评价方法外,还必须保证使用精确的试验设备与较好的试验环境,以及对试验数据的科学管理和分析<sup>[10]</sup>。

### 1.1 振动试验台的选定

汽车传动轴转速越高其不平衡引起的振动越剧烈,根据对重型商用车大量试验发现,只有当传动轴转速超过 1 000 rpm 时驾驶室才能感知其振动。传动轴转速为 1 000 rpm 时传动轴 1 阶激励为 16.7 Hz,另外商用车传动轴最高转速不超过 3 000 rpm,对应的传动轴 1 阶激励为 50 Hz。考虑到包容性,本试验只研究 15~80 Hz 之间的振动,因此选用中高频性能较好的电磁振动试验台,试验台面尺寸 700 mm×700 mm,最大推力为 3 000 kg,频率范围 5~2 000 Hz,振动控制仪为德国 M+P 振动控制系统,加速度传感器为 ICP 型。试验设备配置如图 1 所示。

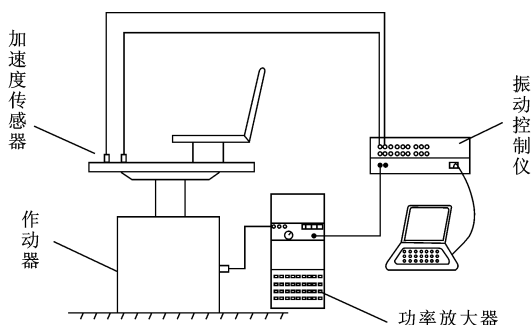


图 1 人体坐姿脚部振动试验系统

Fig. 1 Feet vibration system of seated people

### 1.2 试验用座椅及辅助设备

试验选用某重型商用车空气座椅,通过调整气囊以保证受试者正确坐姿,座椅供气压力为 0.65 MPa,座椅通过工装刚性地与振动试验台连接。为保证试验评价的一致性,试验时每位受试者穿相同的薄底布鞋。在试验过程中所用的称重仪、高度尺等测量工具均在标定期限内。

### 1.3 试验环境

试验在室内进行,室内温度为  $20 \pm 2$  °C,室内气压为 101 kPa,湿度为 50%~60%,在整个试验过程中无异常的噪声与其他影响振动评价的外界激励。

## 2 试验志愿受试者

受试者的选择直接影响着试验结果的准确性。本次试验所选受试者均在试验之前对其身体情况进行了检查,确认身体健康,无重大脑部、躯干疾病史,无心理疾病与器质性疾病史,另外在性别、年龄、职业、体重等方面有一定的代表性,符合中国驾驶人的基本情况。

### 2.1 受试者人数

根据国外心理学研究结果,在置信度为 95%、误差为 0.5%时所需的人数为 8~12 人<sup>[5]</sup>,本试验确定的受试者人数为 20 人,其中男性 16 名,占 80%,女性 4 名,占 20%。

### 2.2 受试者年龄及身高

20 名受试者平均年龄为 30 岁,其中年龄介于 23~25 岁为 2 人,占 10%;介于 26~30 岁为 8 人,占 40%;介于 31~35 岁为 9 人,占 45%;35 岁以上为 1 人,占 5%。受试者身高情况见下页表 1。

### 2.3 受试者体重情况

受试者体重情况见下页表 2,具有一定的代表性。

表 1 受试者身高情况  
Tab.1 Heights of tested people

身高/cm	156~160	161~165	166~170	171~175	≥176
人数/人	3	4	6	3	4
百分比/%	15	20	30	15	20

表 2 受试者体重情况  
Tab.2 Weights of tested people

体重/kg	50~60	61~70	71~80	80~90	≥90
人数/人	5	8	3	2	2
百分比/%	25	40	15	10	10

2.4 受试者职业情况及籍贯分布

本次试验受试者大致可以分为在读研究生、高校教师、汽车 NVH 测试工程师、汽车多体动力学仿真工程师、职业驾驶员等几类,他们具有较高的文化素养,其中 80%以上受试者实际驾龄超过 3 年,其中有 2 名职业驾驶员。能够比较客观地对振动感受进行评价,具体见表 3。从籍贯分布看,基本上涵盖了中国大部分地区。

表 3 受试者职业情况  
Tab.3 Careers of tested people

职业	研究生	高校教师	测试工程师	多体仿真工程师	职业驾驶员
人数/人	3	1	8	6	2
百分比/%	15	5	40	30	10

3 试验评价方法和试验过程

3.1 试验评价方法

人体是一个复杂的多体动力学系统,很难用一定的数学模型表达,其神经系统对振动的敏感度较高,振动环境对人体生理及心理均会产生一定的影响<sup>[11]</sup>。因此生理学指标评价和心理学指标评价在关于人体全身承受振动评价指南(国际标准 ISO2631)中都进行了使用,实际证明 2 种方法均可行<sup>[12-15]</sup>。但受到人体复杂性的影响,人体受振后生理学指标的变化往往受到心理变化的影响,同样,受振后心理的变化也会受到生理变化的影响,所以两者相辅相成,相互影响。本文采用心理学指标评价方法,在心理应变方面用了“8 级模糊估量法”及“[0,1]区间估量法”。

心理连续量可分为若干类别,但是其界限表现出不确定性,是模糊的。而且人对振动感觉的认识和描述也是模糊的。心理反映的分类是心理连续量上的模糊子集,本试验是对脚部振动感受的评价,是用模糊的语言表达的。一种感觉或感受对于每一类别都有一定的隶属度,可以用各类别的隶属度大小

来表示感受的分布情况,隶属度越接近 1,表示属于该类别的程度越大,本次试验中,把脚部对振动感觉这一连续量分为 8 个类别,如表 4 所示。要求受试者对每次试验都必须在各个类别做出估量,而不是唯一性的选择。首先选出认为隶属度最大的并认真地写出属于该类别的隶属度,然后再与左右邻近类别上作对偶比较,以便更好地发现它们和已确定的隶属度有什么样的比例关系,以同样的程序写出所有类别的隶属度。若完全属于某个类别,则在该类别上填 1,完全不属于某个类别,则填 0,而介于之间时,填 0 到 1 之间的数<sup>[12-13,16]</sup>。

表 4 8 级模糊估量法分级  
Tab.4 Eight hierarchical fuzzy measure method

级别	心理感觉	与 1 级的距离
1	没有感觉	0.000
2	刚感觉到	0.083
3	可以感觉到	0.167
4	感觉一般	0.299
5	感觉强烈	0.513
6	感觉较强烈	0.709
7	感觉非常强烈	0.824
8	感觉极强烈	1.000

[0,1]区间估量法,实际上可以把刺激的所有响应,即心理连续量取值范围规定在[0,1]区间内,且规定“0”为刺激响应最小的下限,“1”为刺激响应的上限。对于脚部受振试验而言,本文规定“0”为没有振动感觉,“1”为对振动强度无法忍受。要求受试者在[0,1]区间内给出他所认为能表达自己响应的尽可能小的区间。即给出[0,1]区间内的一个小区间左端点  $X_i$  和右端点  $X_i+1$ ,刺激的强度越大,则反应的小区间即  $X_i/X_i+1$  的值越接近 1,小区间越小,把握程度越高,长度为 0,则表示绝对有把握。

3.2 试验过程

根据 ISO 2631 坐姿振动试验结果,按照 8 级模糊估量法,坐姿 16 min 疲劳降低工效界限的无法忍受程度均值为 0.735,另据文献[9],可以认为无论承受的时间多长,在哪个中心频率上,疲劳降低工效界限的均值均为 0.735,在此基础上进行了中国人坐姿脚部受振疲劳降低工效界限的评价试验。

3.2.1 预备试验

从 20 名受试者中选择 8 名受试者进行预试验,预试验的目的是在给定的频率下,通过调整振动加速度使受试者所记录的无法忍受程度接近 0.735,本试验激励信号为 8 Hz,为正弦信号。试验开始时,受试者自然放松的坐在座椅上,系好安全带,试

验组织者在试验开始前详细讲解打分原则及注意事项,受试者清楚虽然承受全身振动,但是感受的主要部位为脚部及小腿部位。

3.2.2 坐姿脚部受振评价试验过程

根据预备试验的模糊估量法可以确定出脚部振动无法承受程度为 0.735 时的振动幅值,然后对 20 名受试者进行如下试验。

(1)登记受试者的基本信息,包括姓名、性别、身高、出生年月等,对受试者的身体健康情况进行确认。

(2)试验组织者为受试者讲解试验过程和要求,主要包括试验过程坐姿要求,感觉应该达到的程度,另外还需要说明此次试验,受振时间较短不会对身体健康产生任何影响。

(3)使受试者承受预试验标准频率及通过试验确定的振动加速度 15 s 时间,使受试者获得一个振动感觉,然后依次承受 6.3、10、12.5、16、20、25、31.5、40、50、63、80 Hz 试验激励,使用信号调节装置调节其强度,直至获得与标准激励相同的振动感觉为止,试验组织者记录每次确定的试验加速度均方根值。

4 试验结果与处理

4.1 预备试验结果

根据预备试验方法及过程,每位受试者完成试验后记录“8 级模糊估量法”及“[0,1]区间类比估量法”,从试验结果可以看出,2 种评价方法的结果基本相同,受试者感觉是一致的,所以本试验取 2 种结果的平均值作为受试者在该振动幅值下的无法忍受程度,即

$$R_L = \frac{R_8^L + R_{0.1}^L}{2} \tag{1}$$

式中: $R_L$  为受试者在某一振动幅值下的无法忍受程度; $R_8^L$  为 8 级模糊估量法无法忍受程度; $R_{0.1}^L$  为[0,1] 区间类比估量法无法忍受程度。

通过调整振动幅值使每位受试者的无法忍受程度接近 0.735,记录此时的振动加速度均值,见表 5。最终的振动驾驶人取 8 名受试者的平均值。

分析表 5 所示的预试验结果可得出,均值为 0.74,振动加速度幅值均值为 6.38 m/s<sup>2</sup>,“8 级模糊估量法”得到结果的均值为 0.73,[0,1]区间类比法得到结果的均值为 0.75,再次验证了此 2 种方法的一致性。另外 8 名受试者结果的差异性较小,标准

表 5 预备试验结果  
Tab. 5 Results of pretest

受试者	$R_8^L$	$R_{0.1}^L$	$R_L$	振动幅值/(m·s <sup>-2</sup> )
1	0.740	0.736	0.74	6.0
2	0.625	0.850	0.74	5.3
3	0.722	0.725	0.73	6.5
4	0.757	0.700	0.73	6.5
5	0.768	0.750	0.76	6.8
6	0.701	0.725	0.71	6.6
7	0.820	0.650	0.74	6.8
8	0.700	0.825	0.76	6.5

差为 0.016 4,方差为 0.000 27,说明 8 名受试者对于振动的感觉具有较高的一致性。

4.2 坐姿脚部受振试验结果

根据 3.2 节描述的试验方法,对 20 名受试者依次进行了各频率下的受振试验。每个频率试验前首先让受试者承受 10 s 标准激励,激励频率 8 Hz,振幅为 6.38 m/s<sup>2</sup>。某个频率的受振试验结束后让受试者休息 2 min,以消除前一个频率振动的影响。试验结果见下页表 6。

脚部受振总频率计权传递函数  $H(f)$  可表示为  $H(f) = H_h(f)H_l(f)H_t(f)H_s(f)$  (2) 式中: $H_h(f)$  为高通; $H_l(f)$  为低通; $H_t(f)$  为加速度-速度转换; $H_s(f)$  为高阶。

$H(f)$  是由频率  $f_1, \dots, f_6$  和共振品质因数  $Q_1, \dots, Q_6$  决定的,它是式(2) 所示的几个因数的乘积<sup>[9]</sup>。ISO 2631—1997 中推荐的参数取值如下页表 7 所示。频带界限(具有 Butterworth 特性的两极滤波器, $Q_1 = Q_2 = 1/\sqrt{2}$ )。

对于高通

$$H_h(f) = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \tag{3}$$

式中: $f_1$  为转折频率(渐近线的交点),文中取值与 ISO 2631—1997 一致,取 0.4。

对于低通

$$H_l(f) = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \tag{4}$$

式中: $f_2$  为转折频率,文中取值与 ISO 2631—1997 一致,取 100。

加速度-速度转换(在低频率端与加速度成正比,在高频率端与速度成正比)为

$$H_t(f) = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 Q_4^2}{f_1^4 Q_1^2 + f^2 f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 Q_4^2}} \tag{5}$$

表 6 20 人坐姿脚部受振试验结果

Tab. 6 Test result of feet vibration for twenty seated people

受试者	频率/Hz											
	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
1	4.80	6.38	6.63	6.75	6.92	7.00	7.30	7.80	5.20	7.20	11.50	24.00
2	5.20	6.38	6.60	7.10	8.10	7.90	7.50	8.20	5.70	7.80	16.00	24.00
3	5.00	6.38	6.60	7.10	7.50	7.90	7.40	8.10	5.20	7.50	16.00	24.00
4	4.60	6.38	6.55	6.70	7.50	7.60	7.05	7.70	6.00	7.20	9.40	20.00
5	5.00	6.38	6.60	6.70	7.50	6.85	7.05	7.70	5.30	7.00	9.80	22.00
6	5.50	6.38	6.65	7.10	7.40	7.80	6.95	8.30	5.70	7.80	20.00	22.00
7	5.30	6.38	6.65	6.90	7.30	6.85	7.05	7.60	5.20	7.00	9.00	20.00
8	5.20	6.38	6.55	6.70	8.50	7.50	7.80	8.10	5.40	6.60	9.00	14.00
9	5.20	6.38	6.50	6.70	8.20	7.30	6.90	7.60	4.60	6.60	9.20	10.00
10	4.80	6.38	6.55	6.70	8.50	7.90	8.00	8.50	5.70	7.70	20.00	24.00
11	5.00	6.38	6.60	7.00	8.20	7.80	7.05	8.10	5.70	7.60	11.50	24.00
12	5.10	6.38	6.50	6.60	7.50	7.10	6.90	7.65	5.00	6.60	9.60	14.00
13	4.90	6.38	6.55	6.65	8.30	7.60	7.90	7.65	5.10	7.50	10.00	20.00
14	5.20	6.38	6.55	6.70	8.20	8.00	7.50	7.65	5.20	9.00	20.00	24.00
15	5.00	6.38	6.65	6.90	7.20	7.35	7.55	8.05	5.35	6.50	10.50	17.00
16	5.10	6.38	6.60	6.70	8.50	7.40	7.40	8.30	5.70	10.50	16.00	24.00
17	4.90	6.38	6.50	6.80	7.80	7.90	7.40	8.10	5.60	7.50	18.00	20.00
18	5.00	6.38	6.60	6.70	7.90	7.60	7.40	7.90	5.30	7.70	14.00	18.00
19	4.80	6.38	6.55	6.70	7.80	7.60	7.90	8.40	5.50	7.40	18.00	24.00
20	5.40	6.38	6.55	6.60	8.00	7.70	7.05	8.10	5.20	6.80	11.50	16.00
平均值	5.05	6.38	6.58	6.79	7.84	7.53	7.35	7.98	5.38	7.48	13.45	20.25

表 7 ISO 2631—1997 基本频率计权传递函数参数

Tab. 7 Parameters of the transfer function of the principal frequency weighting of ISO 2631—1997

加权	频带界限				加速度-速度转换			高阶	
	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	$f_3/\text{Hz}$	$f_4/\text{Hz}$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$f_5/\text{Hz}$	$f_6/\text{Hz}$
$w_k$	0.4	100	12.5	12.5	0.63	0.91	0.91	2.37	3.35

高阶(斜率约为 6 dB 每倍频程,与加速度成比例)为

$$H_s(f) = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 Q_5^2 + f^2 f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 Q_5^2}{f^4 Q_6^2 + f^2 f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 Q_6^2}} \tag{6}$$

本文认为中国人坐姿脚部及小腿躯干振动频率加权曲线轮廓形状应与国际标准一致,只是考虑中国人体特征及中国人生活水平的差异使中国人对等同振动的响应大小有所不同。根据本次试验结果,计算得到 20 名受试者在各频率下对应标准激励获得等同感觉的振动加速度均方根值,记为  $a(f_j)$

$$a(f_j) = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} a_i(f_j) \tag{7}$$

根据国际标准 ISO 2631—1997 数据处理方法,为得到中国人坐姿脚部及躯干频率加权曲线,需要得到决定传递函数的各参数值,此处利用最小二乘

法原理使下列目标函数取到极小值,即得到  $f_3, \dots, f_6, Q_4, \dots, Q_6$  的取值,见下页表 8。

$$\text{obj}(f_3, f_4, f_5, f_6, Q_4, Q_5, Q_6) = \sum_{j=1}^{12} [H(f_j) - \frac{I_{\text{norm}}}{a(f_j)}] \tag{8}$$

式中: $I_{\text{norm}}$  等于 6.23 为实际测得的标准激励振幅,  $I_{\text{norm}}$  为 norm 的计算参数。

最后得到中国人坐姿脚部振动频率加权曲线与国际标准 ISO 2631—1997 给出的频率加权曲线,如下页图 2 所示。

由图 2 可知,低于 16 Hz 时,试验得到的频率加权曲线与 ISO 2631—1997 推荐的频率加权曲线基本一致,在 16~80 Hz 之间中国人坐姿脚部受振频率加权曲线明显大于 ISO 2631 推荐的曲线,而且随着频率的升高差距逐步增大。说明中国人脚部对高频振动较敏感,直接使用 ISO 2631 推荐的频率加权系数作为中国汽车平顺性试验标准有不合理之处。

表 8 中国人坐姿脚部振动基本频率计权传递函数参数

Tab. 8 Parameters of transfer function of the principal frequency weighting of Chinese seated people

加权	频带界限				加速度-速度转换			高阶	
	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	$f_3/\text{Hz}$	$f_4/\text{Hz}$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$f_5/\text{Hz}$	$f_6/\text{Hz}$
$w_k$	0.4	100	2.035	10.79	3	1	1	0.172 3	0.730 7

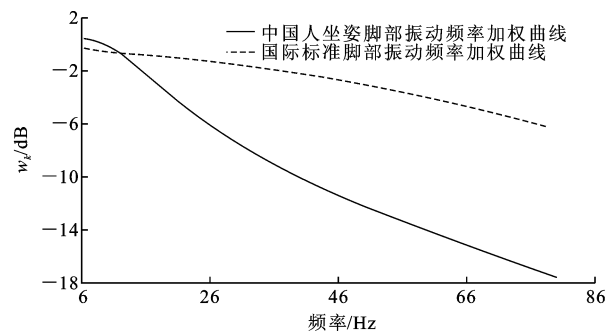


图 2 脚部振动频率加权曲线

Fig. 2 Frequency weighting contours of feet

5 结 语

(1)根据中国的实际道路交通情况,长途运输的驾驶人常长时间驾车,其脚部振动容易引起疲劳,影响交通安全。到目前为止,还缺乏足够的脚部振动评价的资料,因此开展中国人坐姿脚部振动评价研究是十分必要的。

(2)在振动心理学评价中,“8 级模糊估量法”和“[0,1]区间类比法”评价结果是一致的,证明该方法可行、有效。

(3)在试验中,志愿受试者在性别、年龄、身高、体重、职业及籍贯方面有一定的覆盖面,不仅对中国驾驶人群体有一定的代表性,而且在受试人数上符合大样本的要求。试验结果表明,当人数大于 20 人时,数据均值已基本稳定,增加人数对结果基本无影响。

(4)在 6.3~16 Hz 频率范围内试验得到的中国人脚部振动频率加权曲线与 ISO 2631—1997 规定的曲线基本一致。在 16~80 Hz 频率范围内,试验结果曲线明显大于 ISO 2631—1997 规定的曲线,说明在该频率范围内中国人脚部对振动较为敏感,这主要是中国人体与欧洲、西方人体的差异决定的。该结果对国家制定车辆平顺性评价标准和汽车企业设计车辆均具有一定的参考价值。

(5)采用主观方法评价时,权重的确定受人为因素的影响比较大,因此应该多征求专家意见。此外,针对中国人对高频振动敏感的特性,后期在驾驶室的具体改进措施方面需要进一步研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 林 逸,马天飞,姚为民. 汽车 NVH 特性研究综述[J]. 汽车工程,2002,24(3):32-36.  
LIN Yi, MA Tian-fei, YAO Wei-min. The summary of study on vehicle NVH performance[J]. Automotive Engineering, 2002, 24(3): 32-36. (in Chinese)

[ 2 ] 高红华,陈学东,钱文军. 汽车平顺性的建模分析及研究[J]. 工程设计学,2003,10(6):321-325.  
GAO Hong-hua, CHEN Xue-dong, QIAN Wen-jun. Modeling analysis and research of automobile ride [J]. Journal of Engineering Design, 2003, 10(6): 321-325. (in Chinese)

[ 3 ] 裴玉龙,马艳丽. 疲劳对驾驶人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. (in Chinese)

[ 4 ] 李平凡,王殿海,刘东波,等. 基于驾驶人生理心理参数的午餐后驾驶疲劳分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(4):81-86.  
LI Ping-fan, WANG Dian-hai, LIU Dong-bo, et al. Analysis on driving fatigue before and after lunch on indices of physiology and psychology [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 81-86. (in Chinese)

[ 5 ] Serge H R, Carlo J D, Mark E B S, et al. Spectral electromyography assessment of back muscles in patients with low back pain undergoing rehabilitation [J]. Spine, 1995, 20(1): 38-48.

[ 6 ] Du H, Li W, Zhang N. Vibration control of vehicle seat integrating with chassis suspension and driver body model[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(1): 1-9.

[ 7 ] Fouladi M H, Nor M J, Ariffin A K. Spectral analysis methods for vehicle interior vibro-acoustics identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 489-500.